

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

INSTRUMENTAÇÃO DE DINAMÔMETRO DE ROLOS PORTÁTIL

por

Alinson Meneghetti de Oliveira

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 2010

INSTRUMENTAÇÃO DE DINAMÔMETRO DE ROLOS PORTÁTIL

por

Alinson Meneghetti de Oliveira

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. Dr. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 29 de Junho de 2010.

OLIVEIRA, A.M. **Instrumentação de dinamômetro de rolos portátil**. 2010. 26p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Este trabalho aborda a instrumentação de um dinamômetro de rolos portátil para teste de veículos de baixíssima potência (até 100 W). A instrumentação objetiva medir valores de torque e velocidade angular para o cálculo da potência gerada pelo motor em teste. Primeiramente, os valores de força, torque, velocidade angular e potência são especificados. Depois, todos os equipamentos necessários para a instrumentação são especificados e adquiridos, sendo montados e adaptados à estrutura do dinamômetro de rolos já construída. São realizados testes de verificação do funcionamento dos instrumentos utilizados no dinamômetro, focando-se nas medições de força e rotação pela célula de carga e sensor Hall, respectivamente. Obtêm-se resultados satisfatórios nos testes, com boa repetibilidade de resultados aliados a baixa incerteza de medição, especialmente nas medidas de força com a balança utilizada. Uma análise é feita para se avaliar a propagação de incertezas ao longo de todas as medições realizadas, visto que o cálculo da potência se dá de forma indireta, através de medições primárias que, juntas, fornecem os valores de potência. Conclui-se que o trabalho atingiu os objetivos propostos, desde a construção até os testes finais.

PALAVRAS-CHAVE: dinamômetro, medição de potência, motor de baixa potência

OLIVEIRA, A.M. **Instrumentation of a portable roll dynamometer**. 2010. 26p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

This work deals with the instrumentation of a portable roll dynamometer for testing very low-power vehicle engines (up to 100 W). The dynamometer measures the torque and the angular speed values in order to obtain the power generated by the engine being tested. First of all, the values of force, torque, angular speed and power are specified. Then, every necessary equipment for the instrumentation is specified and acquired, being installed and adapted to the roll dynamometer structure built. Some tests are performed to verify whether the instrumentation equipments are working properly, focusing on the force and angular speed measurements of the load cell and the Hall sensor, respectively. Satisfactory results are obtained, having good repeatability allied to low uncertainty, especially due to the force measurements done with the scale in use. An analysis is done to evaluate the propagation of uncertainty, assuming that the power is obtained indirectly through primary measurements which combined provide the power value. It can be concluded that the work has achieved its proposed aims, since the construction until the final tests.

KEYWORDS: dynamometer, power measurements, low-power engines

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1. Conceitos sobre Dinâmica.....	2
3.2. Princípio de funcionamento do dinamômetro.....	3
4. METODOLOGIA.....	4
4.1. Passos para realização do trabalho.....	4
4.2. Definição das condições iniciais.....	4
4.3. Cálculos e dimensionamentos.....	4
4.3.1. Velocidade angular.....	4
4.3.2. Torque previsto.....	5
4.3.3. Forças previstas.....	5
5. SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	5
6. MONTAGEM DA INSTRUMENTAÇÃO.....	7
7. METODOLOGIA DE TESTES.....	8
7.1. Testes com motor de velocidade variável.....	8
7.2. Testes com bicicleta.....	10
8. ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	10
8.1. Incerteza da balança.....	10
8.2. Incerteza dos instrumentos de medição.....	11
9. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	12
9.1. Testes com motor de velocidade variável.....	12
9.2. Testes com bicicleta.....	13
10. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
Apêndice 1.....	16
Apêndice 2.....	20

1. INTRODUÇÃO

Existe um interesse crescente no desenvolvimento de aprimoramentos aos meios atuais de produção e utilização de energia e bens naturais. O desenvolvimento de veículos que poluam menos e percorram maiores distâncias com menos combustível vem ganhando cada vez mais importância na indústria automotiva. Enquanto não se desenvolver alternativas viáveis do ponto de vista técnico e econômico para substituição dos combustíveis fósseis, existirá uma obrigação em desenvolver tecnologias que os utilizem da melhor forma possível, visando continuamente melhorar a eficiência dos motores a combustão [ABDI, 2010].

Neste cenário, ao longo dos últimos anos vem crescendo a importância e o interesse das grandes montadoras sobre qualquer linha de pesquisa com foco em eficiência energética em motores a combustão. Em paralelo a este desenvolvimento, nas últimas décadas vê-se que o desenvolvimento de veículos movidos a motores elétricos tem amadurecido bastante, chegando ao ponto de torná-los viáveis do ponto de vista mercadológico, mesmo que em produção limitada [TESLA, 2010].

Nas universidades, existe também muito interesse na busca deste conhecimento, pois existe já há alguns anos uma competição de veículos que devem percorrer a maior distância com uma determinada quantidade de combustível. A competição anual Maratona da Eficiência Energética conta com apoio de montadoras e empresas de energia, sendo inspirada na competição Shell Eco-marathon, organizada pela empresa petroquímica Shell desde o ano 1985 [SHELL, 2010].

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, através do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia, está iniciando um projeto para desenvolver um protótipo que visa à eficiência energética. Tal desenvolvimento envolve diversos aspectos que devem ser levados em conta para melhorar a eficiência energética de veículos. Pode-se destacar redução de peso, aprimoramento aerodinâmico, diminuição do arrasto e atrito das partes mecânicas, tais como: transmissão e rolamentos. Pode-se também aprimorar os sistemas de alimentação e injeção de combustível.

No estudo da eficiência de funcionamento do sistema de propulsão, seja elétrico ou mecânico, e de sua transmissão, necessita-se do conhecimento dos valores de torque e rotação produzidos pelo motor para se conhecer a potência que este está gerando. O equipamento utilizado para medição de torque e rotação é chamado de dinamômetro [SIROHI, 1993]. O dinamômetro deste trabalho já está construído em sua parte mecânica, necessitando que seja instrumentado e posteriormente testado. A construção da estrutura física do dinamômetro foi objeto de outro trabalho de diplomação [ROSSONI, 2009]. Portanto, o presente trabalho está dando continuidade ao que já foi iniciado, mostrado na Figura 1.1:

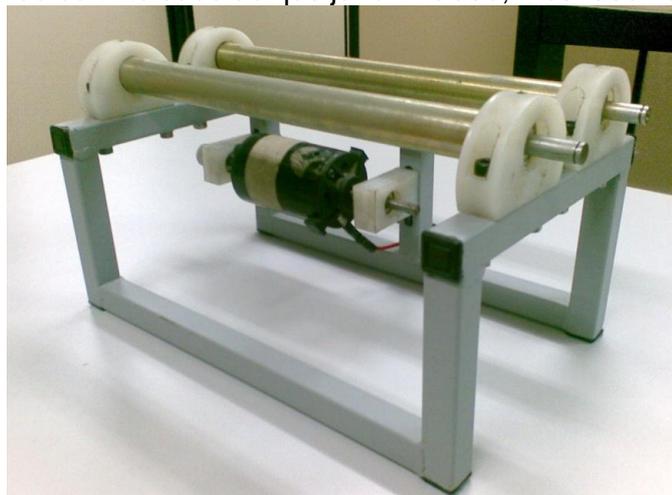


Figura 1.1 – Estrutura do dinamômetro de rolos portátil

Com os dados de potência, torque e rotação obtidos com os testes de motores em dinamômetros, é possível realizar modificações de transmissão, faixas de rotação do motor, e demais alterações possíveis (injeção, pneus e rodas, etc.) e verificar se estão contribuindo para uma melhora na eficiência energética.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral:

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar a instrumentação de um dinamômetro de rolos portátil de baixo custo para medição de potências de até 100 W.

Objetivos Específicos:

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Dimensionamento dos requisitos de potência, torque e rotação do dinamômetro.
- Seleção de uma célula de carga que atenda às necessidades do sistema em teste.
- Dimensionamento do braço de alavanca.
- Definição e dimensionamento da resistência elétrica que irá consumir a energia gerada.
- Instalação do sensor por efeito Hall.
- Cálculo das incertezas de medição do dinamômetro.
- Teste do funcionamento do dinamômetro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Conceitos sobre Dinâmica

Para a medição de potência com um dinamômetro utilizam-se alguns conceitos básicos de mecânica newtoniana. Os seguintes foram utilizados neste trabalho para dimensionamento de alguns componentes, assim como formam a base do sistema de medição em questão, pois a partir das informações de força, velocidade angular e raio de ação da força, chega-se à medida de potência do motor. As seguintes equações mostradas neste capítulo têm origem em Meriam, 2004.

Velocidade angular “ ω ” é a medida de variação angular “ $\Delta\theta$ ” de um ponto material “P” seguindo uma trajetória circular em um determinado intervalo de tempo “ Δt ”. A relação entre a variação angular “ $\Delta\theta$ ” e o intervalo de tempo “ Δt ” define velocidade angular de movimento, mostrada na equação 3.1:

$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (3.1)$$

onde, ω é a velocidade angular [rad/s], $\Delta\theta$ é a variação angular [rad] e Δt é o intervalo de tempo [s].

A velocidade tangencial tem como característica a mudança de trajetória a cada instante, sendo constante em módulo. A relação entre a velocidade tangencial “ v ” e a velocidade angular “ ω ” é definida pela equação 3.2:

$$v = \omega r \quad (3.2)$$

onde v é a velocidade tangencial [m/s] e r é o raio de giração [m] do sistema.

Torque é o momento exercido por uma força “ F ” a uma determinada distância “ r ” do centro de rotação de um eixo. É definido pela equação 3.3:

$$T = Fr \quad (3.3)$$

onde T é o torque [N.m] e F é a força exercida [N].

Potência é definida como o trabalho realizado por unidade de tempo. Tem-se então pela equação 3.4 que:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Fd}{t} \quad (3.4)$$

A velocidade é definida como distância percorrida em um determinado espaço de tempo, conforme equação 3.5:

$$v = \frac{d}{t} \quad (3.5)$$

Portanto, tem-se a primeira equação para potência em função da força e da velocidade tangencial, como mostrado na equação 3.6:

$$P = Fv \quad (3.6)$$

onde P é a potência [W].

Rearranjando as equações 3.2 e 3.3 tem-se a velocidade angular e a força para a velocidade tangencial e torque, sabendo-se o raio do eixo girante, conforme equações 3.7 e 3.8 a seguir:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (3.7)$$

$$F = \frac{T}{r} \quad (3.8)$$

Chega-se finalmente à equação 3.9, utilizada para medição da potência com o dinamômetro, quando se sabe os dados de velocidade angular e torque medidos com o dinamômetro:

$$P = T\omega \quad (3.9)$$

3.2. Princípio de funcionamento do dinamômetro

Segundo Sirohi, 1993, quando acionado pelo motor ou pela roda do veículo, o dinamômetro irá consumir a energia gerada pelo gerador elétrico, através da utilização de resistências elétricas ou lâmpadas. Esta carga irá criar uma resistência à rotação do eixo do gerador, através das forças eletromagnéticas no rotor dentro da carcaça do gerador. A montagem do gerador é em balanço, ou seja, a carcaça pode girar livremente, sendo o gerador fixo unicamente por 2 mancais ao seu eixo. Quando em funcionamento, a carcaça do gerador tenderá a girar junto com o eixo, tendência esta que será maior à medida que se aumenta a potência aplicada ao dinamômetro.

O princípio de medição de potência do dinamômetro de corrente contínua baseia-se na medição do torque de reação da carcaça do gerador em conjunto com a velocidade angular do sistema em teste [PLINT et al, 2007]. A medição de torque será feita indiretamente através da medição da força aplicada em uma célula de carga por um braço de alavanca conectado à carcaça do gerador. O valor da força medida multiplicada pelo comprimento do braço de alavanca fornece o torque aplicado pelo motor. A Figura 3.1 ilustra o princípio de funcionamento deste tipo de dinamômetro:

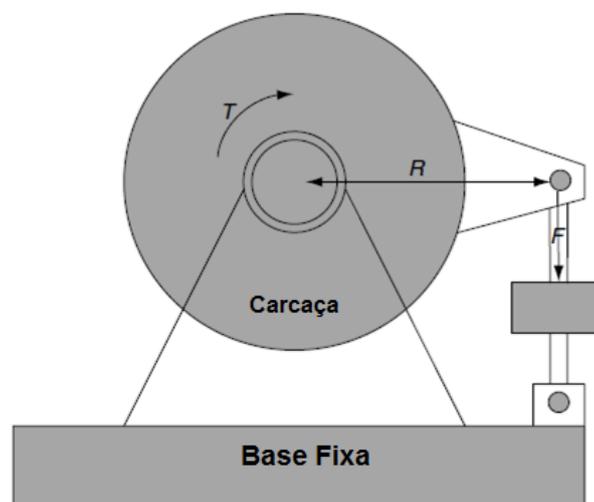


Figura 3.1 - Diagrama de funcionamento do dinamômetro [PLINT et al, 2007]

A medição da velocidade angular ou rotação dos rolos se dá pela utilização de um sensor de rotação magnético por efeito Hall, muito utilizado na indústria para este fim. Com os dados obtidos de torque e rotação, se pode chegar facilmente ao valor de potência gerada pelo motor em teste, simplesmente multiplicando-se o torque pela velocidade angular.

4. METODOLOGIA

4.1. Passos para realização do trabalho

A partir dos objetivos estabelecidos neste trabalho, são determinadas as necessidades de potência às quais o dinamômetro estará submetido, especificando-se capacidade do gerador elétrico, o tipo de carga que será utilizada (resistências elétricas ou lâmpadas) para absorver a energia introduzida pelo conjunto propulsor, capacidade da célula de carga, dimensões do braço de alavanca ligado à carcaça do gerador e tipo de sensor para medir a velocidade da roda do veículo. Com todos os parâmetros determinados, se iniciará a montagem de todos os conjuntos de sensores, sempre visando baixo custo e facilidade de obtenção, simplicidade da montagem e mantendo o dinamômetro o mais compacto possível. Por último, se submeterá o dinamômetro a testes com um motor ou bicicleta para se avaliar o correto funcionamento do sistema, podendo ser feitas alterações para melhorar ou corrigir possíveis resultados que não condizem com a realidade ou o esperado.

4.2. Definição das condições iniciais

O dinamômetro em construção será utilizado para um fim específico, o teste de motores elétricos de baixa potência, utilizados em protótipos de veículos com grande eficiência energética. Estes protótipos necessitam de motores de no máximo 100 W de potência e atingem velocidades de até 9,72 m/s (35 km/h). A tabela 4.1 contém os dados necessários para que se inicie o dimensionamento e escolha dos componentes do sistema de medição.

Tabela 4.1 – Requisitos de medição do sistema

Parâmetro	Valor
Potência	100 W
Velocidade Mínima	1,11 m/s (4 km/h)
Velocidade Máxima	9,72 m/s (35km/h)

4.3. Cálculos e dimensionamentos

Definidas as condições iniciais, parte-se para o cálculo dos valores de velocidade angular, torque, força e comprimento do braço de alavanca conectado à carcaça do gerador.

4.3.1. Velocidade angular

A velocidade angular é calculada conhecendo-se a velocidade tangencial e o raio do rolo sobre o qual a roda do veículo irá rolar. As velocidades já foram definidas na seção anterior e o raio do rolo foi medido com paquímetro, encontrando-se o valor de 0,0113 m (11,3 mm). Chega-se ao valor da velocidade angular com a equação 3.7. Sendo v com valor mínimo de 1,11 m/s (4 km/h) e máximo de 9,72 m/s (35 km/h), e r é o raio do rolo com valor de 0,0113 m (11,3 mm). A tabela 4.2 mostra os valores das velocidades angulares mínimas e máximas calculadas, em rad/s e RPM, em função das velocidades tangenciais.

Tabela 4.2 – Velocidades angulares

<i>Veloc. Tangencial</i>	<i>4 km/h</i>		<i>35 km/h</i>	
Velocidade angular	98,32 rad/s	938,97 rpm	860,37 rad/s	8215,96 rpm

4.3.2. Torque previsto

Deve-se estimar o torque que será transmitido pelo gerador para medir a força aplicada pelo braço de alavanca à célula de carga. Utiliza-se a potência do motor elétrico e a velocidade angular para calcular o torque. Com o uso da equação 3.9 obtêm-se o torque para uma potência de 100 W. A tabela 4.3 mostra os valores de torque para as velocidades angulares máxima e mínima.

Tabela 4.3 – Torque previsto

<i>Veloc. Angular</i>	<i>98,32 rad/s</i>	<i>860,37 rad/s</i>
Torque	1,017 N.m	0,116 N.m

4.3.3. Forças previstas

As forças devem ser calculadas para que se possa escolher uma célula de carga adequada à faixa de operação do dinamômetro. A força depende do torque aplicado pelo gerador e do comprimento do braço de alavanca do dinamômetro. Em uma pesquisa, foram encontradas balanças com capacidade para até 49,05 N (5 kgf). Com a capacidade da célula de carga conhecida, define-se um valor para o comprimento do braço de alavanca que reflita em forças compatíveis. Para tanto, escolheu-se trabalhar dentro da região de 1,5 N a 40 N de força. Pela equação 3.8 define-se o valor do comprimento do braço de alavanca. A tabela 4.4 mostra os valores encontrados inicialmente para comprimento do braço de alavanca para as velocidades mínimas e máximas, assim como a força aplicada em cada caso.

Tabela 4.4 – Forças e comprimentos do braço de alavanca preliminares

	<i>Braço de alavanca</i>	<i>Força</i>
Velocidade Inicial 1,11 m/s (4 km/h)	0,02543 m (25,43 mm)	40 N
Velocidade Final 27,78 m/s (35 km/h)	0,07749 m (77,49 mm)	1,5 N

Como não se pode variar o comprimento do braço de alavanca de acordo com a velocidade, definiu-se o comprimento de 0,065 m (65 mm) e calcularam-se as forças envolvidas nos dois casos extremos, de mínima e máxima velocidade. A tabela 4.5 mostra os valores corrigidos de força para um braço de alavanca de 0,065 m (65 mm), e nota-se que estes ficaram dentro dos limites propostos de 1,5 N e 40 N.

Tabela 4.5 – Forças e comprimento do braço de alavanca escolhido

	<i>Braço de alavanca</i>	<i>Força</i>
Velocidade Inicial 1,11 m/s (4 km/h)	0,065 m (65 mm)	15,65 N
Velocidade Final 27,78 m/s (35 km/h)	0,065 m (65 mm)	1,79 N

5. SELEÇÃO DE MATERIAIS

Foram estimadas no item anterior todas as forças, rotações, torques e potências a serem suportadas pelo dinamômetro em construção. Parte-se agora para a aquisição dos equipamentos e materiais necessários para a montagem da instrumentação. O Apêndice 1 contém informações a respeito da metodologia de escolha dos principais equipamentos, assim como figuras ilustrando-os.

- **Gerador:** Utilizado um motor elétrico que já estava instalado no dinamômetro, que pode ser visto na figura 1 do Apêndice 1. Tem-se na tabela 5.1 os dados disponíveis sobre este motor, sendo confirmado que o gerador atende ao requisito de potência imposto pelo veículo que se irá testar.

Tabela 5.1 – Dados do motor Imobras®

<i>Modelo</i>	<i>11.001.24</i>
Tensão	24 V
Corrente	7,9 A
Potência	213 W
Rotação	3670 RPM

- **Célula de carga:** Para medição do torque será utilizada uma balança para medir a força imposta pelo braço de alavanca conectado ao corpo do gerador. Conforme calculado previamente, necessita-se de uma célula de carga com capacidade mínima de 15,65 N. Foi adquirida uma balança com capacidade de 49,05 N (5 kgf) e com sensibilidade informada de 9,81 mN (1 gf). A figura 2 do Apêndice 1 mostra a balança adquirida. Posteriormente, esta incerteza foi confirmada através de aferições com pesos padrões em diversos pontos de seu prato de medição, a fim de verificar se a incerteza se mantém constante em qualquer ponto do prato de medição.

- **Sensor de rotação:** O sensor de rotação escolhido foi um do tipo por efeito Hall da marca Allegro® MicroSystems Inc. modelo 3144, mostrado na figura 3 do Apêndice 1. Este modelo opera em uma ampla faixa de temperaturas, é ativado por pequenos ímãs permanentes e pode ser alimentado por tensões de 4,5 V a 24 V. Ele deve ficar a distâncias de no máximo 10 mm do disco. A incerteza mínima na escala de tempo é de 2 μ s.

- **Rotor para o sensor de rotação:** O rotor foi fabricado por usinagem, a partir de um disco de 2 mm de espessura e a soldagem de dois tubos usinados na medida requerida para fixar o disco ao eixo e servir de espaçador entre o rotor e o mancal de rolamentos, conforme visto na figura 4 do Apêndice 1.

- **Banco de resistências:** Foi escolhido um banco de lâmpadas para compor a carga do dinamômetro, podendo ser visto na figura 5 do Apêndice 1. Não foi possível encontrar lâmpadas de 10 W e tensão de 24 V no mercado. Encontrou-se uma solução alternativa com os modelos disponíveis, que são de 5 W e 15 W. Foram selecionadas 5 lâmpadas de 5 W e 5 lâmpadas de 15 W, totalizando 100W a 24 V. Foram adquiridos 10 soquetes de 1 pólo para as lâmpadas de 24 V.

- **Interruptores:** Necessários para ligar e desligar as 10 lâmpadas do dinamômetro. Foram adquiridas 10 chaves interruptoras de 1 pólo e 6 A.

- **Bateria para o sensor Hall:** O sensor funciona com qualquer fonte de tensão não regulada de 4,5 V a 24 V. Foi selecionada uma bateria de 9 V tipo 6LR61, e um conector para ligá-la ao sensor Hall.

- **Braço de alavanca:** A solução adotada foi através da fixação de uma abraçadeira em volta da carcaça do gerador. Tal peça é facilmente encontrada em ferragens e é utilizada para fixação de tubos de PVC. Na ponta da abraçadeira foi fixada uma pequena chapa de aço de média espessura, para estender o braço até o comprimento que havia sido calculado previamente, podendo ser visto na figura 6 do Apêndice 1.

- **Materiais diversos:** Foram utilizados diversos materiais para a montagem, fixação, conexão, suportes e para a base e acabamento do dinamômetro, tais como chapas de madeira MDF, chapas de aço, placas de plástico, abraçadeiras, fios elétricos, parafusos, arruelas e porcas.

6. MONTAGEM DA INSTRUMENTAÇÃO

A etapa de montagem da instrumentação deu sequência ao trabalho iniciado de montagem da parte estrutural do dinamômetro, objeto de outro trabalho de diplomação [ROSSONI, 2009]. A montagem foi composta por várias etapas, tendo sido realizada conforme sequência descrita a seguir:

1. Fabricação e montagem do rotor.
2. Montagem do braço de alavanca na carcaça do gerador.
3. Montagem da base de madeira em MDF.
4. Fabricação e montagem da fixação da balança à base de madeira.
5. Recorte da placa de plástico para montagem das lâmpadas e chaves interruptoras.
6. Solda de todos os soquetes de lâmpadas às suas respectivas chaves.
7. Montagem dos soquetes de lâmpadas e das chaves nos seus suportes.
8. Fabricação e montagem do suporte para bateria de 9V.
9. Fixação do banco de lâmpadas e do console de chaves à base de madeira.
10. Montagem do sensor Hall à bateria e ao cabo para conexão ao osciloscópio.
11. Fixação do sensor Hall ao dinamômetro.

- **Fabricação e montagem do rotor:** O sensor de rotação por efeito Hall necessita de um rotor de metal para realizar as medições de rotação. O mesmo foi encomendado em uma tornearia, conforme especificação de todas as medidas necessárias. A montagem do rotor foi feita na ponta de eixo livre do gerador, por simplicidade e facilidade de montagem e desmontagem, além de permitir uma melhor disposição dos instrumentos de medição. A fixação do rotor foi feita através de dois parafusos de 3/16 polegadas Allen sem cabeça em ângulo de 90 graus entre si presos a um flange usinado do rotor.

- **Montagem do braço de alavanca:** O braço de alavanca que irá pressionar a balança para medição do torque foi montado com a fixação de uma abraçadeira de metal em torno do corpo do gerador. Esta abraçadeira é utilizada para fixação de tubos de PVC à parede de uma casa. Em uma das extremidades da abraçadeira foi fixada uma chapa de aço com um parafuso na extremidade, para transmitir a força do braço para a balança em um ângulo de aproximadamente 90 graus. Não se faz necessário garantir um ângulo reto, pois a magnitude do deslocamento deste braço de alavanca é mínimo.

- **Montagem da base de madeira:** O dinamômetro precisava de um fundo, para a fixação da balança, banco de lâmpadas e demais componentes. Como haviam disponíveis pedaços de chapas de madeira em MDF com 18 mm de espessura, optou-se por serrá-las no tamanho certo para que houvesse um encaixe perfeito. A base foi aparafusada à estrutura de metal do dinamômetro por 4 parafusos auto-atarrachantes.

- **Fabricação e montagem da fixação da balança:** Para fixar a balança ao dinamômetro dobrou-se uma chapa em formato de "S" e aparafusou-se a chapa na base de madeira com dois parafusos auto-atarrachantes.

- **Recorte da placa de plástico:** Uma placa de plástico foi recortada com serra de mão nas medidas certas para encaixar no espaço disponível ao lado da balança. Os furos redondos para o encaixe dos suportes das lâmpadas foi feito com uma furadeira e uma broca tipo pua. As chaves tipo alavanca foram encaixadas em furos redondos feitos com furadeira.

- **Solda dos soquetes das lâmpadas às chaves interruptoras:** Foram soldados todos os fios do positivo dos soquetes às suas respectivas chaves interruptoras. Na saída de todas as chaves foram ligados fios que posteriormente foram unidos e conectados a um borne, para ser ligado ao negativo do gerador. O positivo do gerador foi ligado à chapa de metal da qual foram fixados os soquetes das lâmpadas, fechando o circuito de lâmpadas ligadas em paralelo.

- **Montagem dos soquetes e das chaves nos seus suportes:** As chaves foram presas ao seu console com uso de porcas e arruelas fornecidas e os soquetes foram fixos com rebites a uma chapa de aço.

- **Fabricação e montagem do suporte da bateria de 9V:** O sensor Hall necessita de uma bateria de 9V para funcionar. A mesma foi fixada à base de plástico com uma abraçadeira fabricada com folha de flandres, pela facilidade de conformação e ser uma aplicação de baixa solicitação. Utilizaram-se dois parafusos para prender o suporte da bateria.

- **Fixação do banco de lâmpadas e do console à base de madeira:** O banco de lâmpadas já montado com todas as lâmpadas conectadas às suas respectivas chaves foi fixo à base de madeira por meio de parafusos auto-atarrachantes. O mesmo foi feito com o console de chaves interruptoras, tendo-se o cuidado de organizar os fios para que encaixassem por baixo das bases plásticas.

- **Montagem do sensor Hall:** Para conexão da bateria ao sensor foi utilizada uma chave interruptora ligada em série entre o positivo da bateria e o positivo do sensor Hall. O negativo da bateria foi ligado direto ao do sensor. E uma terceira ligação foi feita na saída de tensão do Hall para um cabo de conexão do osciloscópio.

- **Fixação do sensor Hall ao dinamômetro:** O sensor necessita ficar com sua face principal (a face com as identificações do número do modelo) voltada para o rotor com o ímã. Um ímã foi fixo com cola do tipo epóxi ao rotor, para que o sensor Hall identifique uma variação no campo magnético a cada volta completa. O sensor foi fixo ao dinamômetro com o uso de um suporte de plástico e colado a este com o uso de resina epóxi.

7. METODOLOGIA DE TESTES

Os testes se fazem necessários para a verificação do funcionamento correto da instrumentação do dinamômetro. Foram utilizadas duas metodologias para os testes. No laboratório foi utilizado um conjunto de motor/inversor de frequência da marca Voges®. Com este sistema pode-se variar a velocidade do motor, resultando em variação do torque e da rotação do mesmo. Um segundo teste foi realizado com uma bicicleta pedalada sobre os rolos do dinamômetro, medindo-se em ambos os testes a carga na balança e a rotação do sistema.

7.1 Testes com motor de velocidade variável

Foi utilizado um kit de demonstração dos inversores de frequência da marca Voges®. O kit é composto por um motor de corrente alternada assíncrono de 120 W, um inversor de frequência e um sistema de variação da velocidade do motor independente do inversor de frequência. Utilizou-se para os testes apenas este controle da velocidade, que permitia uma variação de 1200 RPM a 1800 RPM.

O motor da Voges® foi conectado ao dinamômetro com o uso de uma correia dentada, diretamente no eixo do gerador. Como não eram possíveis alterações no motor, a fim de utilizar uma roda dentada no eixo, teve-se que deixar o contato da correia com o eixo sendo unicamente por atrito. A medição de rotação foi feita com o sensor Hall conectado a um osciloscópio. Quando o ímã do rotor passa pelo sensor Hall, ele altera o campo magnético local do sensor, provocando uma alteração na saída de tensão do mesmo. Essa alteração é facilmente percebida no visor do osciloscópio, pois a tensão é alterada pelo período de tempo que o campo magnético sofre alterações. Foi utilizado um osciloscópio da marca Agilent Technologies® modelo DSO3062A para a leitura da tensão de saída do sensor Hall.

A figura 7.1 mostra como foi testado o dinamômetro com o motor Voges®. O dinamômetro precisava ser “puxado” para manter a correia tensionada e com mínimo escorregamento possível.



Figura 7.1 – Teste com o conjunto de motor e inversor de frequência Voges®

No primeiro teste realizado mediu-se a força sobre a balança para diversas combinações de lâmpadas, em ordem crescente de potência consumida, de 0 a 100 W. Foram realizados testes em duas condições, com o motor a 1200 RPM e 1800 RPM. Este teste visa a verificar se a balança está retornando medições coerentes com o incremento de potência imposto, relação esta que deve ser linear para uma rotação constante.

Um segundo teste realizado teve o objetivo de verificar a medição de rotação com o sensor Hall, e se o comportamento esperado da variação de rotação se confirmaria na prática. Este teste foi feito em três condições de carga, 0 W, 25 W e 100 W. Para todas as condições, foi medida a força na balança ao mesmo tempo da medição da rotação. A medição da rotação, ou frequência, se deu pela leitura da onda de tensão x tempo gravada na memória do osciloscópio. Como já mencionado anteriormente, a passagem do ímã pelo sensor provoca uma modificação no campo magnético local, o que acarreta em uma perturbação na tensão de saída do sensor, que pode ser vista na tela do osciloscópio, conforme a figura 7.2.

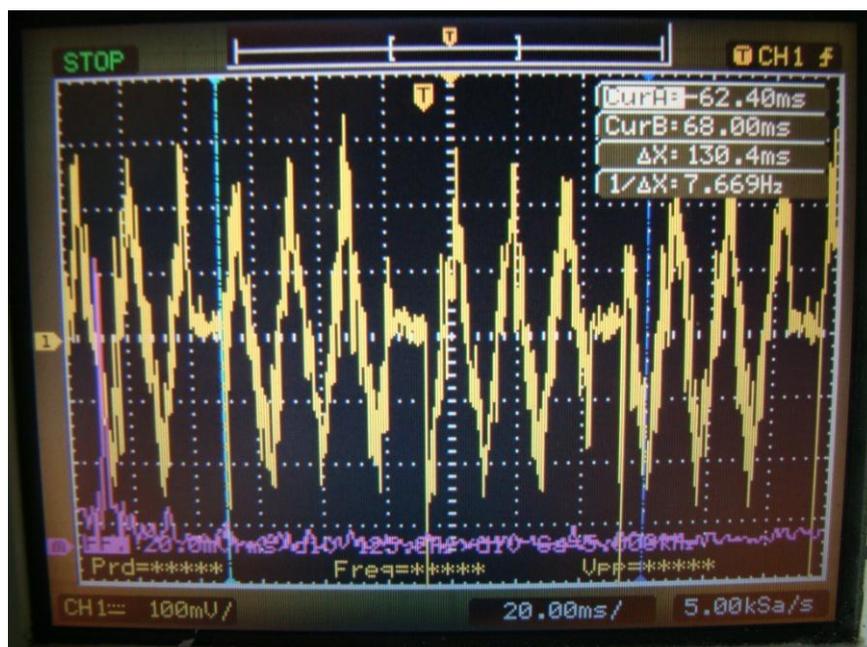


Figura 7.2 – Tela do osciloscópio mostrando as perturbações na onda senoidal de tensão

Na tela do osciloscópio existe um padrão cicloidal de tensão e em determinados instantes a tensão assume um valor constante próximo do zero. O tempo necessário para uma volta completa do rotor é representado na tela do osciloscópio como o período entre duas perturbações da onda. O equipamento possui o recurso de medir o ΔX entre dois pontos, ou seja, sabe-se o tempo ou período que o rotor levou para completar uma volta.

7.2 Testes com bicicleta

Em vista do problema de escorregamento da correia encontrado no teste com o motor, procedeu-se um segundo teste com uma bicicleta sendo pedalada sobre os rolos do dinamômetro. Com o escorregamento, não foi possível medir potências condizentes com um sistema real, pois as mesmas foram muito baixas. Portanto um dos objetivos deste teste é a avaliação da capacidade do dinamômetro em medir as potências requeridas pelo motor do protótipo que irá ser testado (100 W).

A bicicleta utilizada sofreu duas modificações para a realização do teste. A primeira foi a substituição do pneu traseiro de garras por um liso e com perfil mais estreito, com o objetivo de reduzir os atritos de rolamento. A segunda alteração foi a instalação do sensor do ciclocomputador na roda traseira, para a aferição da velocidade na roda que irá ser tracionada. Foram feitas as devidas alterações na configuração do ciclocomputador em função da alteração do diâmetro do pneu, menor no caso do pneu liso. A metodologia utilizada foi a mesma do segundo teste com o motor Voges®, ou seja, mediu-se a força e rotação nas cargas de 0 W, 25 W e 100 W. Foram realizados dois testes com diferentes relações de transmissão, o primeiro em uma marcha média (relação de 44 x 16 dentes nas coroas dianteiras e traseiras respectivamente) e o segundo na marcha mais longa (relação de 44 x 11 dentes).

8. ANÁLISE DE INCERTEZAS

Como qualquer trabalho experimental, deve-se estimar as incertezas das medições realizadas para verificar a incerteza do sistema como um todo. Para tanto se devem considerar as incertezas individuais de todas as medidas feitas e a partir delas calcular a propagação de incertezas. Todos os instrumentos utilizados tiveram as suas incertezas tomadas de seus manuais de instrução, e para o caso da balança, esta foi confirmada com um teste de incerteza com pesos padrões.

8.1 Incerteza da balança

Foi verificada a incerteza da balança com um conjunto de seis pesos padronizados. Estes pesos foram calibrados com o uso de uma balança com 0,196 mN (0,02 gf) de incerteza. O manual de instruções da balança utilizada informa uma sensibilidade de 9,81 mN, portanto este valor foi tomado como meta para os testes realizados com os pesos padrões. Outra motivação dos testes foi para avaliar se a localização do ponto de aplicação da força no prato da balança tem alguma influência no valor retornado, ou seja, ao se aplicar a força no centro do prato se tem o mesmo valor caso a força seja aplicada nas bordas. Foram realizadas quatro medições com cada peso padronizado, em cinco posições distintas do prato, no centro e nas bordas, em quatro posições diametralmente opostas em forma de cruz. Os pesos utilizados têm 1,04 N, 1,53 N, 1,54 N, 1,99 N, 2,02 N e 2,59 N. A cada troca de peso a balança era desligada e religada novamente, a fim de evitar qualquer erro por conta de sua calibração interna. Conforme especificado pelo fabricante, obteve-se em todas as medições realizadas uma incerteza de medição máxima de 9,81 mN para mais ou para menos em relação ao peso padrão. Portanto a incerteza da balança foi confirmada e pode-se continuar com as medições assim como que a posição de aplicação da força não provoca alteração na leitura da balança.

8.2 Incerteza dos instrumentos de medição

A medição de potência no dinamômetro não é direta, mas sim através de medições secundárias que com os devidos cálculos podem ser utilizadas para medição da potência. As medições realizadas diretamente por instrumentos com o dinamômetro são a velocidade angular e a força aplicada na balança pelo braço de alavanca. Com estes valores medidos pelos instrumentos, podem-se calcular o torque e finalmente a potência.

Primeiramente obtêm-se as incertezas dos instrumentos utilizados para as medições. Utilizaram-se um paquímetro para medição do comprimento do braço de alavanca, a balança para medição da força, um ciclocomputador e o sensor Hall conectado ao osciloscópio.

A incerteza da balança já foi confirmada conforme metodologia descrita no subitem anterior e tem o valor de 9,81 mN (1 gf). A incerteza do sensor Hall quanto ao tempo de resposta é garantida como menor que 2 μ s de acordo com o manual do equipamento. Como este sensor foi ligado a um osciloscópio deve-se conhecer a incerteza deste equipamento. Conforme as especificações técnicas constantes do guia do usuário do osciloscópio Agilent DS030602A a incerteza do equipamento é de 1 ms. Portanto como a incerteza do osciloscópio é maior que a do sensor Hall, utilizar-se-á para os cálculos a maior incerteza, ou seja, 1 ms. O ciclocomputador utilizado nos testes com bicicleta, da marca Sigma Sport modelo Targa, possui incerteza de 0,28 m/s (1 km/h), conforme o manual de utilização. Por último, para determinação do comprimento do braço de alavanca e do diâmetro dos rolos utilizou-se um paquímetro de 200 mm da marca Mitutoyo. Conforme manual do equipamento, a incerteza é dada conforme norma JIS B7505. De acordo com a norma japonesa, para um paquímetro de 200 mm de fundo de escala e resolução de 0,05 mm tem-se uma incerteza de 0,05 mm. As incertezas dos instrumentos são resumidas a seguir:

$$\begin{aligned}\Delta F &= 1 \text{ gf} = 9,81 \text{ mN} \\ \Delta t &= 1 \text{ ms} \\ \Delta v &= 1 \text{ km/h} = 0,27778 \text{ m/s} \\ \Delta d &= 0,05 \text{ mm}\end{aligned}$$

Finalmente podem-se calcular as incertezas de medição através da utilização da equação generalizada para a propagação de incertezas [TAYLOR, 1997]:

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z} \Delta z\right)^2} \quad (8.5)$$

Onde Δq é a incerteza para um certo valor q com variáveis de x a z .

Aplicando-se a equação generalizada pode-se chegar aos valores das incertezas para velocidade angular, torque e potência com as seguintes equações:

$$\Delta \omega = \sqrt{\left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \Delta t\right)^2} = \sqrt{\left(-2\pi \frac{1}{t^2} \Delta t\right)^2} = 2\pi \frac{1}{t^2} \Delta t = \frac{6,2832 \cdot 10^{-3}}{t^2} \quad (8.6)$$

Onde $\Delta \omega$ é a incerteza de medição da velocidade angular em rad/s e a equação neste formato é utilizada para os testes com o osciloscópio.

$$\Delta \omega = \sqrt{\left(\frac{\partial \omega}{\partial v} \Delta v\right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} \Delta r\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{r} \Delta v\right)^2 + \left(-\frac{v}{r^2} \Delta r\right)^2} \quad (8.7)$$

Onde $\Delta \omega$ é a incerteza de medição da velocidade angular em rad/s e a equação neste formato é utilizada para os testes com bicicleta.

$$\Delta T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial F} \Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial d} \Delta d\right)^2} = \sqrt{(d \Delta F)^2 + (F \Delta d)^2} \quad (8.8)$$

$$\Delta P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \omega} \Delta \omega\right)^2} = \sqrt{(\omega \Delta T)^2 + (T \Delta \omega)^2} \quad (8.9)$$

Onde ΔT e ΔP são respectivamente as incertezas de medição para o torque em N.m e para a potência em W. Chegou-se a estas equações utilizando a equação 8.5 e derivando as equações de 8.1 a 8.4. Estas equações serão utilizadas para os cálculos das incertezas das medições e serão incluídas nos resultados mais adiante.

9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Convém mencionar que foram calculadas as incertezas das medições de força, velocidade angular e potência, mais detalhes a respeito podem ser observados no Apêndice 2.

9.1. Testes com motor de velocidade variável

Os valores de força e torque medidos com a balança para as rotações de 125,66 rad/s (1200 RPM) e 188,49 rad/s (1800 RPM) são mostrados nas tabelas 9.1 e 9.2 respectivamente.

Tabela 9.1 – Motor a 125,66 rad/s

Potência das Lâmpadas (W)	Força (N)	Torque (N.m)
0	0,186	0,0121
5	0,245	0,0159
10	0,284	0,0184
15	0,334	0,0216
20	0,392	0,0255
25	0,441	0,0286
40	0,569	0,0369
55	0,726	0,0471
70	0,863	0,0561
85	1,020	0,0663
100	1,177	0,0765

Tabela 9.2 – Motor a 188,49 rad/s

Potência das Lâmpadas (W)	Força (N)	Torque (N.m)
0	0,235	0,0153
5	0,304	0,0197
10	0,353	0,0229
15	0,441	0,0286
20	0,491	0,0318
25	0,559	0,0363
40	0,755	0,0490
55	0,932	0,0605
70	1,079	0,0701
85	1,226	0,0797
100	1,364	0,0886

Pode-se notar que existe um incremento proporcional da força à medida que se aplica mais carga ao gerador. Em forma de gráfico é possível visualizar melhor o resultado do teste. Nas figuras 9.1 e 9.2 têm-se os gráficos potência x torque para as rotações de 125,66 rad/s (1200 RPM) e 188,49 rad/s (1800 RPM) no motor.

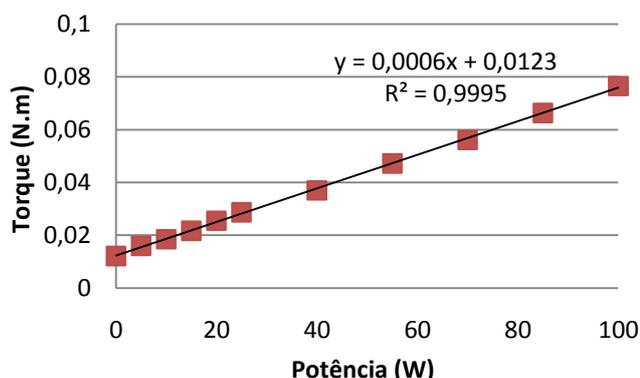


Figura 9.1 – Gráfico de potência x torque com o motor a 125,66 rad/s

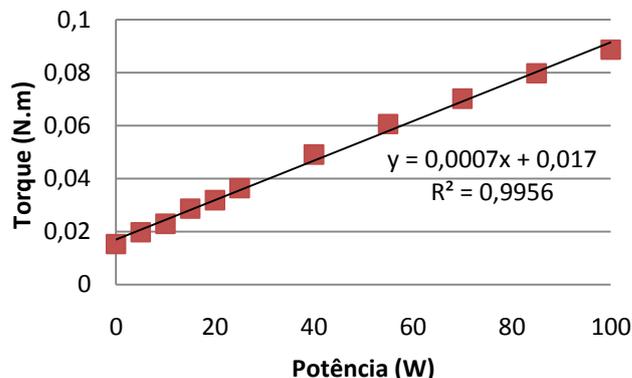


Figura 9.2 – Gráfico de potência x torque com o motor a 188,49 rad/s

Pela análise dos gráficos percebe-se que o conjunto de pontos segue praticamente sobre a linha de tendência linear, ou seja, para um dado incremento de potência tem-se um aumento na força, incremento este que é proporcional à potência. Vê-se que nos dois casos tem-se resultados parecidos, sendo que na velocidade angular de 188,49 rad/s pode-se notar uma pequena fuga de alguns pontos à medida que se foi aumentando a carga no dinamômetro. Isto é explicado pelo fato de à medida que se foi aumentando a carga, o escorregamento da correia aumentava, prejudicando a leitura da força, pois esta oscilava muito.

Um segundo teste foi realizado em menos situações de carga (0 W, 25 W e 100 W) com o intuito de medir a rotação do sistema com o sensor Hall. Nas tabelas 9.3 e 9.4 são mostrados os valores de força, torque, período, frequência e potência para as situações em que o motor estava a 125,66 rad/s (1200 RPM) e 188,49 rad/s (1800 RPM), respectivamente.

Tabela 9.3 – Valores medidos para rotação de 125,66 rad/s no motor

<i>Potência das Lâmpadas (W)</i>	<i>Força (N)</i>	<i>Torque (N.m)</i>	<i>T (ms)</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>RPM</i>	<i>ω (rad/s)</i>	<i>Potência (W)</i>
0	0,196	0,013	107	9,35	560,75	58,72	0,749 ± 1,06%
25	0,432	0,028	110	9,09	545,46	57,12	1,603 ± 0,94%
100	1,128	0,073	134	7,46	447,76	46,89	3,438 ± 0,75%

Tabela 9.4 – Valores medidos para rotação de 188,49 rad/s no motor

<i>Potência das Lâmpadas (W)</i>	<i>Força (N)</i>	<i>Torque (N.m)</i>	<i>T (ms)</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>RPM</i>	<i>ω (rad/s)</i>	<i>Potência (W)</i>
0	0,226	0,015	61	16,39	983,61	103,00	1,511 ± 1,69%
25	0,549	0,036	63	15,87	952,38	99,73	3,561 ± 1,59%
100	1,432	0,093	68	14,71	882,35	92,40	8,602 ± 1,47%

Pela análise das tabelas podem ser inferidas algumas conclusões. Primeiro, o incremento da carga está refletindo em um aumento no torque fornecido pelo motor acompanhado de uma sensível diminuição na rotação. Segundo, o problema do escorregamento das correias está evidente aqui, pois se percebe que a potência medida pelo dinamômetro está muito abaixo da disponibilizada pelo motor (120 W). Mesmo para pequenas cargas, a correia não conseguiu transmitir a potência eficientemente, pois estava muito deformada e com grande escorregamento no lado do eixo do motor. Mesmo com este problema, este segundo teste não perde o valor, pois como se pode perceber, tem-se um comportamento dentro do esperado, com a rotação caindo à medida que se aumenta a carga no gerador. Outro ponto importante foi que se pôde verificar a repetibilidade das medições feitas. Para os valores medidos na segunda medição (tabelas 9.3 e 9.4), temos valores quase idênticos de força quando comparados aos encontrados na primeira medição (tabelas 9.1 e 9.2). A diferença entre as duas medições só foi maior que 9,81 mN (1gf) no caso de 188,49 rad/s (1800 RPM) com 100 W de carga. Havia muito escorregamento neste momento, causando grandes oscilações na medição de força. Em todos os outros casos, a diferença na leitura foi de no máximo 9,81 mN (1gf), o que está dentro da incerteza da balança utilizada, podendo-se considerar repetição de medidas.

9.2. Testes com bicicleta

Procurou-se neste teste avaliar se o dinamômetro suporta potências iguais ou até superiores a 100 W. Pôde-se medir o torque, as rotações e a potência do ciclista. As tabelas 9.5 e 9.6 mostram os resultados encontrados para os testes em marcha média e marcha longa respectivamente.

Tabela 9.5 – Resultados do teste em marcha média

<i>Potência das Lâmpadas (W)</i>	<i>Força (N)</i>	<i>Torque (N.m)</i>	<i>v (km/h)</i>	<i>v(m/s)</i>	<i>RPM</i>	<i>ω (rad/s)</i>	<i>Potência (W)</i>
0	0,343	0,0223	27	7,50	6338,03	663,72	14,812 ± 3,74%
25	1,403	0,0911	28	7,78	6572,77	688,30	62,761 ± 3,60%
100	3,561	0,2310	28	7,78	6572,77	688,30	159,318 ± 3,60%

Tabela 9.6 – Resultados do teste em marcha longa

<i>Potência das Lâmpadas (W)</i>	<i>Força (N)</i>	<i>Torque (N.m)</i>	<i>v(km/h)</i>	<i>v(m/s)</i>	<i>RPM</i>	<i>ω (rad/s)</i>	<i>Potência (W)</i>
0	1,050	0,0682	35	9,72	8215,96	860,37	58,702 ± 2,89%
25	1,903	0,1230	34	9,44	7981,22	835,79	103,39 ± 2,98%
100	3,581	0,2320	29	8,06	6807,51	712,88	165,91 ± 3,48%

Pela análise dos resultados dos testes com a bicicleta, chegou-se a valores de velocidade e potência mais condizentes com o esperado e com a teoria desenvolvida ao longo do trabalho. À medida que se aumentou a carga no gerador, teve-se um aumento no torque transmitido ao gerador. No segundo teste, realizado na marcha mais longa da transmissão, vê-se claramente que o aumento na carga no gerador é seguido por uma conseqüente queda na velocidade da roda da bicicleta. Isto ficou evidente neste teste, pois o ciclista estava pedalando no seu limite desde o início do teste, ou seja, para cada incremento na carga havia uma queda no ritmo de pedalada. Chegou-se também a valores de potência mais realísticos, visto que é possível observar que o ciclista chegou quase ao seu limite no último teste com carga total, atingindo uma potência de 165 W. Portanto o objetivo do teste com bicicleta foi atingido, provando-se que o dinamômetro pode medir potências de até 165 W e teoricamente podendo chegar a 213 W, o que pode ser objeto de outro teste, porém para este trabalho, a possibilidade de se atingir este limite não é pertinente haja visto que a necessidade de absorção para este dinamômetro é de apenas 100 W.

10. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho de construir a instrumentação de um dinamômetro de rolos de forma simples e acessível foi realizado satisfatoriamente. A capacidade de realizar medições em um veículo com 100 W de potência foi confirmada através de testes, que provaram uma capacidade de 165 W.

Em todas as medições realizadas neste trabalho foram avaliadas as incertezas inerentes aos diversos processos utilizados para medição. Constatou-se que a máxima incerteza na medição de potência foi de 1,698% para o teste com o motor e osciloscópio (desconsiderando-se o problema de escorregamento da correia) e de 3,74% no teste com a bicicleta. Portanto, obtiveram-se valores de incerteza que podem ser considerados baixos e que levam a concluir que os equipamentos utilizados na montagem do dinamômetro estão atendendo bem às necessidades de medição do sistema.

Conclui-se que o trabalho atingiu as metas de dimensionar, especificar, construir e testar a instrumentação de um dinamômetro de rolos portátil.

Sugestões para trabalhos futuros

- Continuar a montagem implementando uma interface de leitura do sensor Hall e da célula de carga por um computador, para automatizar o processo de aquisição de dados;
- Testar com um motor ou outro meio que permita um acoplamento sem escorregamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial), “**Estudo prospectivo setorial – Automotivo**”, <http://www.abdi.com.br>, acessado em 25/04/2010.

Meriam, J.L.; Kraige, L.G.; “**Mecânica: dinâmica**”, LTC, 5ª edição, 2004

Plint, M, A.; Martyr, A.J.; “**Engine Testing Theory and Practice**”, Butterworth-Heinemann, 3ª edição, 2007.

Rossoni, V.C; “**Dinamômetro de Rolos Portátil**”, Trabalho de Conclusão de Curso. (Engenharia Mecânica) - Universidade Luterana do Brasil. Orientador: Laranja, R.A.C., 2009.

Shell, “**Shell Eco-marathon**”, <http://www.shell.com/home/content/ecomarathon/>, acessado em 23/04/2010.

Sirohi, R.S.; Radha Krishna H.C.; “**Mechanical measurements**”, John Willey & Sons, 3ª edição, 1993.

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

Tesla Motors, “**Performance specs**”, http://www.teslamotors.com/performance/perf_specs.php, acessado em 05/06/2010.

Apêndice 1

Metodologia e comentários sobre a escolha dos materiais utilizados na montagem do dinamômetro:

Gerador:

As únicas informações disponíveis no corpo do motor são a marca, tensão nominal e data de fabricação. Para confirmar a potência que este motor suporta, enviou-se um e-mail para a fabricante Imobras® de Caxias do Sul – RS, para que fosse identificado o modelo deste motor. Sabia-se apenas que este motor é parte de um conjunto de eletroventiladores radiais com dupla ventoinha, utilizado em sistemas de refrigeração de caminhões frigoríficos. Conforme resposta da Imobras, foi possível identificar que o motor disponível é o modelo 11.001, o que foi confirmado posteriormente através das medidas de comprimento e diâmetro da carcaça do mesmo, mostrado na figura 1, que diferem dos demais modelos de motores comercializados pela empresa.

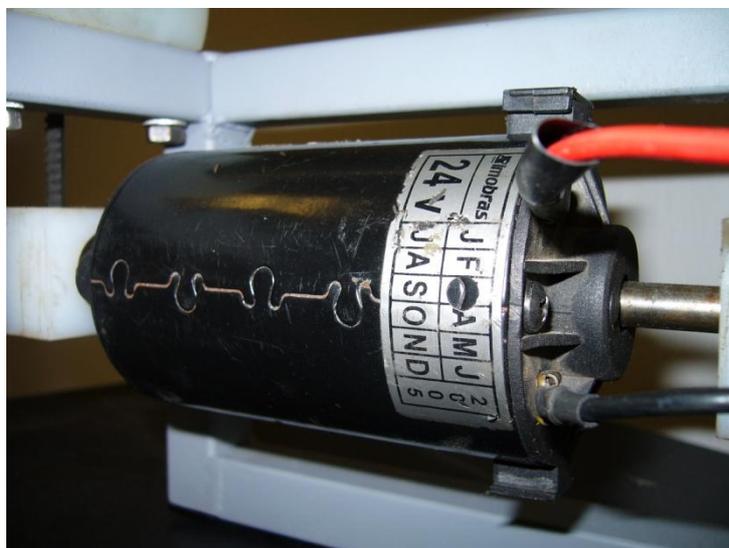


Figura 1 – Placa de identificação do motor disponível

Em um teste preliminar de funcionamento do motor, foi constatado que este não estava dando partida, quando ligado a uma bateria de automóvel de 12 V. Com um multímetro, foi medido um valor de resistência infinito entre os conectores do motor, significando que havia alguma ligação interna interrompida. Percebeu-se que estava faltando uma tampa e uma mola que mantém o contato de uma das escovas ao comutador do motor, fato que impossibilitava a passagem de corrente para os enrolamentos do rotor. O problema foi contornado com a adaptação de uma mola e uma tampa fabricados artesanalmente.

Uma última observação sobre os requisitos impostos pelo tipo de montagem do gerador. O princípio de funcionamento do dinamômetro de absorção elétrico por gerador de corrente contínua exige que o motor esteja fixado pelo seu eixo em mancais de rolamento, para que seu corpo possa rotacionar livremente e transmitir o torque imposto para ser medido pela célula de carga. Portanto, o motor deve ter um eixo com saída para ambos os lados, para que possa ser apoiado nos dois mancais.

Célula de carga:

Após uma pesquisa de mercado, optou-se pela utilização de uma balança doméstica eletrônica para pesagem de alimentos. Esta escolha foi motivada pelo fato de não ser necessária a montagem e calibragem de uma ponte de Wheatstone para a leitura dos extensômetros de resistência elétrica, a ligação da ponte a um conversor A/D e este a um

microcomputador para leitura dos valores de força. As balanças disponíveis no mercado estão prontas para serem utilizadas, pois possuem um visor digital que informa a força que está sendo aplicada. Por último, mas não menos importante, a aquisição de uma célula de carga, em conjunto com pontes de Wheatstone e conversores A/D, demandariam recursos financeiros que fugiriam do propósito inicial do projeto, que é o baixo custo alinhado à simplicidade de funcionamento e montagem. A figura 2 mostra a balança adquirida tendo sua incerteza testada com pesos padronizados:



Figura 2 – Balança em teste de incerteza de medição

Sensor de rotação:

A fim de verificar a potência do motor, em conjunto com a medida de torque, necessita-se saber a rotação do gerador. Dentre os tipos de sensores de rotação, óticos e magnéticos, optou-se pelo sensor por efeito Hall, figura 3. Sensores de rotação por efeito Hall funcionam como transdutores que variam a tensão de saída em resposta a uma variação do campo magnético local. A medição de rotação se dá pela instalação de um disco de aço que terá um pequeno ímã fixo na extremidade. Quando o ímã passa pelo sensor Hall, haverá uma variação no campo magnético, o que acarretará em uma variação na tensão de saída do sensor. Sabendo-se o período entre 2 variações de tensão, tem-se a frequência de rotação do gerador.

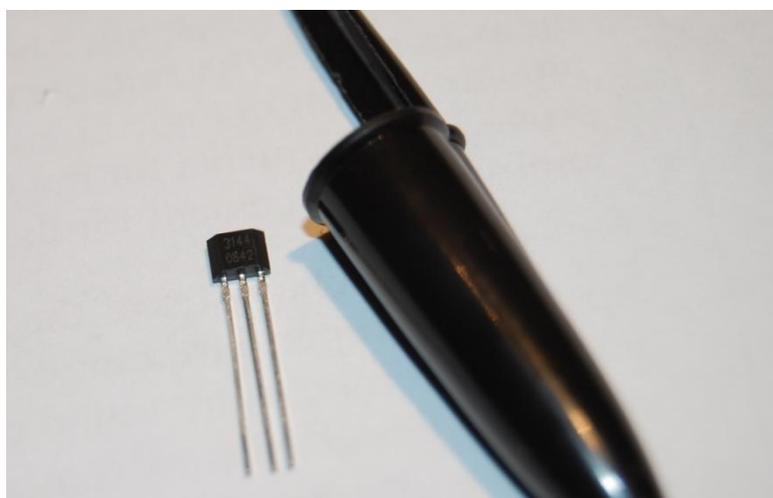


Figura 3 – Sensor Hall utilizado para medição de rotação

Rotor para o sensor de rotação:

O sensor de rotação por efeito Hall necessita de um rotor com um ímã permanente fixo em um ponto, para que ocorra a mudança de campo magnético a cada volta completa do rotor. O rotor é fixo na ponta livre do eixo do gerador, por facilidade de montagem do sensor hall e do próprio rotor ao eixo. Tem-se uma relação de transmissão de 1:1 entre os rolos do dinamômetro e o eixo do gerador, portanto a velocidade angular medida pelo sensor hall será igual à da roda do veículo em teste. A figura 4 mostra a montagem final do rotor já com o sensor Hall instalado.



Figura 4 – Rotor montado no dinamômetro

Banco de resistências:

Para o funcionamento do dinamômetro, faz-se necessária a conexão à saída do gerador de um banco de resistências variáveis. Precisa-se variar a resistência para aumentar ou diminuir a carga, a fim de traçar a curva potência x rotação do motor. Basicamente têm-se três opções para consumir a energia gerada. A primeira alternativa considerada foi a de um banco de lâmpadas ligadas em paralelo. Deste modo podem-se ligar individualmente cada lâmpada, em qualquer composição, para incrementar a carga sobre o gerador. Para escalonar melhor, definiu-se um número ideal de 10 lâmpadas de 10 W cada, totalizando 100 W. O banco de lâmpadas instalado no dinamômetro é mostrado na figura 5:



Figura 5 – Banco de lâmpadas instalado no dinamômetro

Outra alternativa seria a utilização de resistores de fio no lugar das lâmpadas, por apresentarem durabilidade muito superior. No entanto, os resistores de fio não podem trabalhar com tensões variáveis, que é o caso do dinamômetro durante o funcionamento. A última alternativa foi a utilização de uma resistência variável. Um reostato seria o equipamento ideal, porém tem-se requisitos muito específicos de tensão e resistências mínimas e máximas, o que acarretaria na necessidade de encomendar um reostato feito sob-medida. Este fato impossibilitou sua utilização, pois demandaria muito dinheiro e tempo para que ficasse pronto.

Braço de alavanca:

O torque gerado no corpo do gerador é medido através da ação de um braço de alavanca na célula de carga. Avaliaram-se algumas formas de fixação à carcaça do gerador. A primeira alternativa levada em consideração foi através da fixação de uma barra de aço parafusada à carcaça do gerador. Esta solução foi logo abandonada por necessitar de alterações no corpo do gerador, podendo causar avarias irreversíveis ao mesmo. Escolheu-se uma abraçadeira de metal com uma chapa de metal afixada na ponta, conforme mostrado na figura 6:

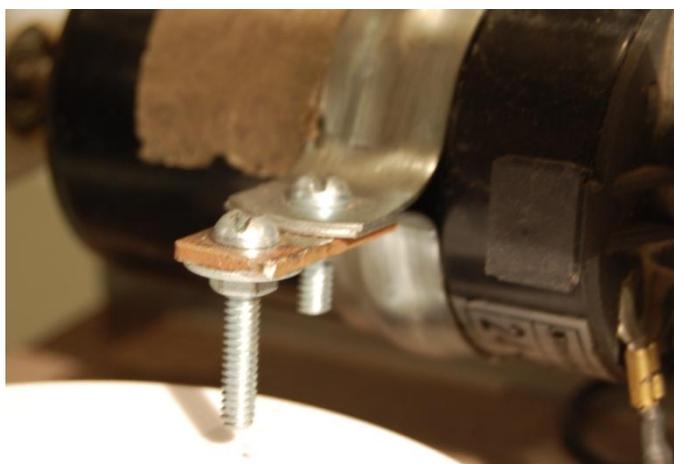


Figura 6 – Braço de alavanca instalado no corpo do gerador

Apêndice 2

A análise de incertezas dos experimentos realizados neste trabalho foi calculada seguindo a metodologia de propagação de incertezas mostrada no capítulo 8. Os valores detalhados das incertezas nas medições de força, velocidade angular e potência para cada um dos experimentos realizados são mostrados nas tabelas a seguir:

Tabela 1 - Teste de medição de força e torque com motor a 1200 rpm

Potência Lâmpadas (W)	Força (kgf)	Incerteza F (kgf)	Incerteza F	Torque (N.m)	Incerteza Torque (N.m)	Incerteza Torque
0	0,019	0,001	5,26%	0,0121	6,501E-05	0,54%
5	0,025	0,001	4,00%	0,0159	6,501E-05	0,41%
10	0,029	0,001	3,45%	0,0185	6,502E-05	0,35%
15	0,034	0,001	2,94%	0,0217	6,502E-05	0,30%
20	0,04	0,001	2,50%	0,0255	6,503E-05	0,25%
25	0,045	0,001	2,22%	0,0287	6,504E-05	0,23%
40	0,058	0,001	1,72%	0,0370	6,506E-05	0,18%
55	0,074	0,001	1,35%	0,0472	6,511E-05	0,14%
70	0,088	0,001	1,14%	0,0561	6,515E-05	0,12%
85	0,104	0,001	0,96%	0,0663	6,521E-05	0,10%
100	0,12	0,001	0,83%	0,0765	6,528E-05	0,09%

Tabela 2 - Teste de medição de força e torque com motor a 1800 rpm

Potência Lâmpadas (W)	Força (kgf)	Incerteza F (kgf)	Incerteza F	Torque (N.m)	Incerteza Torque (N.m)	Incerteza Torque
0	0,024	0,001	4,17%	0,0153	6,501E-05	0,425%
5	0,031	0,001	3,23%	0,0198	6,502E-05	0,329%
10	0,036	0,001	2,78%	0,0230	6,502E-05	0,283%
15	0,045	0,001	2,22%	0,0287	6,504E-05	0,227%
20	0,05	0,001	2,00%	0,0319	6,505E-05	0,204%
25	0,057	0,001	1,75%	0,0363	6,506E-05	0,179%
40	0,077	0,001	1,30%	0,0491	6,511E-05	0,133%
55	0,095	0,001	1,05%	0,0606	6,517E-05	0,108%
70	0,11	0,001	0,91%	0,0701	6,523E-05	0,093%
85	0,125	0,001	0,80%	0,0797	6,530E-05	0,082%
100	0,139	0,001	0,72%	0,0886	6,537E-05	0,074%

Tabela 3 - Teste com motor a 1200 rpm

Potência Lâmpadas (W)	Força (kgf)	Incerteza F (kgf)	Incerteza F	Torque (N.m)	Incerteza Torque (N.m)	Incerteza Torque	ω (rad/s)	Incerteza ω (rad/s)	Incerteza ω	Potência (W)	Incerteza Potência (W)	Incerteza Potência
0	0,020	0,001	5%	0,013	6,501E-05	0,51%	58,721	0,549	0,93%	0,749	0,008	1,06%
25	0,044	0,001	2%	0,028	6,504E-05	0,23%	57,120	0,519	0,91%	1,603	0,015	0,94%
100	0,115	0,001	1%	0,073	6,525E-05	0,09%	46,889	0,350	0,75%	3,438	0,026	0,75%

Tabela 4 – Teste com motor a 1800 rpm

Potencia Lampadas (W)	Força (kgf)	Incerteza F (kgf)	Incerteza F	Torque (N.m)	Incerteza Torque (N.m)	Incerteza Torque	ω (rad/s)	Incerteza ω (rad/s)	Incerteza ω	Potência (W)	Incerteza Potência (W)	Incerteza Potência
0	0,023	0,001	4%	0,015	6,501E-05	0,44%	103,003	1,689	1,64%	1,511	0,026	1,698%
25	0,056	0,001	2%	0,036	6,506E-05	0,18%	99,733	1,583	1,59%	3,561	0,057	1,598%
100	0,146	0,001	1%	0,093	6,541E-05	0,07%	92,400	1,359	1,47%	8,602	0,127	1,472%

Tabela 5 – Teste com bicicleta com relação de marcha média

Potencia Lampadas (W)	Força (kgf)	Incerteza F (kgf)	Incerteza F	Torque (N.m)	Incerteza Torque (N.m)	Incerteza Torque	ω (rad/s)	Incerteza ω (rad/s)	Incerteza ω	Potência (W)	Incerteza Potência (W)	Incerteza Potência
0	0,035	0,001	2,86%	0,022	6,502E-05	0,29%	663,717	24,757	3,73%	14,813	0,554	3,74%
25	0,143	0,001	0,70%	0,091	6,539E-05	0,07%	688,299	24,770	3,60%	62,762	2,259	3,60%
100	0,363	0,001	0,28%	0,232	6,749E-05	0,03%	688,299	24,770	3,60%	159,318	5,734	3,60%

Tabela 6 – Teste com bicicleta com relação de marcha longa

Potência Lâmpadas (W)	Força (kgf)	Incerteza F (kgf)	Incerteza F	Torque (N.m)	Incerteza Torque (N.m)	Incerteza Torque	ω (rad/s)	Incerteza ω (rad/s)	Incerteza ω	Potência (W)	Incerteza Potência (W)	Incerteza Potência
0	0,107	0,001	0,93%	0,068	6,522E-05	0,10%	860,374	24,875	2,89%	58,702	1,698	2,89%
25	0,194	0,001	0,52%	0,124	6,572E-05	0,05%	835,792	24,859	2,97%	103,391	3,076	2,97%
100	0,365	0,001	0,27%	0,233	6,751E-05	0,03%	712,881	24,784	3,48%	165,918	5,768	3,48%