



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



GERSON FIGUEIRÓ DA SILVA

DINAMÔMETRO EMBARCADO

Canoas, Dezembro de 2008



GERSON FIGUEIRÓ DA SILVA

Dinamômetro embarcado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Departamento:

Engenharia Elétrica

Área de Concentração

Instrumentação

Professor Orientador:

Dr. Eng. Eletr. Valner João Brusamarello – CREA-RS: 78.158-D

Canoas

2008



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome do Autor: Gerson Figueiró da Silva

Matrícula: 031008258-7

Título: Dinamômetro embarcado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador:

Dr. Eng. Eletr. Valner João Brusamarello

CREA-RS: 78.158-D

Banca Avaliadora:

Dr. Eng. Eletr. Marília Amaral Silveira

CREA-RS: 050909-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Dr. Eng. Eletr. Adriane Parraga

CREA-RS: 107196-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Assinaturas:

Autor

Gerson Figueiró da Silva

Orientador

Valner João Brusamarello

Marília Amaral Silveira

Adriane Parraga

Relatório Aprovado em:



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que sempre acreditaram em meu potencial e fizeram sacrifícios constantes para que fosse possível sua realização e de tantas outras coisas.



AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao Professor Valner pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado na realização deste trabalho. Aos professores Dalton, Augusto e Godoy por sempre se predispor a auxiliar um aluno quando necessário.

Aos vários colegas que passaram pela engenharia por suas sugestões e observações valiosas, além de trabalhos realizados em conjunto.



EPÍGRAFE

*Até a pé nós iremos
Para o que der e vier
Mas o certo é que nós estaremos
Com o Grêmio onde o Grêmio estiver*

Lupicínio Rodrigues



RESUMO

Silva, Gerson Figueiró da. **Dinamômetro embarcado**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2008

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema para a medição e transmissão de torque diretamente na roda de um veículo automotivo. A célula de carga foi implementada na própria roda, na qual foram executados os cálculos de tensões mecânicas, bem como a usinagem específica. O circuito condicionador de sinais juntamente com o transmissor sem fios foi adaptado no centro da roda. O sinal é amostrado e enviado utilizando um módulo sem fios com protocolo Zigbee, a um outro módulo conectado a um computador onde existe um programa em LabView sendo executado. Os dados recebidos são mostrados na forma de gráfico e salvos em disco. O sistema mostrou-se linear ao aumento do torque, dentro da faixa testada. Não ocorreram perdas de pacotes em condições estáticas.

Palavras chave: Zigbee. Sem-fio. dinamômetro. torque. Célula de carga.



ABSTRACT

Silva, Gerson Figueiró da. **Embedded Dinamometer** XX p. Final Paper in Electrical Engineering - Electrical Engineering Department. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2008.

In this work, it has been developed a system for the measurement and transmission of the torque directly in the wheel of an automobile. The load cell was implemented in the proper wheel, in which the calculations of mechanical tensions had been executed, as well as its specific turning. The conditioning circuit of signals along with the wireless transmitter was adapted in the center of the wheel. The signal is acquired and transmitted using a wireless module with Zigbee protocol, to another module hardwired to a computer where a LabView program is being executed. The received data is shown in the form of graph and saved in disc. The system showed to be linear to the torque variation, according to the tested values. No packet loss occurred in static conditions.

Keywords: Zigbee. Wireless. dynamometer. torque. Load cell



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Dinamômetro de força [fonte: www.ruadireita.com]	5
Figura 2.2 – Dinamômetro do tipo freio de Prony. [fonte: www.joseclaudio.eng.br]	6
Figura 2.3 – Roda de liga leve desenvolvida.	7
Figura 2.4 – Efeitos da aplicação de forças no extensômetro. (Fonte: Notas de Aula – Augusto Mattos)	8
Figura 2.5 – Curva da resistência relativa da liga de Constantan (Fonte: Notas de aula – Augusto Mattos)	9
Figura 2.6 – Ponte de Wheatstone	10
Figura 2.7 – Módulo Xbee (Fonte: Manual XBee)	11
Figura 2.8 – Rede Zigbee (Fonte: Manual XBee)	12
Figura 2.9 – Carro sobre dinamômetro de rolos (Fonte: Esther Turbo)	13
Figura 3.1 – diagrama de blocos do sistema proposto	14
Figura 3.2 – Extensômetros colados no raio da roda.....	15
Figura 3.3 – Ligação dos extensômetros e efeitos das forças	16
Figura 3.4 – Esquemático do circuito eletrônico.....	17
Figura 3.5 – Estrutura de dados API(Fonte: Manual Xbee).	18
Figura 3.6 – Placa USBBEE (Fonte: www.rogercom.com.br)	19
Figura 3.7 – Tela do software desenvolvido.	19
Gráfico 4.1 – Efeito do ruído estático pelas amostras	22
Figura 4.2 – Detalhe lateral do sistema de calibração.....	23
Figura 4.3 – Visão geral do sistema de calibração.....	24
Gráfico 4.4 – Valores da saída do A/D para peso de 1,4kg	25
Gráfico 4.5 – Valores da saída do A/D para peso de 6,3kg	26
Gráfico 4.6 – Valores da saída do A/D para peso de 15,6kg.....	26
Gráfico 4.7 – Variação positiva e negativa do torque.....	27
Gráfico 4.8 – Efeito da aplicação de força lateral na roda.....	28
Gráfico 4.9 – Comparação entre valores estimados e reais.	29



LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 2.1 – Potência desenvolvida.....	6
Fórmula 2.2 – sensibilidade de um extensômetro	9
Fórmula 2.3 – variação da resistência de um extensômetro	9
Fórmula 2.4 – tensões nos pontos B e C	10
Fórmula 3.1 – Diferença de potencial na ponte de Wheatstone	16
Fórmula 3.2 – Variação da tensão na saída do circuito.....	17



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

TCC: Trabalho de Conclusão de Curso.

API: Application Programming Interface.



LISTA DE SÍMBOLOS

K - Coeficiente de condutibilidade

P - Pressão termodinâmica

T_i - Valor da temperatura



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Riscos Internos e Externos da Execução	3
1.2. Índices de Qualidade	4
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1. O dinamômetro	5
2.2. Medições desejadas.....	7
2.3. Extensômetros.....	8
2.4. Aquisição do sinal	11
2.5. Estado da arte	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1. Descrição Geral do Sistema	14
3.2. Extensômetros e ponte de Wheatstone.....	15
3.3. Amplificação, conversão, envio e recepção do sinal adquirido	17
3.4. Apresentação do sinal adquirido	19
3.5. Metodologia de testes realizados no sistema	20
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	21
4.1. Modelos	21
4.2. Medição de ruído estático	22
4.3. Calibração estática do sistema.....	23
4.4. Testes de perda de pacotes.....	28
4.5. Comparações dos Resultados das Simulações, Modelos e o Sistema Real.....	29
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
5.1. Problemas Encontrados.....	31
5.2. Avaliação dos Objetivos Propostos	32
5.3. Avaliação dos Índices de Qualidade	32
5.4. Conclusões.....	32
5.5. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	33
6. REFERÊNCIAS.....	34
GLOSSÁRIO.....	35
ANEXO A – COMANDOS AT DO MÓDULO XBEE.....	36
ANEXO B – TABELA DE GANHOS DO CI INA122.....	37



1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um dinamômetro embarcado, para realizar a medição de potência desenvolvida de um motor, bem como a eficiência deste sistema diretamente na roda de um veículo. Como existem equipamentos mecânicos que trabalham em movimento contínuo, fica difícil posicionar sensores e seus circuitos de aquisição sobre partes específicas de peças móveis. Nesse trabalho foi montado um sistema para medições de força nos raios de uma roda de liga leve. O sinal, que provém de extensômetros ligados em ponte de Wheatstone, foi condicionado e enviado via radiofrequência através de um módulo Xbee, utilizando o protocolo Zigbee. Este sinal foi apresentado na tela de um computador utilizando o software LabView.

Por uma necessidade dos cursos de Engenharia mecânica e mecânica automotiva, surgiu a idéia de criar um dinamômetro embarcado capaz de realizar a medição do desempenho de um veículo. Este dispositivo deveria medir o torque diretamente na roda do veículo e a evolução do sinal deveria ser apresentada e armazenada em formato digital.

Como não há um sistema disponível para aquisição direta dos dados sem que o carro esteja em condições de teste, solicitou-se ao departamento de engenharia elétrica que criasse uma solução para esse problema. Uma das premissas é que o sistema possa ser acoplado na roda, que é o local em que se deseja realizar a medição. Com isso, os itens a serem desenvolvidos são o circuito de aquisição e amplificação das medidas, o sistema de transmissão e o programa para apresentar e salvar as informações adquiridas.

O interesse científico sobre a dinâmica deste problema quando o veículo é ensaiado em diferentes condições é o enfoque do projeto, o que fez com que os objetivos comerciais do produto não fossem explorados.

Como objetivo do projeto do dinamômetro embarcado, deseja-se adquirir os dados referentes à dinâmica do torque desenvolvido na roda de um veículo



automotor sobre diferentes condições e apresentá-los num PC. Para tal, desenvolveu-se os seguintes itens:

- Uma célula de carga como sensor da variável torque. A roda que comporta a célula de carga foi desenvolvida e usinada especificamente para este objetivo pelos integrantes do curso de Eng.^a Mecânica da ULBRA;
- Um sistema de condicionamento e amostragem do sinal;
- Um sistema para transmissão do sinal adquirido;
- Um software para apresentar os resultados.

As metas do projeto foram a aquisição e transmissão dos dados como primeiro passo, a visualização e gravação dos mesmos como segundo passo e a utilização do sistema em condições de teste como objetivo final.

Pelo desconhecimento do sistema mecânico utilizado, não se sabia ao certo que informação esperar. Considerou-se que o sistema não poderia realizar as medições e transmiti-las com qualidade caso as condições de teste fossem de alta velocidade do veículo ou de solavancos contínuos.

Para a medição da variação do torque, a utilização de extensômetros foi considerada a melhor solução. Dessa forma foram ligados 4 extensômetros em ponte de Wheatstone completa.

Como é necessário que se efetue uma transmissão sem-fio a partir da roda, algumas tecnologias disponíveis podem ser utilizadas, tais como Bluetooth e Wi-fi. Porém, decidiu-se pela tecnologia Zigbee por sua eficiência dentro dos parâmetros desejados, baixos custo e consumo de energia.

A variação da tensão diferencial da célula de carga é muito baixa, inviável para a aquisição do sinal diretamente pelo conversor analógico/digital. Foi necessário implementar um circuito de amplificação do sinal, para que os valores dos dados adquiridos fossem mais representativos. Esse circuito foi instalado na própria roda.

Para a visualização dos resultados, optou-se pelo software LabView por este ter o propósito de servir principalmente como um facilitador de aquisição de dados.



Com bibliotecas de comunicação serial já incluídas por padrão, a programação do sistema de aquisição de dados ficou mais simples e direta.

Os critérios que o sistema deve atender são:

- Linearidade da célula de carga implementada.
- Circuito eletrônico e alimentação de dimensões reduzidas, com consumo máximo de 90mAh
- Alcance de transmissão de 15m em ambiente fechado, visto que o sistema ficará dentro do veículo em um computador portátil.
- Robustez física.
- Transmissão de dados a cada 1ms.

O sistema proposto com o Zigbee tem um menor consumo de energia e custo quando comparado com o sistema Bluetooth e um menor tamanho físico comparado com o sistema Wi-fi. Atende, portanto, a todos os critérios de seleção.

A solução escolhida foi a implementação de uma célula de carga aplicada em uma roda desenvolvida especialmente para este fim. A saída da célula é amplificada, filtrada e conectada ao sistema de aquisição e transmissão, localizado no centro da roda. Este sistema é composto por um amplificador de instrumentação e um filtro passa-baixa para o condicionamento do sinal, e um módulo Zigbee para realizar a transmissão dos dados adquiridos. A recepção de dados se dará em outro módulo conectado a um PC através da porta USB, simulando uma conexão serial. A alimentação do circuito na roda se dá através de uma bateria de 3.7V, utilizada normalmente em telefones celulares.

1.1. Riscos Internos e Externos da Execução

- Erro na usinagem da roda;
- Colocação incorreta dos extensômetros;
- Imprevisibilidade do resultado.



1.2. Índices de Qualidade

Foi realizada uma análise de amplitude do sinal para avaliar se as condições do sistema podem ocasionar a perda de dados e influenciar o resultado apresentado. A velocidade de transmissão dos dados através da comunicação serial é o fator limitante da quantidade de dados apresentada.

Deve ser considerado que os valores adquiridos pelo sistema ainda são desconhecidos quanto ao seu valor, visto que apenas a análise teórica da carga sobre a roda foi realizada. Testes contínuos com o novo sistema deverão ser realizados para o levantamento da curva de valores torque por tensão medida na célula de carga.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O dinamômetro

O dinamômetro é um instrumento utilizado para medir a intensidade das forças aplicadas sobre um corpo e tem seu funcionamento baseado na proporcionalidade entre a força aplicada em um corpo e a deformação nele produzida. Dinamômetros são capazes de medir a potência e o trabalho executado em um motor nas suas diversas condições de funcionamento.

Os dinamômetros mais comuns (figura 2.1) são dotados de molas que, conforme a sua deformação, indicam a força aplicada pelo objeto conectado a elas. Há outras formas de realizar a avaliação da força aplicada, tal como a utilização de células de carga, medindo a deformação produzida nestas para obter o resultado desejado.



Figura 2.1 – Dinamômetro de força [fonte: www.ruadireita.com]

Os dinamômetros mais utilizados para medições em motores são os baseados no freio de Prony (figura 2.2). Esse dispositivo é constituído por um volante circundado por uma cinta conectada a um braço cuja extremidade se apóia sobre a plataforma de uma balança.

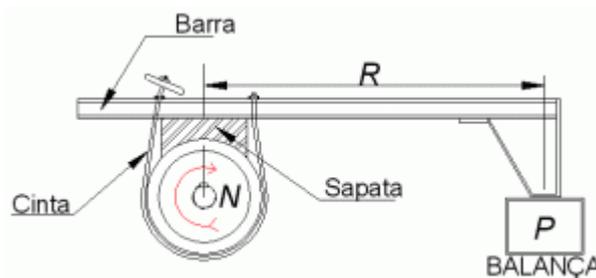


Figura 2.2 – Dinamômetro do tipo freio de Prony. [fonte: www.joseclaudio.eng.br]

O volante, acionado pelo motor, tem o seu movimento restringido pela pressão aplicada à cinta, que transmite o esforço ao braço apoiado sobre a balança. A partir das leituras da balança, calcula-se o esforço despendido pelo motor. Para o cálculo da potência, são considerados:

- Rotação do motor = N (em rpm)
- Comprimento do braço = R (em m ou ft)
- Leitura da balança = P (em lb. ou Kg)

Dessa forma, tem-se a seguinte equação para o cálculo da potência desenvolvida, em HP (*Horse-Power*).

$$HP = \frac{(P * R * N)}{5252}$$

Fórmula 2.1 – Potência desenvolvida

Dos testes possíveis com automóveis, o mais comumente utilizado é o de velocidade variável. O ensaio é realizado mantendo o motor em máxima rotação após a estabilização das temperaturas. Gradualmente é ajustada a carga do dinamômetro, acoplado ao motor, comparando os valores de potência e as rotações por minuto (rpm) lidos. É interessante notar que estes ensaios são realizados em condições de teste, e não em condições de funcionamento do automóvel, não representando assim a efetiva potência transmitida pelo motor.

2.2. *Medições desejadas*

Deseja-se realizar a medição da força aplicada por um motor de automóvel diretamente na roda deste. A partir da medida de potência na roda é possível estabelecer parâmetros para otimização do sistema de transmissão uma vez que a potência exercida pelo veículo é medida a partir da força de reação aplicada. O produto dessa força pela distância do ponto de aplicação é chamado de torque, que representa a habilidade do motor em produzir trabalho.

Os alunos e professores do curso de Engenharia Mecânica da ULBRA desenvolveram uma roda especial de liga leve. Esta análise realizada utilizando o método dos elementos finitos determinou as regiões de maior deformação da roda quando aplicada uma carga de 3.000N.

A roda teve de ser adaptada para possuir em seus raios a mesma medida que as dimensões utilizadas na análise numérica, ou seja, dimensões de 49,0 mm de comprimento por 12,0 mm de altura e 19,5 mm de espessura, conforme a figura 2.3.

Os raios desta roda possuem dimensões iguais e foram concebidos de forma que a deformação de cada um deles seja uniforme, tanto de um lado quanto do outro dos raios.



Figura 2.3 – Roda de liga leve desenvolvida.

Para medir a deformação de um dos raios é utilizada uma célula de carga com sensores do tipo extensômetros ligados em ponte de Wheatstone completa.

2.3. Extensômetros

Os extensômetros, ou *strain gauges*, mudam sua resistência elétrica ao serem expandidos ou comprimidos. Isso ocorre porque suas barras metálicas variam a área de sua seção transversal e seu comprimento, alterando a resistência elétrica resultante nos mesmos, conforme pode ser observado na figura 2.4. Um extensômetro típico do tipo folha, é formado de dois elementos, a base, geralmente uma lâmina de poliamida ou epóxi, e a grade resistiva. Os fabricantes não recomendam que a corrente elétrica que passa pelo extensômetro seja superior a 25mA.

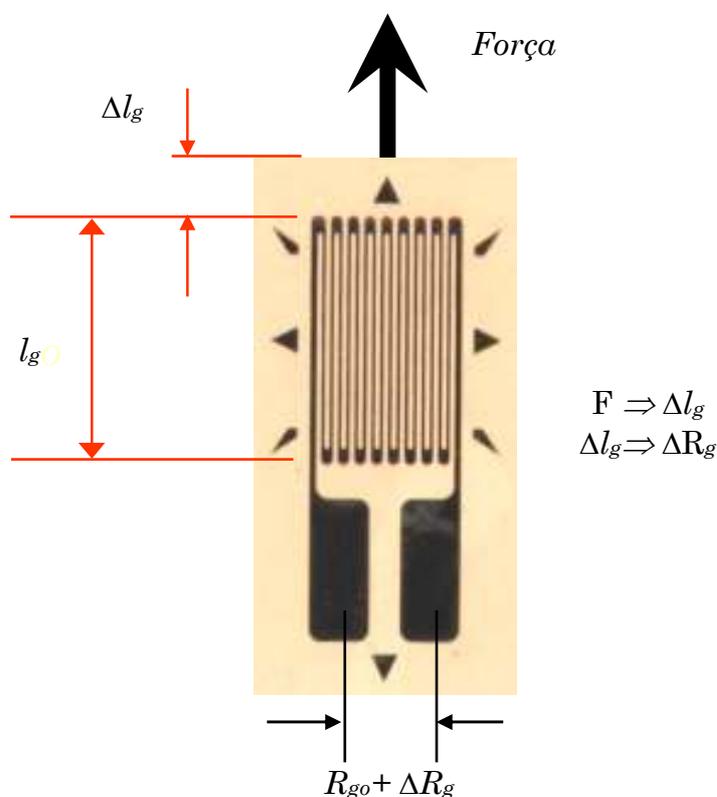


Figura 2.4 – Efeitos da aplicação de forças no extensômetro. (Fonte: Notas de Aula – Augusto Mattos)

Uma característica dos extensômetros é a sensibilidade estática, ou fator Gauge (GF).

A sensibilidade de um extensômetro é dada por (BALBINOT; BRUSAMARELLO):

$$K = \frac{\Delta R_g / R_g}{\Delta l / l}$$

Fórmula 2.2 – sensibilidade de um extensômetro

Onde K é o fator Gauge, $\Delta R_g / R_g$ é a variação relativa da resistência elétrica e $\Delta l / l$ é a variação do comprimento do extensômetro.

A variação da resistência elétrica se dá por (BALBINOT; BRUSAMARELLO):

$$\Delta R_g = R_g (1 + 2\mu)\varepsilon$$

Fórmula 2.3 – variação da resistência de um extensômetro

Onde μ equivale ao coeficiente de poisson e ε é a variação de comprimento.

A figura 2.5 mostra a curva de variação relativa de resistência pela extensão de um extensômetro de Constantan. Este possui um fator Gauge equivalente a 2. Pode-se observar que é uma curva bastante linear, apesar de proporcionar apenas uma pequena variação da resistência, na ordem de 1% para uma extensão de 0,5mm.

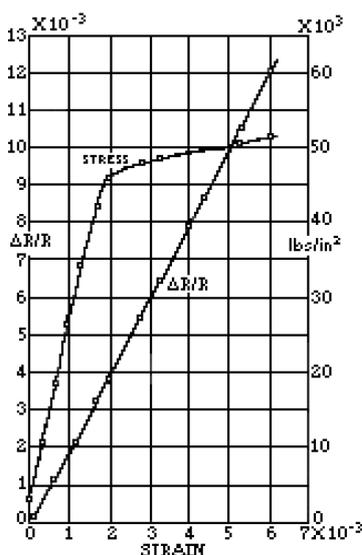


Figura 2.5 – Curva da resistência relativa da liga de Constantan (Fonte: Notas de aula – Augusto Mattos)

No caso da roda, os extensômetros são colados dois em cada lado do raio, de forma que os sensores que estão do mesmo lado estão ligados em paralelo, em posições invertidas. A ligação da ponte se dá conforme a figura 2.6.

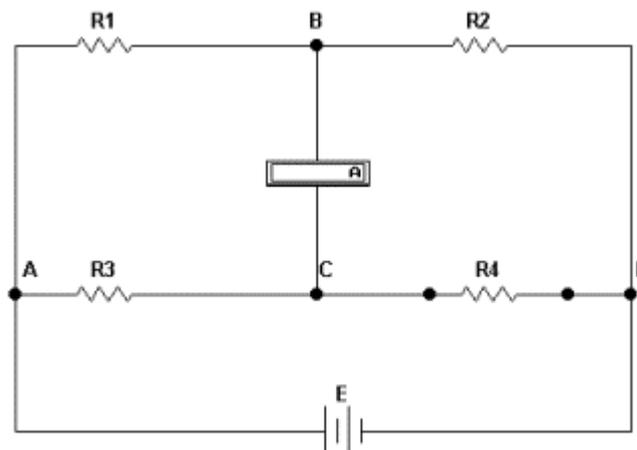


Figura 2.6 – Ponte de Wheatstone

A tensão medida pelo circuito de aquisição é a diferença de potencial entre os pontos B e C, cujas tensões são dadas por:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E \qquad V_C = \frac{R_4}{R_3 + R_4} E$$

Fórmula 2.4 – tensões nos pontos B e C

A variação de resistência é mínima, causando pequenas variações na diferença de potencial aplicada nos terminais do extensômetro. Ao conectar os extensômetros na forma de ponte completa, a diferença entre os dois pontos de medição é maximizada, facilitando a aquisição do sinal elétrico. A utilização de um circuito em ponte de Wheatstone completa permite que os sensores sejam ligados um próximo do outro, e em direções diferentes. Isso evita que as variações de apenas um dos lados do raio influencie nas tensões de saída da ponte. Com isso, o efeito do peso do carro nos extensômetros acaba sendo minimizado.

2.4. Aquisição do sinal

É necessário realizar uma amplificação do sinal adquirido para melhor avaliação do resultado. Para tal são utilizados amplificadores de instrumentação. Estes têm por objetivo tornar a resposta dos sensores mais sensível a variações de tensão. Como o sistema possui apenas alimentação positiva, o amplificador de instrumentação deve ter as seguintes características:

- Baixo consumo de energia;
- Baixa tensão de *offset*;
- Oscilação de saída do tipo *rail-to-rail*.

Como o sistema possui um ruído inerente da rotação e vibração da roda, é necessário desenvolver um filtro passa-baixas para diminuir ao máximo a influência desse ruído na resposta.

Para converter os sinais analógicos adquiridos em valores compreendidos por sistemas computacionais é necessário utilizar circuitos conversores de valores analógicos para digitais (A/D).

Para a transmissão do sinal, considerando os sistemas comerciais disponíveis, o protocolo escolhido foi o Zigbee. Os módulos XBee (figura 2.7) foram escolhidos por possuírem 4 canais A/D.



Figura 2.7 – Módulo *Xbee* (Fonte: Manual XBee)

Na topologia Zigbee, há um módulo coordenador, que gerencia os outros módulos que estão na mesma rede. É possível utilizar módulos roteadores, para otimizar a quantidade de saltos necessários para acessar um módulo remoto ou

distante. Por fim, os módulos remotos são aqueles que realizam funções específicas, tais como acionamento de sistemas ou a própria aquisição de dados de um componente remoto. Neste caso, os módulos podem ser configurados de forma que realizem automaticamente a leitura de suas entradas, tanto analógicas quanto digitais, a cada N ms, onde N é um número inteiro. A cada leitura, os dados são enviados para os destinos, conforme a configuração realizada.

Os módulos Xbee possuem duas formas de comunicação serial:

Comandos AT: é possível realizar todas as configurações, requisições de dados e testes no módulo local enviando pela porta serial comandos que iniciam com “AT” e logo em seguida o código do comando que se deseja realizar.

Comandos API (*Application Programming Interface*): É possível realizar as configurações, requisições de dados e testes tanto no módulo local quanto nos módulos remotos. Utiliza-se o protocolo de dados no formato API para tal.

A comunicação efetuada entre os módulos Xbee é transparente. Ao receber um dado de um módulo remoto, o módulo coordenador envia os dados automaticamente pela porta serial, desde que esteja configurado no modo API. Na figura 2.8 há um exemplo de topologia da rede Zigbee com um módulo coordenador (C), módulos roteadores (R) e remotos (E).

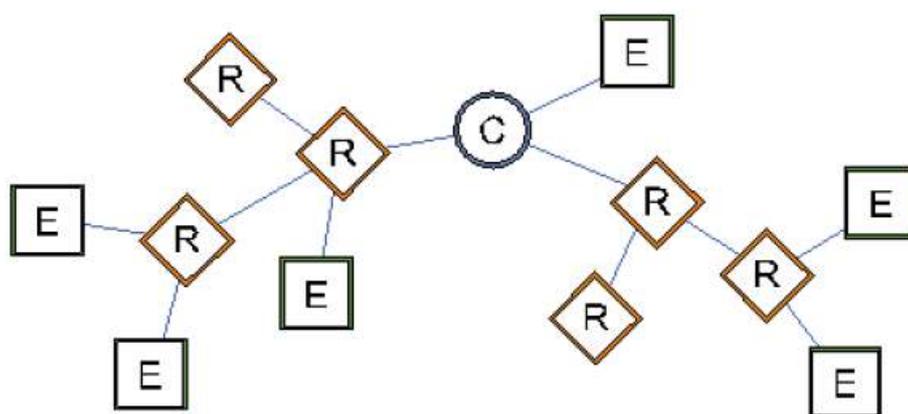


Figura 2.8 – Rede Zigbee (Fonte: Manual XBee)

2.5. *Estado da arte*

Geralmente, os sistemas de medição de torque a realizam no eixo do próprio motor do veículo. Outros sistemas medem de forma indireta o torque na parte externa da roda, desde que o automóvel se encontre sobre rolos de forma que suas rodas girem e o veículo não saia do lugar (Figura 2.9). O sistema desenvolvido propõe a medição do torque diretamente na roda do veículo. Sistemas com medição direta, sem a utilização de anéis de contato e escovas são inviáveis financeiramente. Levando em consideração as dificuldades de transmitir os dados de um local em constante rotação, um sistema de baixíssima potência e tamanho diminuto se faz necessário. O sistema ideal é aquele que realiza as medições do torque desenvolvido na roda, para que estes dados possam ser comparados com o torque desenvolvido pelo motor.



Figura 2.9 – Carro sobre dinamômetro de rolos (Fonte: Esther Turbo)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição Geral do Sistema

O dinamômetro embarcado proposto adquire o sinal a partir dos extensômetros conectados na forma de ponte de Wheatstone montada na roda, amplifica esse sinal e o transmite para um PC, onde os dados são lidos de uma porta serial e mostrados na tela.

Para isso é utilizado um circuito para a amplificação do sinal e posterior transmissão, e outro circuito para receber este sinal e enviá-lo para o PC.

No PC, o sinal é lido, tratado e apresentado por um programa desenvolvido no ambiente do software *LabView* (National Instruments Inc.). O diagrama de blocos desse processo é demonstrado na figura 3.1.

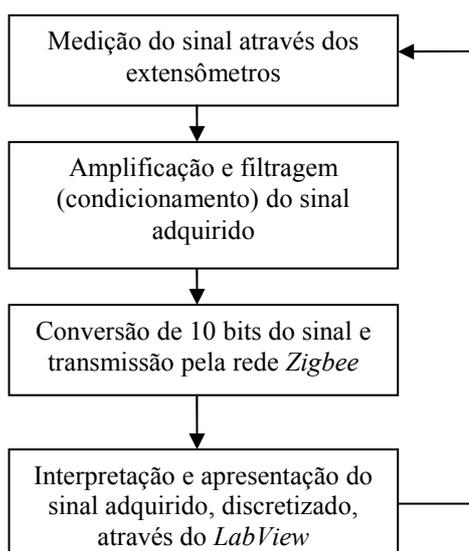


Figura 3.1 – diagrama de blocos do sistema proposto

3.2. *Extensômetros e ponte de Wheatstone*

Os extensômetros uniaxiais são os sensores mecânicos do sistema. O efeito mola do sistema é produzido pela roda, ao ser rotacionada pelo motor. Os extensômetros estão ligados de forma tal que se tem uma ponte de Wheatstone completa. Esse tipo de ligação caracteriza uma célula de carga. A figura 3.2 é uma imagem desses extensômetros colados no raio da roda.

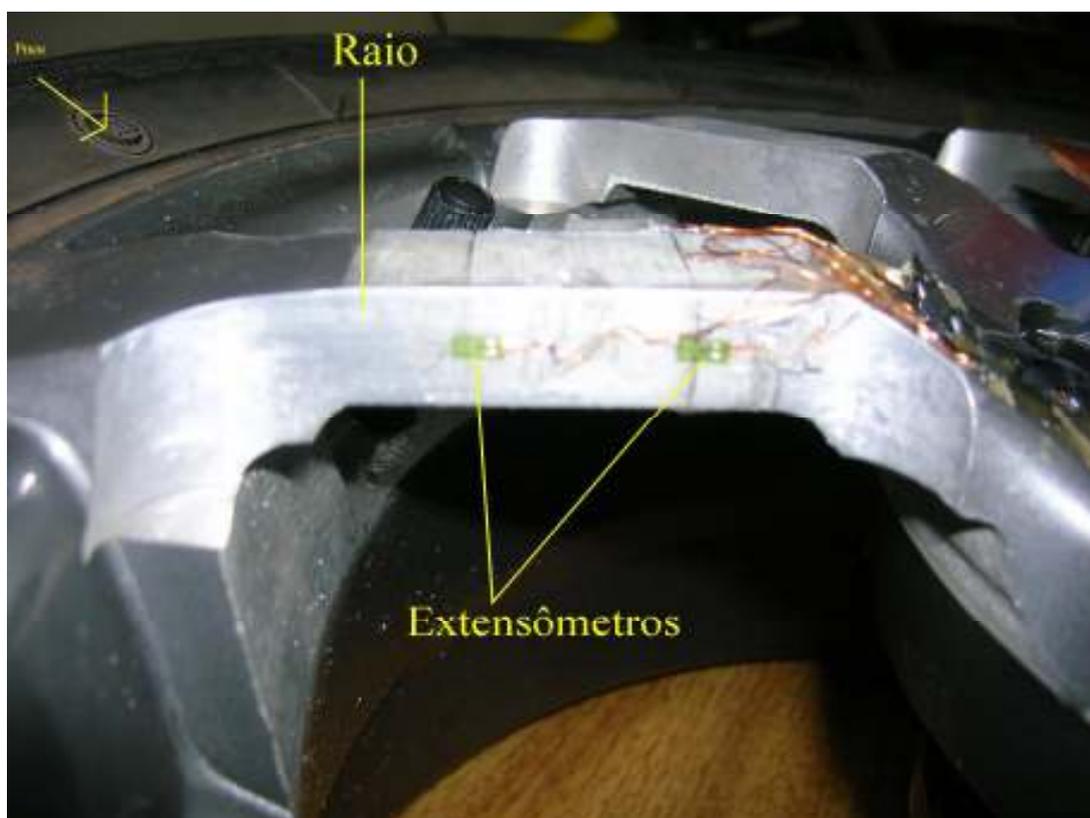


Figura 3.2 – Extensômetros colados no raio da roda

A orientação dos extensômetros, nessas condições, minimiza a variação da resistência dos mesmos quando aplicada uma força peso ou uma força lateral na roda.

Na figura 3.3 é possível observar, além da forma como estão ligados os extensômetros no raio da roda, qual o resultado da aplicação das forças nesses extensômetros.

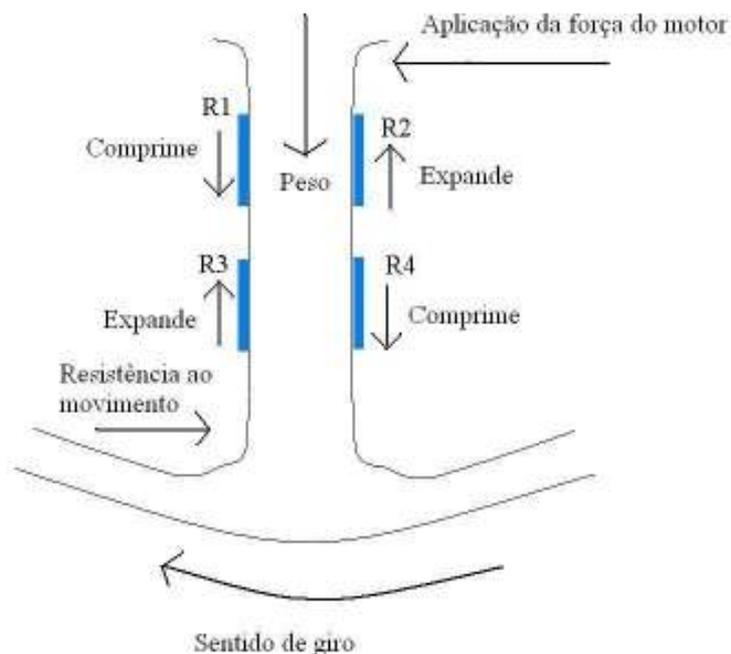


Figura 3.3 – Ligação dos extensômetros e efeitos das forças

Ao incidir um peso sobre o conjunto, os extensômetros têm a mesma variação de resistência, mantendo a ponte balanceada. Os únicos efeitos que causam desbalanceamento na ponte são o torque do motor e a resistência do conjunto ao movimento. Quando o motor é acionado, é gerado torque no centro da roda, suficiente para vencer o peso do carro, o atrito com o chão e ainda acelerar o veículo. Com isso R1 e R4 são comprimidos e R2 e R3 são expandidos. A diferença de potencial esperada é calculada por:

$$V_{BC} = -E \frac{\Delta R_g}{R_{go}}$$

Fórmula 3.1 – Diferença de potencial na ponte de Wheatstone

Quando o veículo é freado, conforme a ligação do sistema, o efeito é inverso, com R1 e R4 expandindo e R2 e R3 comprimindo. A variação de tensão na saída é dada por:

$$\frac{E_o}{E} = K\varepsilon * 10^{-3}$$

Fórmula 3.2 – Variação da tensão na saída do circuito

3.3. Amplificação, conversão, envio e recepção do sinal adquirido

Para a montagem do amplificador decidiu-se por utilizar o CI INA122 (Texas Instruments Inc). Este amplificador foi configurado de forma que exista um *offset* de tensão em sua saída de 0,358V, permitindo assim que ocorra uma medição tanto positiva quanto negativa (frenagem). A amplificação do sinal é de aproximadamente 200 vezes, utilizando um resistor de 1k Ω com 5% de tolerância, para os primeiros testes. O sinal passa por um filtro Butterworth de segunda ordem ativo, com frequência de corte em 10Hz, e é enviado ao conversor A/D do módulo Xbee após ser amplificado. O circuito eletrônico pode ser observado conforme a figura 3.4

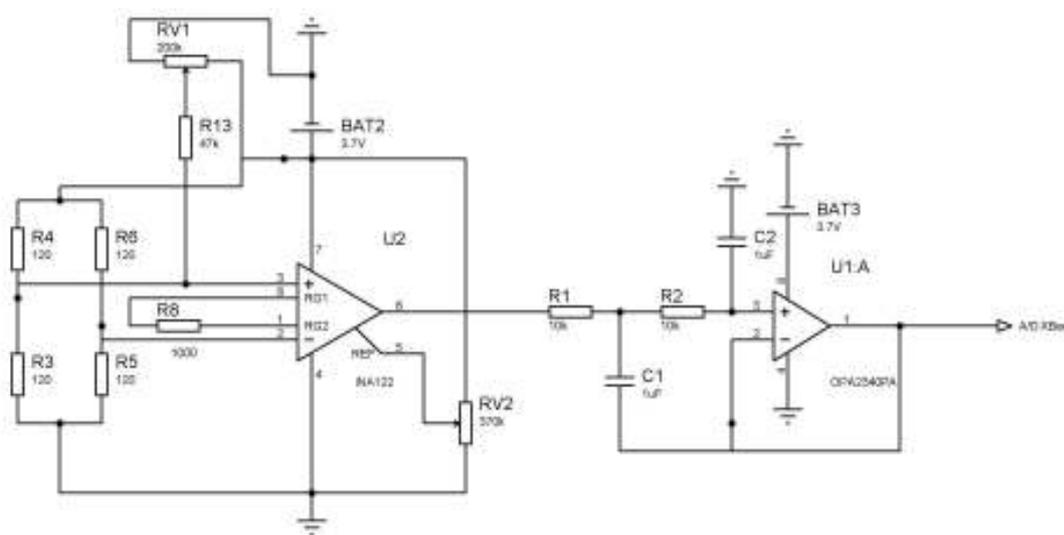


Figura 3.4 – Esquemático do circuito eletrônico.

Apenas um canal A/D do módulo Xbee foi utilizado para o projeto. Os conversores A/D do módulo Xbee possuem alcance de entrada de 0 a 1,2V, para uma conversão de 10 bits. Para a saída do conversor aumentar um bit é necessário variar, aproximadamente, 0,001171875V na entrada.

Os dados recebidos pelo conversor são enviados para o módulo coordenador, que está conectado ao PC. A comunicação com o PC é feita através do protocolo UART, via porta serial. A transmissão de dados entre os módulos é feita a partir das configurações de identificação de rede, que devem ser idênticas tanto no módulo final (aquisição) quanto no coordenador (recepção).

Os dados transmitidos para o PC estão no formato de frame API, e para tanto, é necessário filtrar os dados de valores que se deseja do trem de bytes que é transmitido.

A forma mais indicada para efetuar este filtro é através do software que realiza a leitura dos dados da entrada serial. A figura 3.5 mostra o formato do pacote API utilizado na transmissão contínua dos dados lidos pelo A/D de um módulo remoto.

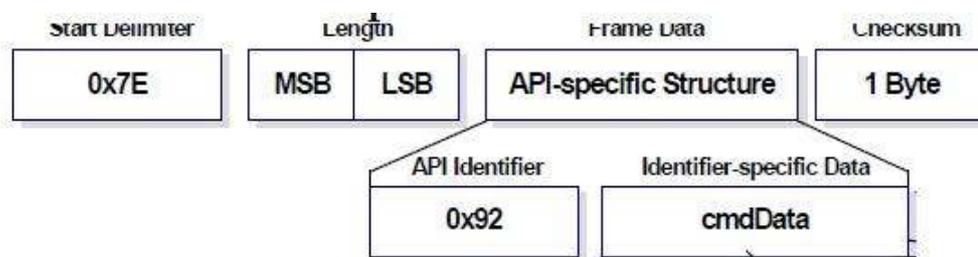


Figura 3.5 – Estrutura de dados API(Fonte: Manual Xbee).

O cabeçalho é caracterizado pelo *byte* 0x7Eh. Após esse cabeçalho vêm as informações de tamanho do pacote, o identificador do pacote API, que para as medições é sempre 0x92h. Após isso, são transmitidos os *bytes* de identificação do módulo que enviou os dados, os dados das amostras digitais e por fim os dados das amostras analógicas, ou seja, os dados adquiridos pelo A/D do módulo remoto.

Para o módulo de aquisição, ou *end device*, a versão de *firmware* utilizada é a 1341, enquanto que para o módulo de recepção, ou *coordinator*, é utilizada a versão 1141, que são as versões mais atualizadas encontradas no site do fabricante. A necessidade de utilização dessas versões acontece pelo fato de ambas suportarem o protocolo API.

Para a conexão do módulo coordenador no PC, foi utilizada a placa CON-USBEE (*Rogercor*) (figura 3.6). Esta placa converte a comunicação UART do

módulo Xbee para USB e cria uma porta COM do tipo serial extra no PC, permitindo assim maior conectividade em equipamentos atuais e portáteis.

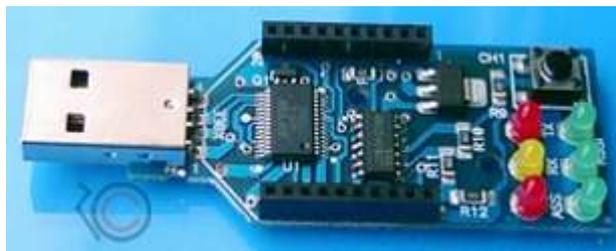


Figura 3.6 – Placa USBBEE (Fonte: www.rogercom.com.br)

3.4. Apresentação do sinal adquirido

O software utilizado para programação da aquisição e visualização dos dados foi o LabView, na versão 8.0.

O programa de aquisição lê os dados da porta COM conectada ao módulo Xbee, valida se são os dados de cabeçalho do pacote API e, caso positivo, retira do pacote API os dados adquiridos pelo A/D remoto. Após isso, é efetuado o ajuste dos valores de offset dos dados recebidos, plotados estes valores em um gráfico e salvos em um arquivo escolhido pelo usuário. A tela principal se encontra na figura 3.7.

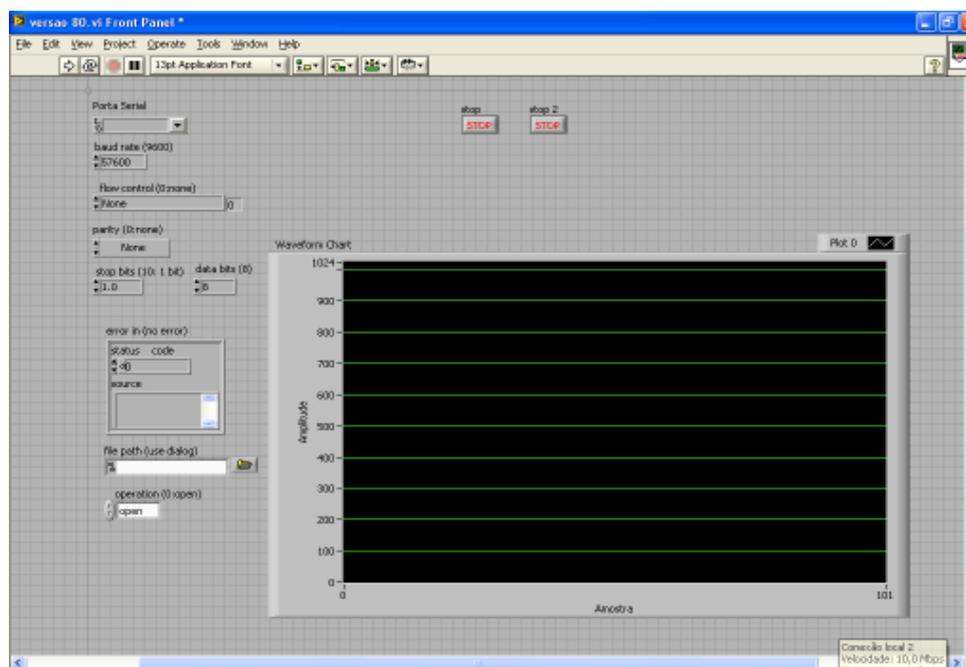


Figura 3.7 – Tela do software desenvolvido.

Antes de iniciar o processo, é necessário configurar a porta, a velocidade da conexão desejada e o arquivo onde se deseja salvar os dados.

3.5. Metodologia de testes realizados no sistema

O primeiro teste realizado visou estabelecer a comunicação entre dois módulos Xbee. A confirmação do estabelecimento desta ligação é efetuada ao visualizar se três *LED's* da placa CON-USBBEE acendem, ou ainda através de um comando AT realizado no módulo coordenador.

O segundo teste realizado teve por objetivo avaliar a forma de aquisição de dados, transmissão do módulo remoto para o coordenador e o formato do pacote de dados API. Através desse teste foi constatado que a amostragem máxima permitida pelo módulo Xbee é de 1000 aquisições por segundo, conforme será explanado no capítulo 4. Também se verificou a necessidade de utilizar definitivamente o pacote de dados API, pois esta é a forma mais simples de extrair dados dos módulos remotos.

O terceiro teste consiste em simular uma situação de torque em bancada, avaliando assim a sensibilidade do sistema. Nesta bancada, têm-se uma morsa que prende o eixo da roda. Ao realizar um movimento de giro sobre esse eixo, ocorre uma leve deformação no raio da roda. Dessa forma é possível avaliar o comportamento do circuito em condições estáticas. Se os parâmetros desejados estão de acordo com o calculado e se a comunicação entre os módulos se dá de forma satisfatória, sem efeitos adversos que ocasionem baixa potência na recepção do sinal. Utilizou-se a força humana para realizar os movimentos necessários e foram colocados alguns obstáculos entre o sistema e o receptor.

No quarto teste realizou-se a calibração estática do dinamômetro, além da avaliação da variação da amplitude do sinal quando a roda sofre a influência de forças laterais e da força peso.



4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Modelos

A resistência R_{g0} tem valor igual a 120Ω , enquanto ΔR_g é a variação da resistência de todos os extensômetros. Foi considerado que a variação de diferença de potencial entre os pontos B e C não seria maior do que $0.005V$, o que levou à utilização de um amplificador de instrumentação com ganho de 200 vezes o valor de entrada.

Sendo a entrada amplificada 200 vezes, espera-se que o erro decorrente do amplificador de instrumentação não seja maior do que 1% da medição original.

O passo do conversor A/D do módulo Xbee é de $1,17mV$, sendo essa a menor medida possível da variação da saída do amplificador de instrumentação.

Considerando que há um off-set de saída do amplificador de instrumentação de $0,358V$, para ser possível medir o torque em marcha-ré, o ponto inicial da medição se dá na posição 306 do A/D. Caso o valor medido seja maior do que $0,358V$, a medida do A/D será maior do que 306, significando um torque positivo, ou seja, o carro está se movendo para a frente. Caso contrário, a medida será menor do que 306, significando um torque negativo, ou seja, o carro está em marcha-ré.

Com esse ganho de 200, a menor variação de tensão entre os pontos B e C possível de ser medida pelo A/D é de $5,85\mu V$. O limite inferior da medição é de aproximadamente $-1,8mV$ de variação na ponte. O limite superior da medição é de aproximadamente $4,2mV$ de variação na ponte.

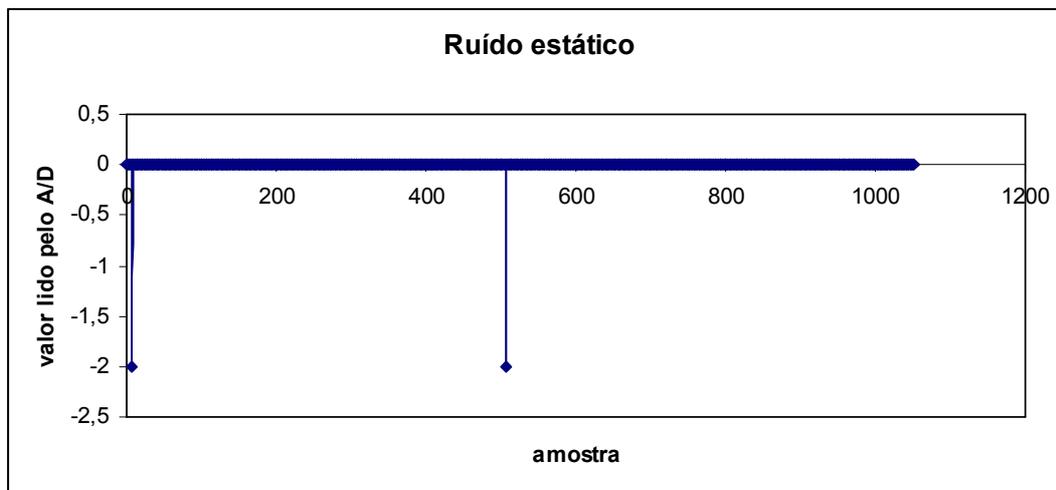
A carga máxima esperada na parte exterior da roda é de 200kgf. Sendo assim, a variação de tensão por kgf deve ser aproximadamente 4,21mV/kg.

4.2. Medição de ruído estático

Para avaliar a influência do ruído no resultado apresentado pelo sistema, realizou-se o seguinte procedimento:

- Inicialização e configuração do sistema;
- Início da transmissão;
- Manter a roda em repouso por 1 minuto;
- Salvar o arquivo com os resultados do teste.

Desta forma, os resultados obtidos deram-se conforme o gráfico 4.1.



4.3. Calibração estática do sistema

Para a calibração do sistema fixou-se a roda em um suporte elevado. Colocou-se pesos de massas de 1,4kg, 6,3kg e 15,6kg, presos em uma tangente na parte externa da roda, tal qual um pêndulo. Para cada peso foi realizado um ensaio onde várias amostras foram realizadas pelo sistema e gravadas em disco. As figuras 4.2 e 4.3 demonstram os detalhes construtivos de como a roda foi fixada em um suporte e como os pesos foram presos na mesma.

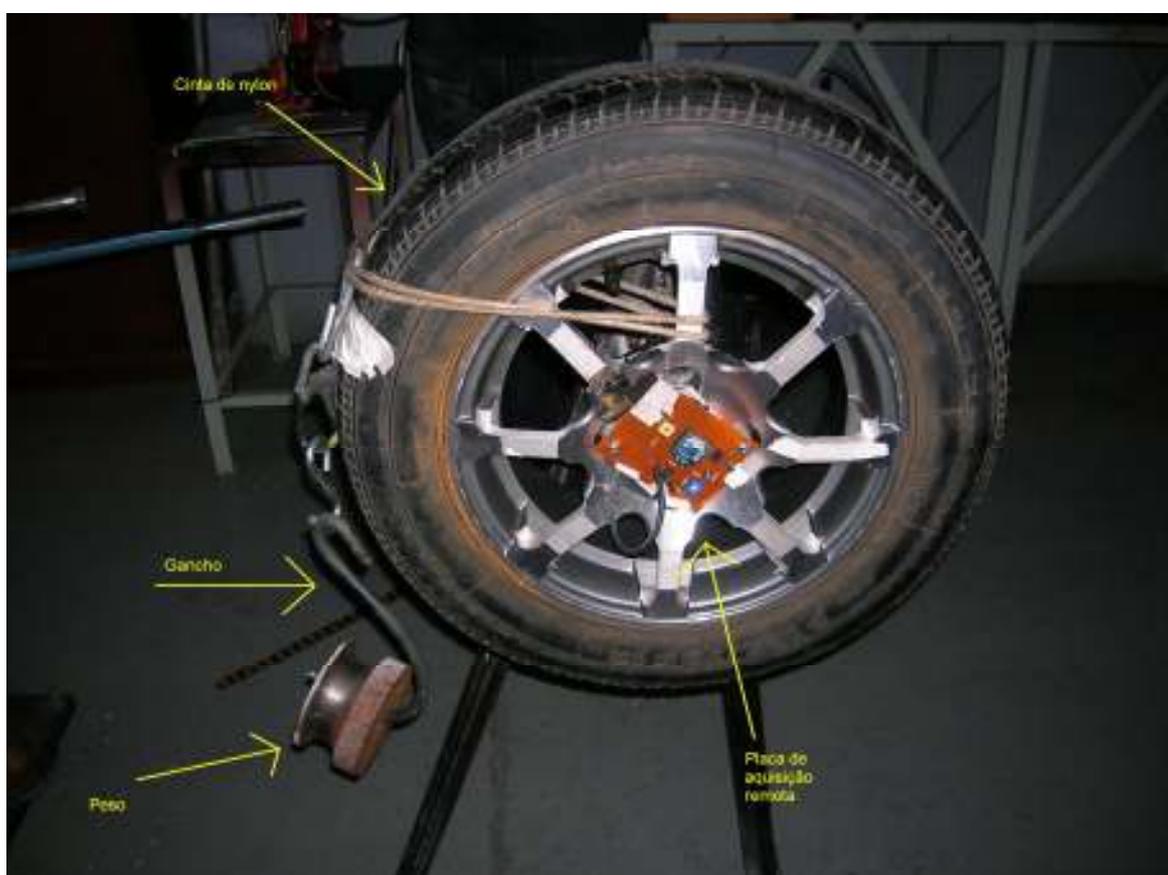


Figura 4.2 – Detalhe lateral do sistema de calibração



Figura 4.3 – Visão geral do sistema de calibração

Para segurar os pesos foi utilizada uma cinta de nylon em volta de toda a roda, de forma que a deformação seja uniforme. Um gancho foi afixado no ponto onde a tangente à roda aponta para o chão.

O procedimento utilizado para efetuar o teste foi o seguinte:

1. Inicialização e configuração do sistema
2. Medição da massa do peso a ser segurado pela roda
3. Colocação do peso
4. Retirada do peso para que a roda volte ao seu estado normal
5. Colocação de peso com massa diferente
6. Repetição dos passos 4 e 5 por 2 vezes

Os valores apresentados a seguir são os aqueles lidos diretamente pelo A/D, ou seja, variam de 0 a 1024. Não foi realizada a conversão para torque em Nm devido ao fato de esse teste servir para efetuar o dimensionamento final do circuito.

Ao colocar pesos de massas diferentes, o torque produzido pelo peso é alterado. A série de gráficos a seguir retrata os dados adquiridos pelo conversor A/D para cada peso de massa diferente utilizado. O gráfico 4.4 mostra os valores para um peso de 1,4kg:

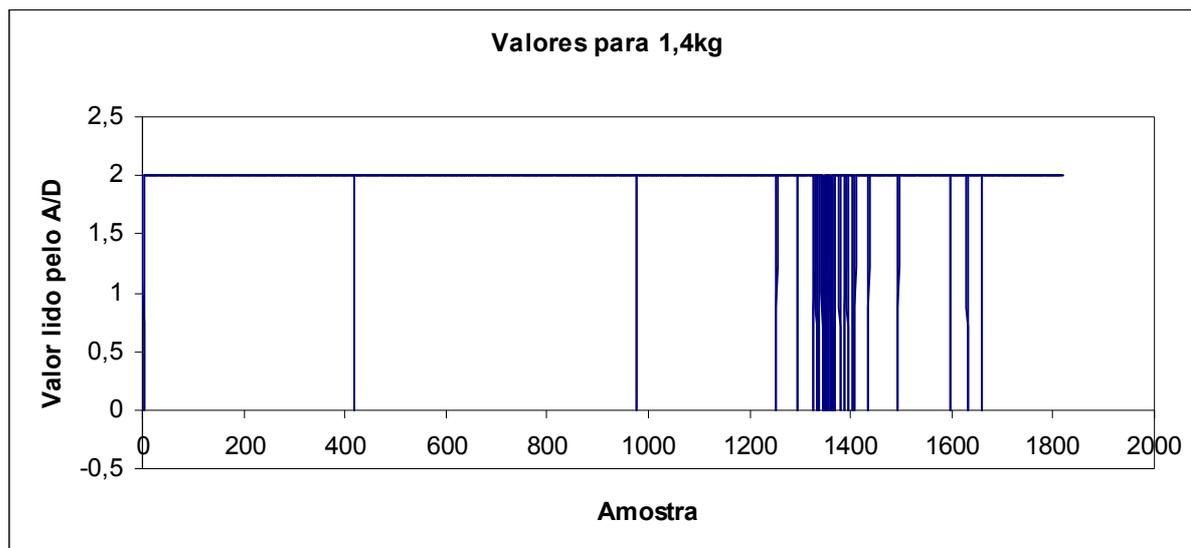


Gráfico 4.4 – Valores da saída do A/D para peso de 1,4kg

Conforme demonstrado pelo gráfico, praticamente não ocorreu falha de aquisição. O período que teve variações entre 2 e 0 pontos representa o momento em que a carga de 1,4 kg estava sendo movida. Nos demais períodos, a leitura se manteve constante no valor 2. Os dois pontos que tiveram valor lido igual a zero antes da movimentação da carga devem ter ocorrido por falhas e mal-contatos da placa.

Em seguida foi levantada a curva para uma carga de aproximadamente 6,3kg. O resultado é mostrado no gráfico 4.5:

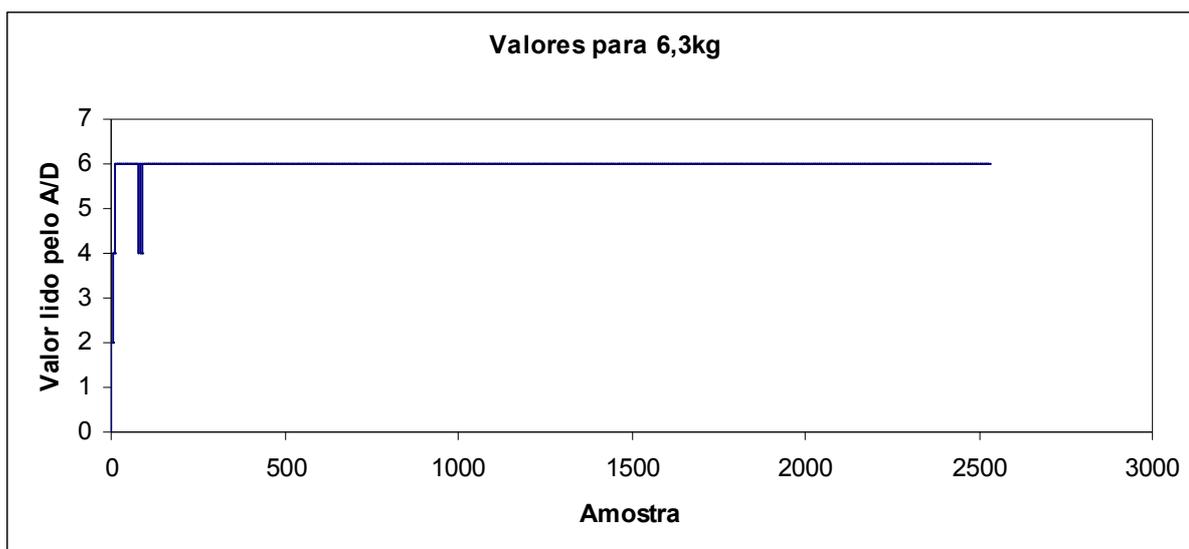


Gráfico 4.5 – Valores da saída do A/D para peso de 6,3kg

Neste gráfico, o resultado adquirido é mais constante, pois apenas no estágio inicial do teste é que ocorreram variações mais bruscas, devido à colocação dos pesos. Pode-se observar que agora o valor lido no A/D é de 6 pontos, aproximadamente o mesmo do peso colocado.

Por fim, realizou-se um teste com a massa igual a 15,6kg. O gráfico 4.6 mostra os resultados dessa medição.

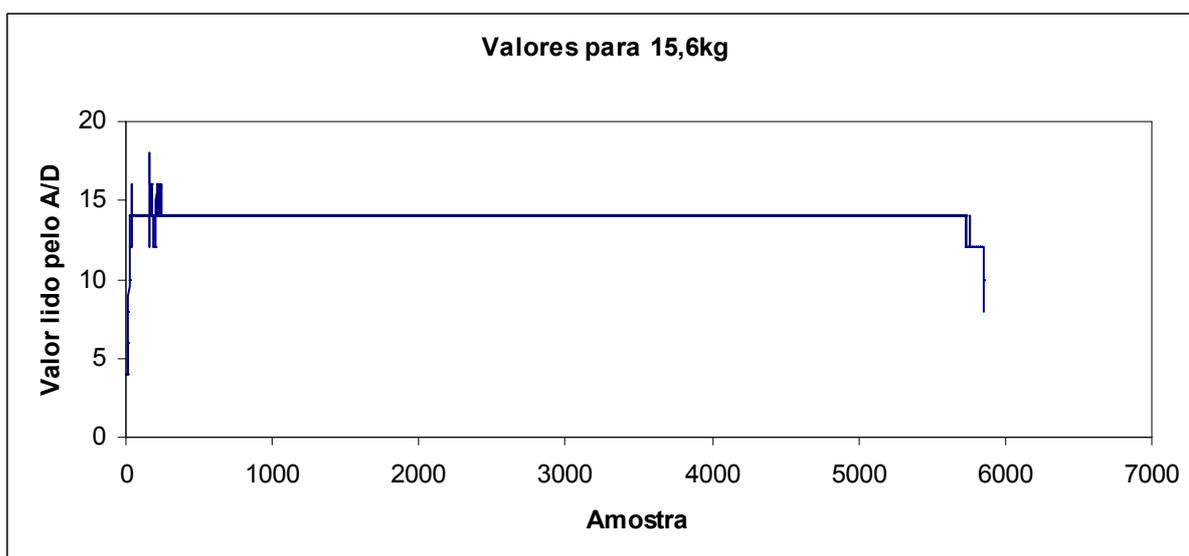


Gráfico 4.6 – Valores da saída do A/D para peso de 15,6kg

De acordo com o gráfico, não houve perda e tampouco medições erradas por um longo período. O valor medido permaneceu constante em 14.

Considerando os três gráficos anteriores, pode-se afirmar que o circuito está realizando a leitura de quase 1 ponto do A/D por quilograma.

Após os testes, os pesos foram retirados e verificou-se que o sistema voltou a apresentar o valor 0 na saída. Isso comprova que não há efeito de tração residual na roda.

O gráfico 4.7 apresenta como o sistema se comporta ao variar o torque em ambos os sentidos:

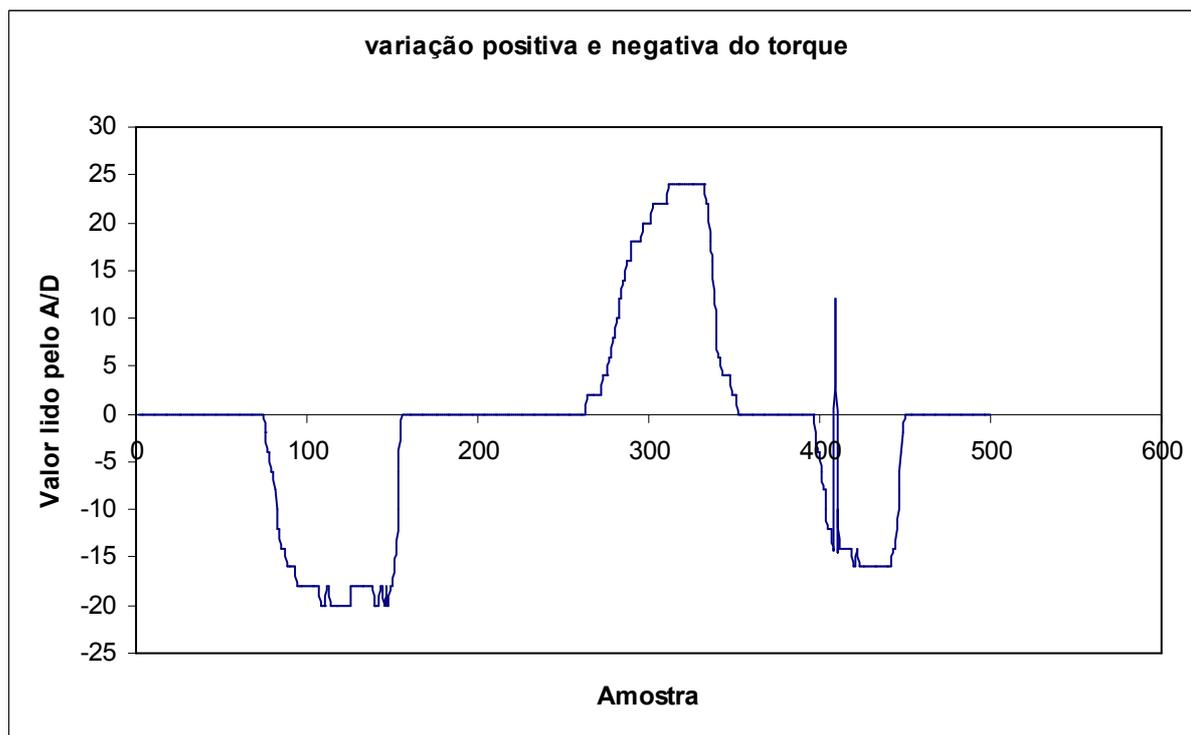


Gráfico 4.7 – Variação positiva e negativa do torque.

O sistema está apto a realizar a medição do torque quando o carro está em deslocamento para frente ou em marcha-ré. Ocorreu um erro de medição próximo da amostra 400, que pode ter ocorrido devido a algum mal-contato na placa de aquisição.

O gráfico 4.8 apresenta a variação da leitura dos dados do A/D quando aplicada uma força lateral na roda.

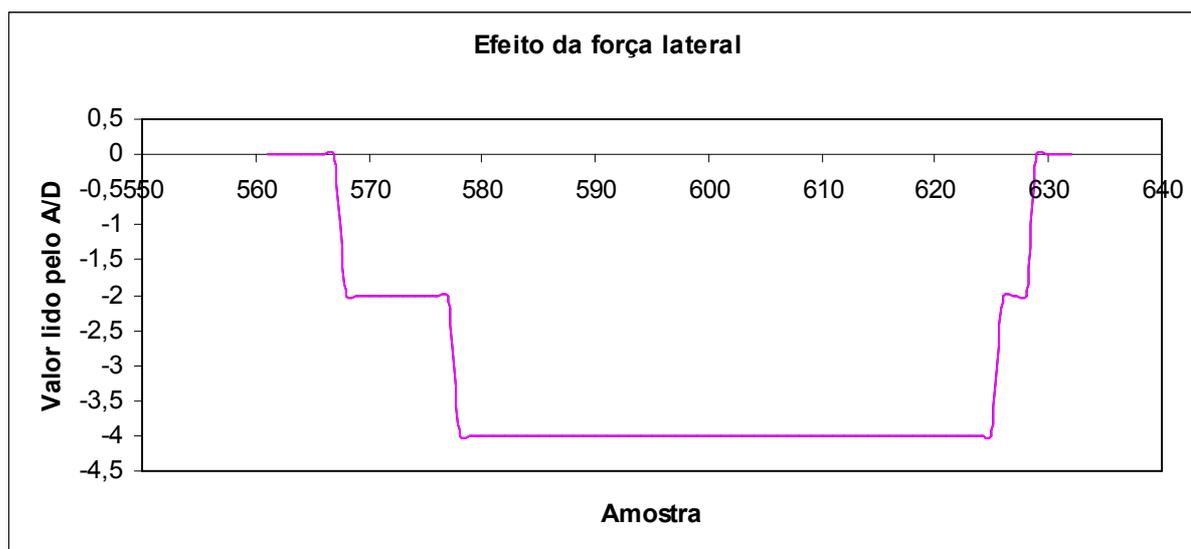


Gráfico 4.8 – Efeito da aplicação de força lateral na roda

A variação para a força lateral aplicada é bem menor do que a variação ocasionada pelo torque. Essa variação ocorre porque os extensômetros variam sua área também quando tracionados lateralmente, porém essa variação é bem menor do que a ocasionada pela tração longitudinal. Por esta razão, o valor medido para a tração lateral resultou em aproximadamente 20% do valor da tração longitudinal.

4.4. Testes de perda de pacotes

Os testes de perda de pacotes foram realizados utilizando o software próprio da empresa *Digi International Inc.* Com o módulo coordenador no modo AT, foi digitado o comando de descoberta de módulos remotos (ATND). Após receber a resposta do módulo remoto, foi digitado o comando AT que verifica a potência do último sinal recebido (ATDB).

Neste teste, foram realizados ensaios de perda de pacotes na transmissão em 5 situações diferentes. Conforme especificação do fabricante *Digi International Inc.*, a perda de pacotes ocorre quando a potência do sinal recebido é menor do que -100dBm. Obstáculos foram colocados de forma que a situação da transmissão seja parecida com a encontrada no veículo. A distância entre os módulos ficou aproximadamente em 2 metros, com uma barreira entre eles, criando o efeito da porta do carro.

Os resultados do teste apresentaram perda 0 de pacotes. O nível mínimo de potência do sinal encontrado foi -92dBm, na pior situação simulada.

4.5. **Comparações dos Resultados das Simulações, Modelos e o Sistema Real**

Considerando que a carga máxima esperada em uma roda é de aproximadamente 200kgf, o sistema foi dimensionado para que esse seja o valor máximo da saída do A/D. A deformação no raio da roda deveria apresentar um comportamento linear em relação à variação do torque na mesma. No gráfico 4.5 está uma comparação entre o estimado e o medido.

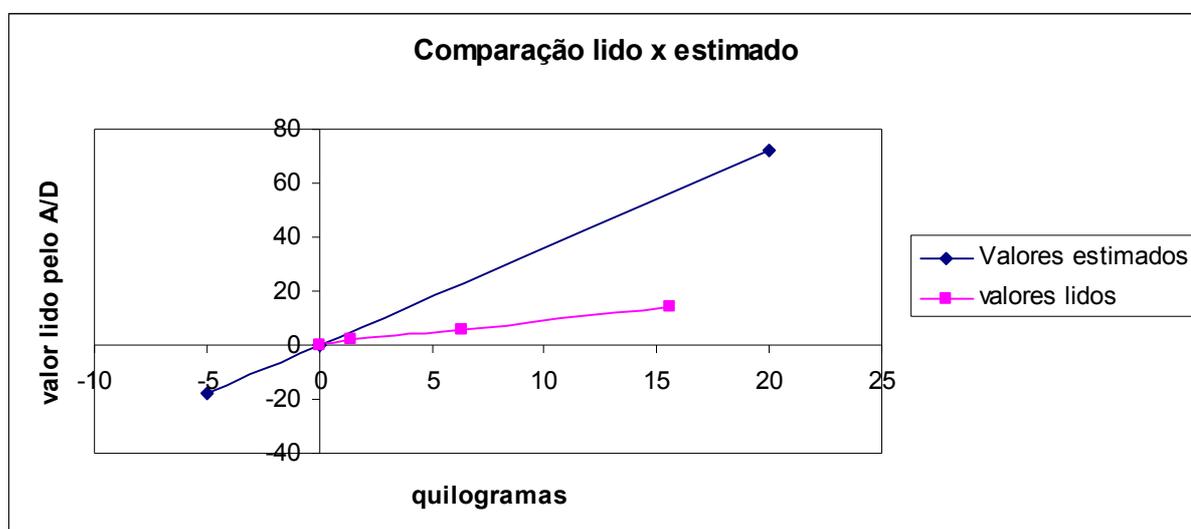


Gráfico 4.9 – Comparação entre valores estimados e reais.

Conforme o gráfico, a amplificação de 200 vezes o valor da diferença de potencial na ponte de Wheatstone foi subdimensionada. Considerando essa amplificação, é estimado que o valor de saída do A/D seja de 176 quando a carga for de 200kg.

Para a correção desse problema, basta alterar o valor do ganho do amplificador de instrumentação, o que é feito trocando o resistor ligado no CI INA122 de um valor de 1k Ω para aproximadamente 280 Ω . Com isso, o valor do ganho do circuito será de 800 vezes a d.d.p. da ponte de Wheatstone.

Pode-se afirmar que o sistema é linear para a faixa de cargas que compreende de 0 a 15,6kg, e estimar que ele seja linear para a faixa de cargas de -



15kg(carro em marcha-ré) a 30kg. Como o número de pontos lidos é pequeno, não é possível afirmar que o sistema é linear para toda a faixa desejada, de 0 a 200kg.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. *Problemas Encontrados*

A configuração dos módulos XBee apresentou sérias dificuldades ao desenvolvimento deste projeto. Em especial quando se desejou alternar entre os modos de trabalho AT e API. Ao realizar a alteração no *firmware* do módulo, o mesmo sempre perde as configurações originais e é necessário reconfigurar o módulo. Em alguns casos, essa reconfiguração pode não resolver o problema, inutilizando o módulo. O módulo Xbee é bastante sensível com relação à variações de tensão, portanto não se deve utilizá-lo em sistemas com muita variação de tensão.

Também a configuração da rede mostrou alguns pontos negativos com relação aos módulos. Ao configurar um módulo para que este se conecte à rede número x, em alguns casos mesmo configurando o segundo módulo para a mesma rede, não há comunicação. Acredita-se que isso ocorre porque o módulo coordenador foi configurado após o módulo remoto. Quando a configuração é feita na ordem inversa, ou seja, o módulo coordenador é configurado antes do remoto, a comunicação é estabelecida normalmente.

Outro problema encontrado foi a incompatibilidade do software LabView com o Windows XP SP2, no que tange à detecção das portas COM. A solução encontrada foi utilizar a versão mais atualizada do pacote “*VISA runtime*”, que proporcionou a compatibilidade necessária.

A calibração do sistema demonstrou ser trabalhosa. Como utilizar um peso de 200kg é inviável no suporte, utilizou-se pesos menores para estimar os valores máximo e mínimo do torque. Como não foram utilizados pesos de 200kg, não é possível afirmar que a deformação da roda é linear para toda a faixa desejada.



5.2. Avaliação dos Objetivos Propostos

Com relação às metas iniciais do projeto, obteve-se sucesso na aquisição e transmissão do sinal. Com relação à apresentação dos resultados, 90% dos objetivos foram alcançados, pois não foi possível realizar a conversão da unidade de medida mensurada. Apenas as análises estáticas foram realizadas. Ainda se faz necessário realizar as análises dinâmicas para que o sistema seja avaliado de forma completa.

5.3. Avaliação dos Índices de Qualidade

Conforme o teste de perda de pacotes, 100% dos dados foram transmitidos com sucesso, para o sistema estático. Ainda é necessário realizar a análise de perda de pacotes para o sistema em movimento contínuo.

5.4. Conclusões

O dinamômetro embarcado desenvolvido apresentou a variação desejada, ou seja, uma variação da d.d.p. na interligação dos extensômetros quando aplicado um torque, uma pequena variação quando aplicada uma força lateral e nenhuma variação quando aplicada uma força peso na roda. No entanto, os valores escolhidos para amplificação dessa d.d.p. foram sub-dimensionados em relação à capacidade do conversor A/D do módulo XBee.

O circuito de condicionamento do sinal não apresentou nenhum problema, mesmo com relação à ruído estático.

A transmissão dos dados ocorreu com sucesso. A perda de pacotes esperada acabou não ocorrendo.

O software desenvolvido atendeu às necessidades do projeto, apresentando na tela, em tempo real, os dados lidos pelo A/D.

O cronograma do projeto sofreu atrasos significativos devido à falta de planejamento adequado e a problemas ocorridos com os módulos XBee.

Como pendências da proposta original deste trabalho, têm-se:



- Não conversão da unidade de medida do mensurando;
- Aproveitamento máximo dos limites superior e inferior do A/D do sistema;
- Avaliação do ruído estático nessas condições;
- Avaliação do sistema em um veículo em movimento.

5.5. *Sugestões para Trabalhos Futuros*

Com relação ao desenvolvimento de trabalhos futuros, ficam as seguintes sugestões:

- Alteração do ganho do amplificador de instrumentação do circuito de aquisição;
- Realização de novos testes com esse ganho ajustado;
- Desenvolvimento de um software para controle remoto do circuito de aquisição;
- Desenvolvimento de uma placa considerando acondicionamento da bateria.



6. REFERÊNCIAS

ELETRÔNICA 24H. Disponível em:

<<http://www.eletronica24h.com.br/artigos/Instrumentos/Pontewhetstone.html>>

Acesso em: 01/07/2008

BALBINOT, Alexandre; Brusamarello Valner J., 2007. “Instrumentação e fundamentos de medidas”, LTC.

COCIAN, Luis F. E. et al. Manual de estágio supervisionado em Engenharia Elétrica – Revisão L – Canoas: Universidade Luterana do Brasil, 2008

COCIAN, Luis F. E. et al. Manual de trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica – Revisão K – Canoas: Universidade Luterana do Brasil, 2008

SIMPSON, Michael. Create a MaxStream Zigbee 5v Interface type 1 (onboard) – EUA: Kronos Robotics and Eletronics, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. PGA309 Voltage output programmable sensor conditioner User’s Guide – Revisão A – EUA: Texas Instruments, Inc., 2005.

MAXIM. +5V-powered, multichannel RS-232 drivers/receivers – Revisão 11 – EUA: Maxim, 2003.

DIGI INTERNATIONAL, INC. XBee ZNet 2.5/XBee-PRO ZNet 2.5 OEM RF Modules; EUA: Digi International, Inc., 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Avaliação de imóveis urbanos: NBR 5676. Rio de Janeiro, 1989.p.

Giacosa, D.,2000, “Motori Endotermici”, Ed. Ulrico Hoepli – 15 ed. Milano.

Gillespie, T. D., 1992, “ Fundamentals of Vehicle Dynamics”, SAE Publications Group, USA.

Holman, J. P., 1994, “Experimental Methods for Engineers”, 6 ed. McGraw-Hill

Ki., G., S.; Kang, D., I.; Rhee, S. ,H., 1999. “Design and fabrication of a six-component force/moment sensor”, Sensor and actuators, 77, pp. 209-220.

Kyowa, 1998. “Strain Gages, a complete lineup of high performance strain gages and accessories”, Cat. no. 102b-U1.

Petersen, W.,A.; Brookhart, J.,M.; Stone, S., A., 1965. “A strain-gage platform for force measurements”, J. Appl. Physiol., N. 20(5), pp. 1095-1097

PEREIRA, José Cláudio; Dinamômetros; Disponível em:

www.geocities.com/jcpereira.geo/dinos1.html. Acesso em 01/11/2008

SCHWARZ, Leandro et all., 2007. “Proposta de um Sistema de Telemetria de Sinais de Pacientes em Programas de Reabilitação Cardiovascular e Cardiopulmonar”. IEB.



GLOSSÁRIO

Zigbee: Protocolo de transmissão de dados sem-fio

Mensurando: valor que se deseja medir de um sistema



ANEXO A – COMANDOS AT DO MÓDULO XBEE

ATDB – comando que reporta a potência do último sinal recebido pelo módulo conectado ao computador.

ATND – Comando que realiza uma procura de módulos conectados à mesma rede Zigbee e retorna os dados de todos os módulos encontrados.



ANEXO B – TABELA DE GANHOS DO CI INA122

DESIRED GAIN (V/V)	R_G (Ω)	NEAREST 1% R_G VALUE
5	NC	NC
10	40k	40.2k
20	13.33k	13.3k
50	4444	4420
100	2105	2100
200	1026	1020
500	404	402
1000	201	200
2000	100.3	100
5000	40	40.2
10000	20	20

NC: No Connection.



ÍNDICE

E

Escopo · 2
Especificações Técnicas · 4

O

Objetivos · 33
Orçamento · 33

P

Problema de Engenharia · 1