



STEPE – SISTEMA TELEMÉTRICO DE PESAGEM AUTOMOTIVA

Sérgio Luiz Martins Junior¹, Johann Schmittlinger Vieira², Marcelo Vandresen³,
Leandro Schwarz⁴, Jony Laureano Silveira⁵

Resumo: O STePe é um sistema telemétrico de pesagem automotiva distribuído e reconfigurável, idealizado para uso em oficinas mecânicas automotivas de pequeno, médio e grande porte. Cada ilha de pesagem (*pad*) é formada por quatro balanças independentes que utilizam células de carga a *strain gauges* de liga metálica. Um ou mais *pads* são reconhecidos e associados dinamicamente por uma central que coordena remotamente o sistema. Uma estação manual (*handheld*) com display gráfico é utilizada para monitorar e processar as medidas dos *pads*. O sistema se comunica através de uma rede em malha *wireless* no protocolo ZigBee. Este artigo apresenta o projeto e desenvolvimento dos *pads* e os testes de comunicação e montagem da rede ZigBee.

Palavras-chave: Balança Automotiva. Instrumentação Eletrônica. Célula de Carga. ZigBee.

Abstract: *STePe is a telemetry system for automotive weighing with distributed and reconfigurable features, designed for use in automotive workshops of small, medium and large sizes. Each pad is formed by four independent scales using load cells strain gauges of metallic alloys. One or more pads are recognized and dynamically linked by a central device that remotely coordinates the system. A handheld with graphic display is used to monitor and process the measurements of the pads. The system communicates through a wireless mesh network in the ZigBee protocol. This paper presents the design and development of the pads and testing and assembly of the ZigBee communication network.*

Keywords: *Automotive Scale System. Electronic Instrumentation. Load Cell. ZigBee.*

¹ Acadêmico do Curso Técnico Integrado de Eletrônica, DAELN, *campus* Florianópolis, IFSC <jrmartins.sergio@gmail.com>.

² Acadêmico do Curso Técnico Integrado de Eletrônica, DAELN, *campus* Florianópolis, IFSC <johanns.vieira@gmail.com>.

³ Professor do DAMM, *campus* Florianópolis, IFSC <vandresen@ifsc.edu.br>.

⁴ Professor do DAELN, *campus* Florianópolis, IFSC <schwarz@ifsc.edu.br>.

⁵ Professor do DAELN, *campus* Florianópolis, IFSC <jony@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

Na avaliação de suspensões de veículos automotivos de uso comum e também na preparação de veículos para competições (automóveis, *karts*, fórmula, etc.) uma ferramenta bastante útil é conhecida como balança automotiva. Ela consiste (Figura 1) em um conjunto de quatro balanças isoladas (comumente referidos como *pads* ou *pallets*), uma para cada semi-eixo do veículo; conectadas a uma unidade central de processamento que centraliza as medidas e fornece as informações necessárias à avaliação do veículo.

As balanças permitem avaliar a força peso independente em cada um dos semi-eixos; o peso resultante no eixo dianteiro; o peso resultante no eixo traseiro; bem como indicar a porcentagem de

peso observado em cada um dos semi-eixos, a resultante no eixo dianteiro e no eixo traseiro. Nos sistemas mais avançados, nos quais se pode inclinar o veículo em seu eixo longitudinal, ainda é possível determinar o centro de gravidade do veículo (HALDERMAN, 2011).

Os dados gerados pelo equipamento são utilizados para avaliar o equilíbrio mecânico do veículo, permitindo a execução de ajustes que proverão aumento na eficiência e consequente redução do consumo e da emissão de poluentes, além do aumento na segurança tanto no movimento retilíneo quanto na execução das curvas.

Estas balanças normalmente não são fabricadas no país e têm um custo bastante elevado quando adquiridas no Brasil, normalmente na faixa dos US\$ 4.000,00 (Figura 2).

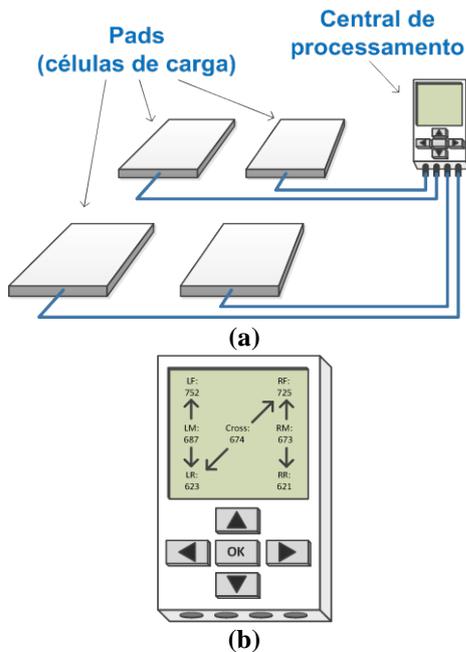


FIGURA 1 - Sistema de balança automotiva apresentando (a) o sistema completo e (b) o detalhe da unidade central de processamento.

Além disso, nos modelos mais acessíveis deste tipo de sistema é necessária a ligação, através de fios, de cada uma das balanças ao sistema de processamento central e desse à fonte de energia o que causa demasiada confusão de cabos no chão de oficina.



FIGURA 2 – Exemplo de balança automotiva importada (PROFORM, 2013).

Desta forma, o desenvolvimento de uma solução nacional com a mesma capacidade técnica dos sistemas de pesagem mais completos apresenta utilização direta nas aulas práticas de cursos de manutenção automotiva, bem como, propiciaria a germinação de um embrião de produto de alto valor agregado e, se viável, a comercialização do mesmo a um custo competitivo e com especificações superiores às dos modelos importados

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A intenção deste trabalho é relatar a experiência de projeto e construção de um sistema

de balança multiponto para uso automotivo na qual a ligação entre os pads e a unidade de processamento central (*handheld*) é feita com tecnologia *wireless*. Desta forma, descreve-se sucintamente, a seguir, alguns conceitos necessários à compreensão do sistema desenvolvido.

2.1. Mensuração de força

Existem várias técnicas para medição de força: sensores resistivos, semicondutores, piezelétricos, interferométricos, LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*), entre outros.

Neste trabalho, serão usadas células de carga com múltiplos sensores do tipo piezoresistivos (extensômetros), associados em ponte com compensação de temperatura.

Nos casos em que a medida direta da força peso ou da tensão mecânica σ é de difícil solução, pode-se, alternativamente, medir a deformação elástica ε (Equação 1).

$$\sigma = \frac{F}{A} = Y \cdot \varepsilon \quad [1]$$

Na Equação 1, σ é a tensão mecânica (em pascal, Pa); F é a força (em newton, N); A é a área da seção do material (em metros quadrados, m^2); Y é o módulo de Yong ou de elasticidade (em pascal, Pa); e ε é a deformação elástica dada pela Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad [2]$$

A Figura 3 apresenta um objeto sofrendo deformação elástica sob ação de uma força.

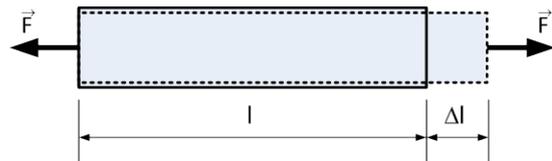


FIGURA 3 – Deformação elástica sob ação de uma força F.

Os sensores do tipo piezoresistivos baseiam-se na variação da resistência com a alteração da resistividade ou de parâmetros dimensionais (efeito piezoresistivo). Assim, desconsiderando-se inicialmente a variação de temperatura, podemos definir a variação da resistência a partir da segunda lei de Ohm (Equação 3).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad [3]$$

Na Equação 3, R é a resistência elétrica do material (em ohms, Ω); ρ é a resistividade elétrica (em ohm-metros, $\Omega.m$); l é o comprimento do material (em metros, m); e A é a área da seção do material (em metros quadrados, m^2).

Uma vez que o volume do material permanece constante, mesmo que seu comprimento sofra variação (Figura 3), resulta que sua seção transversal também deve sofrer variação. Este fenômeno pode ser inserido na Equação 3, que passa a ser representada pela Equação 4.

$$R = \frac{\rho}{v} \cdot l^2 \quad [4]$$

Na Equação 4, R é a resistência elétrica do material (em ohms, Ω); ρ é a resistividade elétrica (em ohm-metros, $\Omega \cdot m$); l é o comprimento do material (em metros, m); e v é volume do material (em metros cúbicos, m^3). Diferenciando a Equação 4 em relação ao comprimento l , tem-se a Equação 5.

$$\frac{dR}{dl} = 2 \cdot \frac{\rho}{v} \cdot l \quad [5]$$

Pode-se, a partir desta equação, definir “sensibilidade” como a relação entre a variação da resistência elétrica e a variação do comprimento (ou deformação). E, ainda, que esta é diretamente proporcional ao comprimento do material ao longo do eixo de deformação e inversamente proporcional a área da seção transversal deformada (FRADEN, 2004).

Normalizando a Equação 5 em relação a R chega-se à expressão da Equação 6.

$$\frac{dR}{R} = S_e \cdot \varepsilon \quad [6]$$

Na Equação 6, R é a resistência elétrica do material (em ohms, Ω); S_e é conhecido como fator gauge ou sensibilidade; e ε é a deformação elástica.

Para a maioria das ligas metálicas o fator gauge fica próximo de 2, a exceção fica por conta das ligas de platina com fatores gauge na ordem de 4 a 6. Para materiais semicondutores, o fator gauge é bem mais elevado e pode ficar entre 100 e 200.

A Tabela 1 mostra as características de alguns materiais usados comercialmente como sensores de deformação.

A Equação 6 leva em conta apenas deformações unidirecionais, uma análise mais aprofundada pode ser encontrada em Webster (1999) resultando na Equação 7, na qual são consideradas deformações longitudinais e transversais, além da influência da variação de temperatura.

$$\frac{dR}{R} = (S_L \cdot \varepsilon_L) + (S_t \cdot \varepsilon_t) + (S_T \cdot \Delta T) \quad [7]$$

Na Equação 7, R é a resistência elétrica do material (em ohms, Ω); S_L é a sensibilidade longitudinal; S_t é a sensibilidade transversal; S_T é a sensibilidade à temperatura; e ΔT é a variação da temperatura.

TABELA 1 – Características de alguns materiais piezoresistivos.

Material (composição em %)	Fator Gauge (Se)	Coef. de temp. da resistividade [ppm/°C]	Característica importante
Liga Constantan (Cu 55, Ni 45)	2,1	11	Compensação automática de temperatura
Liga Karma (Ni 74, Cr 20, Al 3, Fe 3)	2,1	20	Difícil soldagem
Liga Nichrome V (Ni 80, Cr 20)	2,1 a 2,6	100	Admite altas temperaturas
Liga Isoelastic (Fe 55,5, Ni 36, Cr 8, Mn 0,5)	3,5 a 3,6	170	Maior resistência elétrica (350 Ω)
Platina (Pt 100)	6,1	2500	Admite altas temperaturas
Liga Platina-Iridium (Pt 95, Ir 5)	5,1	1250	Admite altas temperaturas
Liga Platina-Tungsten (Pt 92, W 8)	3,6 a 4,4	240	Admite altas temperaturas
Silício (tipo p)	100 a 170	até 90000	Altas sensibilidade e <i>drift</i>

2.2. Strain gauges

Um *strain gauge* ou extensômetro é um sensor do tipo piezoresistivo que mede a deformação elástica sofrida em corpos sólidos quando submetidos a esforços mecânicos de tração ou compressão.

Strain gauges são formados a partir de uma fita metálica, normalmente disposta na forma de ziguezague (privilegiando apenas um sentido de deformação), fixada à superfície do objeto a ser mensurado através de um substrato isolante (normalmente poliamida – um polímero inerte e

muito resistente), como pode ser visto no exemplar comercial da Figura 4. Os valores de resistência mais comuns são de 120 e 350 Ω .

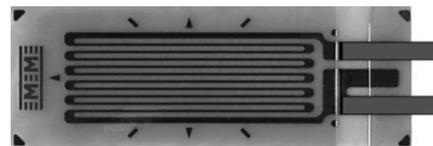


FIGURA 4 – Exemplo de *strain gauge* de padrão linear (VISHAY, 2013).

Devido à sua geometria de construção, os *strain gauges* de ligas metálicas apresentam o

comportamento elétrico apresentado na Figura 5. Pode-se observar que, ao ser traçado e alongar-se no eixo longitudinal, o sensor aumenta sua resistência elétrica; ao contrário, quando o sensor é comprimido na direção do eixo longitudinal, sua resistência elétrica diminui. Trações ou compressões transversais praticamente não alteram a resistência elétrica do sensor.

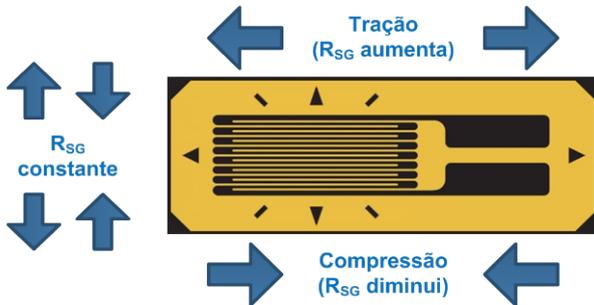


FIGURA 5 – Ações sobre o *strain gauge*.

2.3. Células de carga

As células de carga são dispositivos que convertem força (peso, torque) em sinais elétricos. Elas são comumente usadas para realizar aquisição de peso, por isso, são popularmente chamadas de transdutores de carga. O tipo mais usual é a célula de carga formada por um corpo metálico (frequentemente alumínio, aço ou liga de cobre-bérblio) onde estão dispostos um ou mais sensores do tipo *strain gauge*, de forma que as deformações sofridas pelo corpo da célula sejam transmitidas aos sensores. Existem diversas configurações de células de carga disponíveis no mercado, variando de acordo com o material, topologia, aplicação e custo. Normalmente, os sensores fixados no corpo da célula de carga estão ligados de modo a formar uma Ponte de Wheatstone, de modo que pequenas deformações no corpo (e, conseqüentemente, pequenas variações nas resistências dos sensores) possam ser traduzidos em sinais elétricos.

A célula de carga empregada neste trabalho é do tipo *Binocular Dual Bending Beam* (Figura 6). Este tipo de arranjo possibilita a flexão em duas vigas (superior e inferior) de modo a cancelar cargas axiais sobre os sensores e, assim, tornar a célula de carga menos suscetível ao ponto de aplicação da força.

Outra característica importante é a possibilidade de haver sempre duas faces com deformação igual e de sinal contrário o que facilita a implementação de uma Ponte de Wheatstone completa (quatro sensores), simplificando a compensação de temperatura.

A Figura 7 mostra o funcionamento da ponte completa formada pelos sensores da célula de carga. Na Figura 7(a), pode-se verificar que, estando a balança sem carga, não haverá deformação dos

sensores e a ponte estará equilibrada, apresentando tensão aproximadamente nula em sua saída. No entanto, na Figura 7(b), uma carga é aplicada resultando em flexão do corpo da célula nos eixos superior e inferior (*dual bending beam*), causando variação nas resistências dos *strain gauges* (SG_1 a SG_4) e, conseqüentemente, uma tensão se estabelecerá nos terminais de saída da ponte.

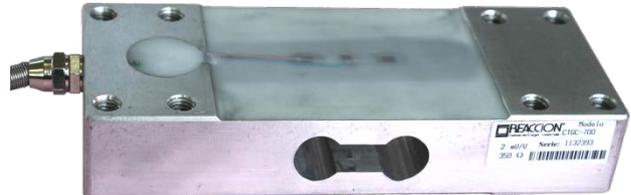


FIGURA 6 – Célula de carga CTGC-700.

A tensão V_S na saída da ponte de Wheatstone pode ser calculada usando-se as diferenças de potencial nos *strain gauges* R_{SG1} e R_{SG4} . Desta forma, tem-se a Equação 8.

Considerando-se igual deformação nas duas vigas da célula de carga e, ainda, que todos os *strain gauges* são casados (especificações idênticas), pode-se reescrever a Equação 8, resultando na Equação 9.

$$V_S = \frac{\Delta R}{R} \cdot V_{CC} \quad [9]$$

E, finalmente, pode-se expressar a saída em tensão V_S como função da deformação sofrida pela célula de carga e da tensão de alimentação da ponte de Wheatstone, assim, aplicando as Equações 2 e 6 na Equação 9, obtém-se a Equação 10.

$$V_S = S_e \cdot V_{CC} \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad [10]$$

2.4. ZigBee

ZigBee é um protocolo de comunicação sem fio de alto nível, utilizado globalmente, que abrange a formação de redes de áreas pessoais, isto é, uma rede que une diversos aplicativos computadorizados a curta distância entre si.

O padrão ZigBee é baseado no padrão IEEE 802.15.4, com uma camada de rede acima das camadas do IEEE 802.15.4, oferecendo a possibilidade de definir associações de dispositivos na qual cada módulo não se limita a somente capturar e transmitir seus próprios dados, mas também servir de um ponto de apoio para ampliar o alcance da rede, formando uma rede *mesh routing* (rede em malha).

O padrão ZigBee foi desenvolvido e é mantido e certificado por um grupo de empresas que formam a ZigBee Alliance. A ZigBee Alliance, atualmente, possui mais de 300 empresas desenvolvedoras de tecnologia associadas.

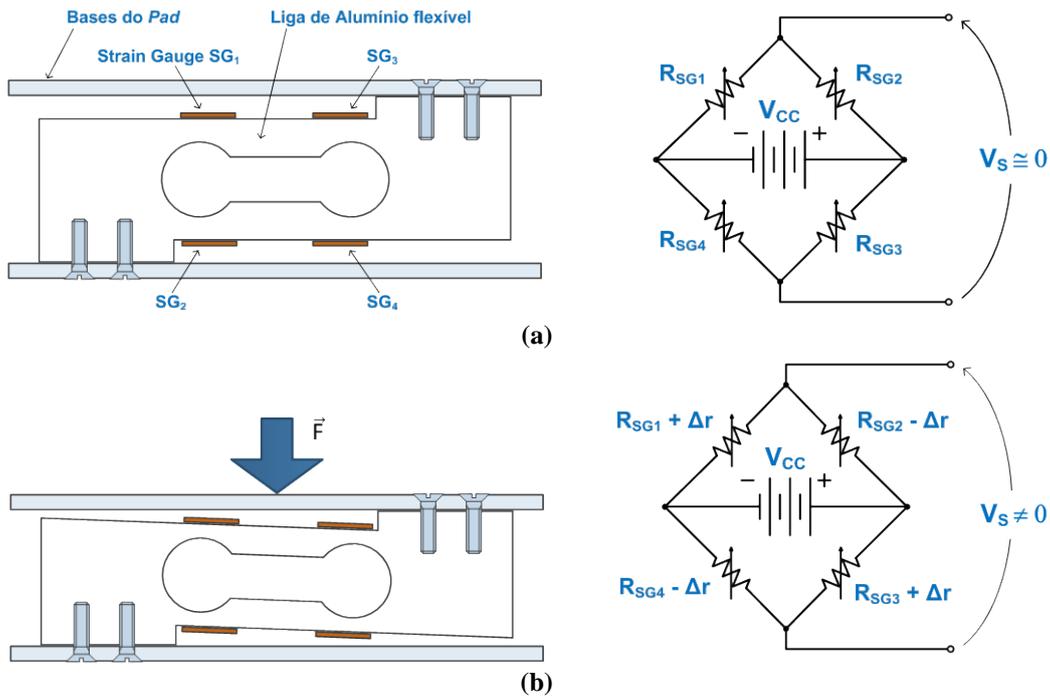


FIGURA 7 – Funcionamento da ponte completa formada pelos sensores da célula de carga com (a) célula em estado de repouso e (b) célula comprimida.

$$V_s = \frac{(R_{SG1} + \Delta R) \cdot V_{CC}}{(R_{SG2} - \Delta R) + (R_{SG1} + \Delta R)} - \frac{(R_{SG4} - \Delta R) \cdot V_{CC}}{(R_{SG3} + \Delta R) + (R_{SG4} - \Delta R)} \quad [8]$$

2.4.1. Modelos

A Digi, empresa membro da ZigBee Alliance, desenvolve os módulos de rádio XBee, que podem se comunicar nos padrões IEEE 802.15.4 ou nos padrões ZigBee e DigiMesh.

2.4.2. Séries

Dentre as séries dos módulos XBee, destacam-se a série XBee 802.15.4 (antiga série 1), que implementa os protocolos IEEE 802.15.4 e DigiMesh, não suportando o protocolo ZigBee e a série XBee ZB (antiga série 2), que possui suporte aos protocolos IEEE 802.15.4, ZigBee e DigiMesh. Ambas as séries operam em frequência de 2,4 GHz.

A Digi ainda apresenta outros módulos de comunicação *wireless* na família XBee, como os módulos XBee-PRO 900HP e XBee-PRO XSC (900 MHz), os módulos XBee-PRO 868 e XBee 868LP (868 MHz), os módulos XBee 865LP (865 MHz) e XBee DigiMesh 2.4. Este módulos, porém, não são suportam o protocolo ZigBee.

2.4.3. Alcance

Os módulos XBee estão disponíveis em duas versões, com diferenças nas potências de transmissão e recepção máximas. Os módulos XBee regulares têm alcance máximo de 40 metros em ambientes urbanos e de 120 metros em visada direta, enquanto que os módulos XBee Pro possuem

alcance máximo de 90 metros em ambientes urbanos e 3.200 metros em visada direta. Além disso, os módulos regulares são menores em tamanho, consomem menos energia e possuem custo mais acessível que os módulos da linha Pro.

2.4.4. Antena

O alcance do módulo também é influenciado pelo tipo de antena a ser utilizada. Os tipos de antenas disponíveis são: antena PCB, antena *chip*, antena *whip*, conector U.FL e conector RPSMA. As antenas são apresentadas na Figura 8.

As antenas do tipo PCB, *chip* e *whip*, são mais econômicas que os conectores U.FL e RPSMA, pois são mais compactas, e não requerem o uso de componentes externos. Entretanto, o diagrama de radiação das antenas PCB e *chip* são pouco omnidirecionais o que pode prejudicar o alcance de módulos posicionados em ângulos específicos. Além disso, juntamente com as antenas *whip*, o posicionamento dos módulos no interior de gabinetes diminui ainda mais o alcance da comunicação e pode até inviabilizá-la no caso de uso no interior de gabinetes metálicos.

Os módulos com conectores U.FL e RPSMA permitem o acoplamento de antenas com amplificação de sinal, permitindo maior alcance e maior omnidirecionalidade. Os módulos com conectores RPSMA devem ser posicionados na placa de modo a permitir o encaixe do conector na

lateral do gabinete. Em contrapartida, os módulos com conectores U.FL. utilizam um cabo chamado *pigtail* para conexão com a antena. Uma vez que o

cabo é flexível, o projetista pode posicionar o módulo no local mais apropriado para a *layout* da placa de circuito impresso.

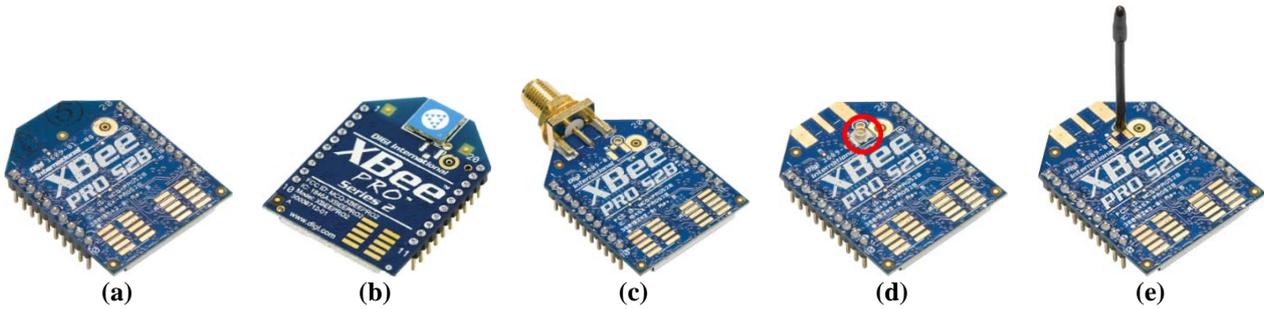


FIGURA 8 – Módulos XBee com (a) antena PCB, (b) antena *chip*, (c) conector RPSMA, (d) conector U. FL., e (e) antena *whip*.

2.4.5. Modo de operação

Os módulos XBee podem ser configurados através de comandos AT ou API. No modo comandos AT, os módulos devem ser primeiramente configurados para estabelecer comunicação entre si antes do envio do conjunto dos dados. Para redes relativamente pequenas, e com baixa taxa de transmissão de dados, o custo computacional para realizar a mudança do endereçamento dos dados não é significativo. Além disso, o modo AT não possui verificação da integridade dos dados transmitidos, nem informa de qual módulo os dados recebidos foram originados.

O modo API (*Application Programming Interface*), em contrapartida, possui uma estrutura bem mais complexa, baseada no encapsulamento

dos dados a serem transmitidos em um pacote com as informações do endereço de origem e destino, tamanho do pacote e um caractere de verificação da integridade dos dados através de *checksum*. Adicionalmente, para cada pacote transmitido, é possível configurar-se a recepção de um pacote informando o estado da transmissão. Desta forma, apesar de mais trabalhoso, o modo API apresenta-se como uma solução mais indicada para redes com grande número de dispositivos ou para redes que necessitem de maior segurança.

2.4.6. Papel na rede ZigBee

Dentro do protocolo ZigBee, um módulo pode assumir três papéis com funções específicas na rede: coordenador, roteador ou *end device*, apresentados na Figura 9.

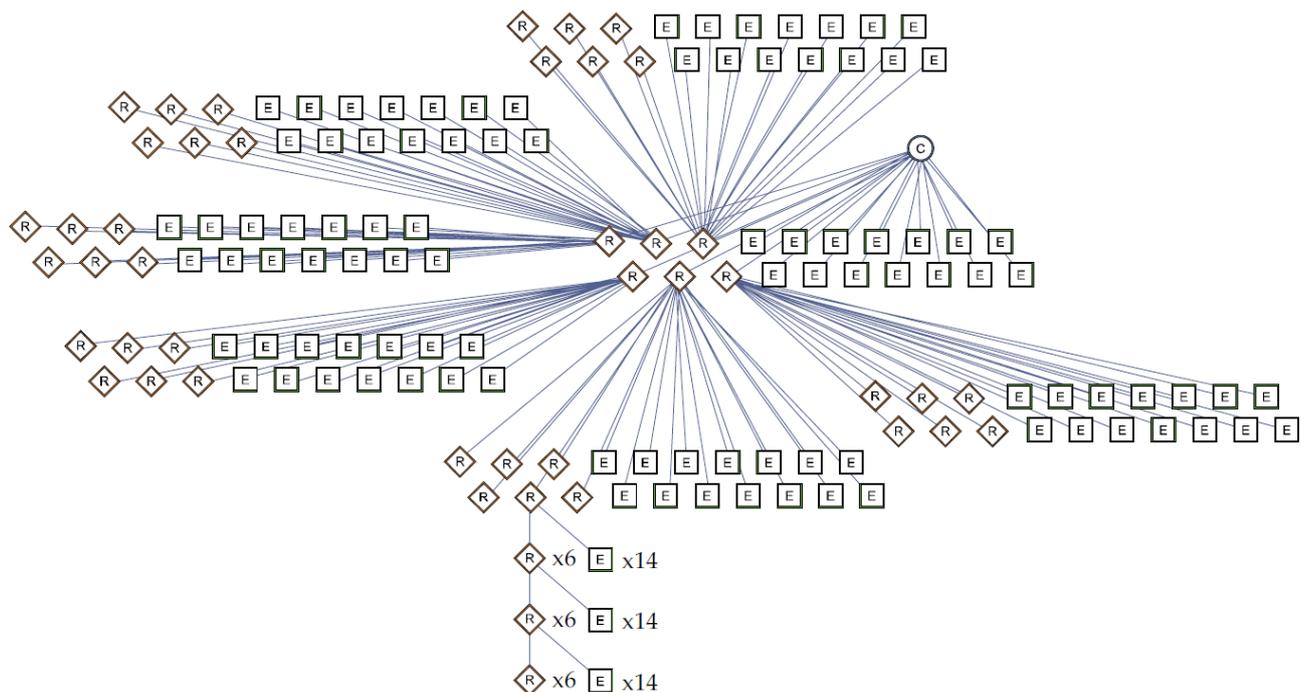


FIGURA 9 – Máxima abrangência da rede ZigBee (MAXSTREAM, 2006).

O coordenador é o dispositivo que irá criar e manter a rede de comunicação. Ele define um número único para a rede de comunicações, chamado PAN ID. Este valor é um número de 16 bits que define os limites da rede. O coordenador periodicamente busca e associa dispositivos com o mesmo PAN ID da rede ou dispositivos com PAN ID genérico 0. Neste caso, o coordenador modifica um PAN ID temporário do dispositivo chamado OPERATION ID para assumir o valor do PAN ID. Uma vez que o OPERATION ID é um valor de 64 bits, ele permite que dois coordenadores com mesmo PAN ID possam coexistir na mesma área de abrangência da rede, resolvendo a ambiguidade da comunicação.

Somente é permitida a existência de um coordenador por rede, e este não pode entrar em estado *sleep*.

O roteador é um dispositivo da rede com funções mais restritas que o coordenador. Ele não é capaz de criar redes, mas pode admitir outros dispositivos na rede, como o coordenador. Ele também é responsável por interconectar outros roteadores e *end devices*, criando caminhos para o roteamento dos pacotes por dentro da rede; por esta razão, ele também não pode entrar em modo *sleep*.

O *end device* é o dispositivo com menor funcionalidade na rede. *End devices* podem se comunicar com o coordenador e com roteadores, porém não podem comunicar-se diretamente com outros *end devices* (os pacotes devem ser roteados

por um roteador ou pelo coordenador). Além disso, eles também não podem associar outros dispositivos na rede. Uma vez que os roteadores mantêm a informação dos *end devices* disponíveis, eles podem entrar em modo *sleep*, sendo configurados para ativarem-se quando contatados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa inicial consistiu em uma pesquisa de mercado para verificação de possíveis modelos de balanças automotivas já existentes.

Após definida a meta de trabalho voltou-se a pesquisa para funcionamento de células de carga e da transmissão sem fio via ZigBee.

O módulo XBee foi utilizado, pois possui todas as características necessárias ao desenvolvimento do projeto.

O *hardware* e o *firmware* foram projetados e desenvolvidos no Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) e a estrutura mecânica e os testes de funcionamento do protótipo foram realizados no Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica (DAMM), ambos pertencentes ao *campus* Florianópolis, no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC).

A balança possui três tipos de estações adaptadas para funções específicas: o controlador do sistema, os *pads* e o *handheld*. O diagrama ilustrativo do funcionamento do sistema é apresentado na Figura 10.

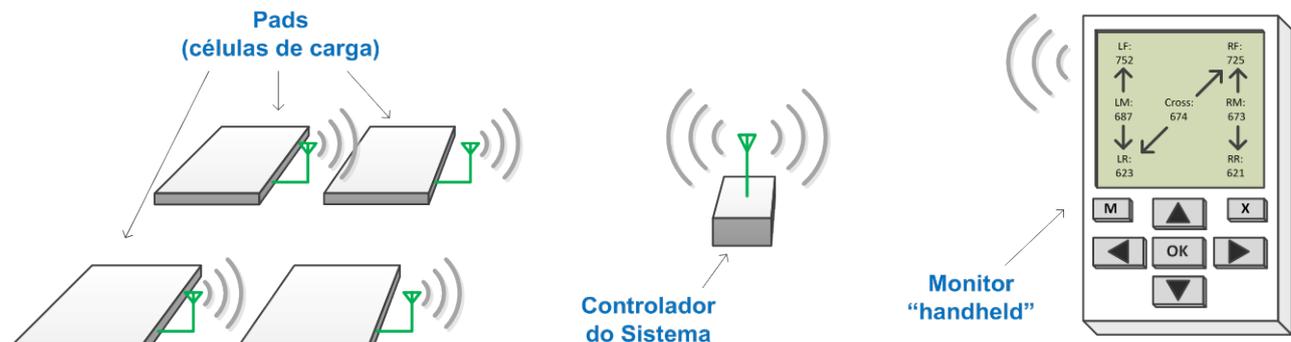


FIGURA 10 – Diagrama ilustrativo dos componentes do sistema (*pads* c/ antena + controlador do sistema + *handhelds*).

3.1. Controlador do sistema

O controlador do sistema é um dispositivo responsável por formar a rede de comunicação. Devido à sua importância, é vital que ele esteja sempre disponível de modo a manter a rede configurada. Desta forma, o dispositivo foi conectado à rede elétrica. Seu diagrama em blocos é apresentado na Figura 11.

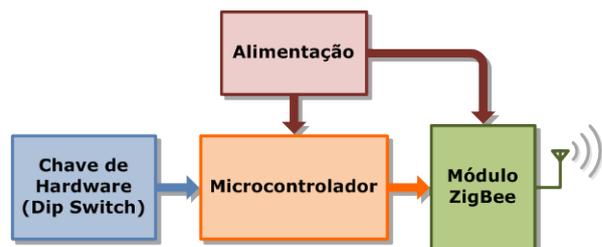


FIGURA 11 – Diagrama em blocos do controlador do sistema.

Uma vez que o sistema foi idealizado para uso em oficinas mecânicas e demais estabelecimentos comerciais com demanda variável, projetou-se o sistema de modo que mais de uma balança possam ser utilizadas simultaneamente. Logo, para cada balança em funcionamento é necessário quatro *pads*

e um *handheld*. Uma vez que o número de *handhelds* em funcionamento a cada momento é variável, faz-se necessário o uso de uma estação que faça a montagem da rede. A Figura 12 apresenta o sistema criado a partir do controlador, no qual vários subsistemas de pesagem podem coexistir.

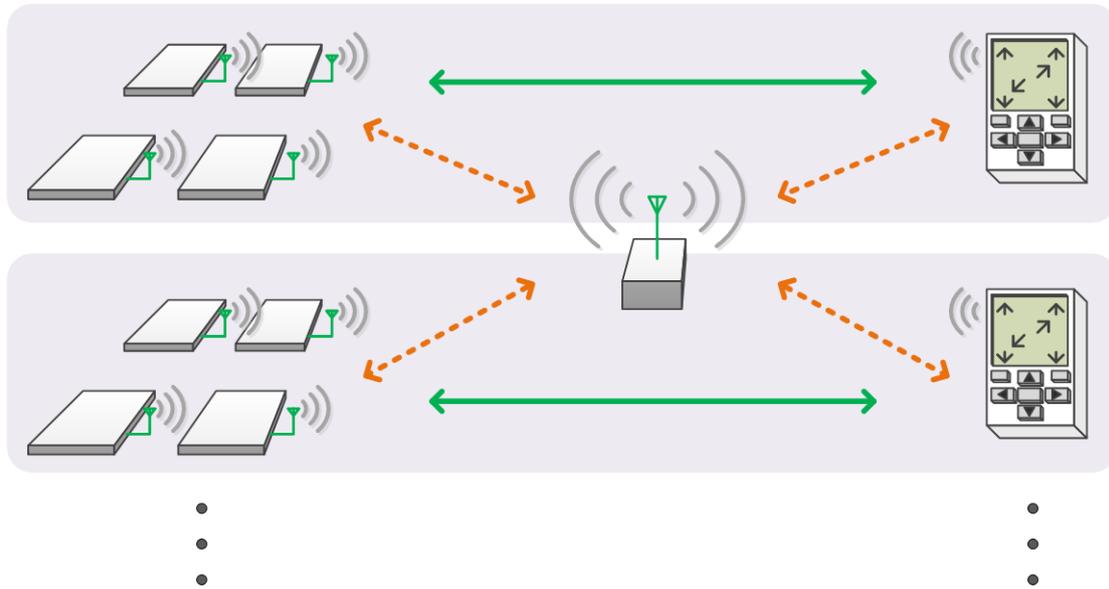


FIGURA 12 – Sistema com mais de uma balança automotiva: Estabelecimento do sistema (em linha tracejada; Fluxo de dados de cada subsistema (em linha contínua).

O controlador do sistema é a estação responsável pela criação e manutenção da rede ZigBee. Ele possui um microcontrolador ATmega328P e um módulo XBee Pro ZB com antena externa de 2,1 dBi. O controlador da rede possui um regulador de tensão interna e é alimentado através de uma fonte de 9 a 12 V.

O módulo de rádio XBee do controlador do sistema foi configurado como coordenador e, portanto, deve ser mantido energizado o tempo todo. Desta forma, quando os *pads* e os *handhelds* forem ativados, o controlador do sistema irá identificá-los automaticamente e associá-los à rede.

3.2. Pad

O *pad* é o responsável pela aquisição do sinal da célula de carga, pelo seu condicionamento e digitalização. Seu diagrama em blocos é apresentado na Figura 13.

Cada balança é formada por quatro *pads*, dois *pads* para os semi-eixos dianteiros e dois para os traseiros. Cada *pad* possui um microcontrolador ATmega328P, um módulo XBee ZB e um amplificador de instrumentação INA125. O *pad* é alimentado por uma bateria de 9 V. A alimentação da célula de carga é proveniente de um circuito baseado na referência de tensão disponibilizada pelo próprio amplificador de instrumentação.

Para melhor entendimento do *pad*, a descrição do mesmo foi dividida nas três partes abordadas na

sequência: mecânica; condicionamento de sinal; e eletrônica digital e radiotransmissão.

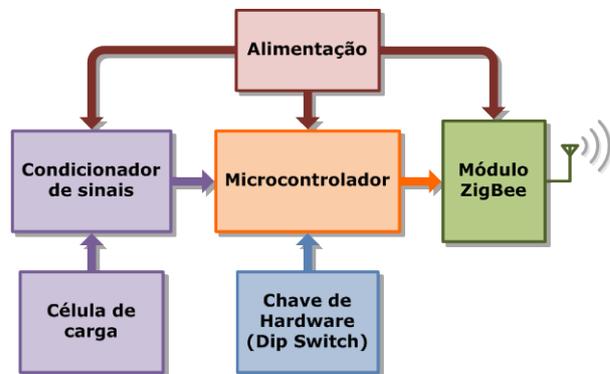


FIGURA 13 – Diagrama em blocos do pad.

3.2.1. Construção mecânica

Para servir de suporte mecânico à célula de carga, foi projetado um conjunto de chapas metálicas com capacidade para sustentar o peso do veículo.

Inicialmente, foi projetado um molde em poliuretano das duas chapas que formam a parte mecânica da balança. Com base nestas peças, foram confeccionados os moldes para a injeção de alumínio fundido, processo realizado em fundição especializada.

O *pad* é constituído por duas placas quadradas de alumínio fundido com 38 cm de lado e espessura

de 1,2 cm. Depois de montado (as duas chapas e a célula de carga) possui 6,6 cm de altura. As chapas são fixadas à célula de carga através de oito parafusos Allen de 8 mm de diâmetro. A mecânica do *pad* desenvolvido é apresentada na Figura 14.

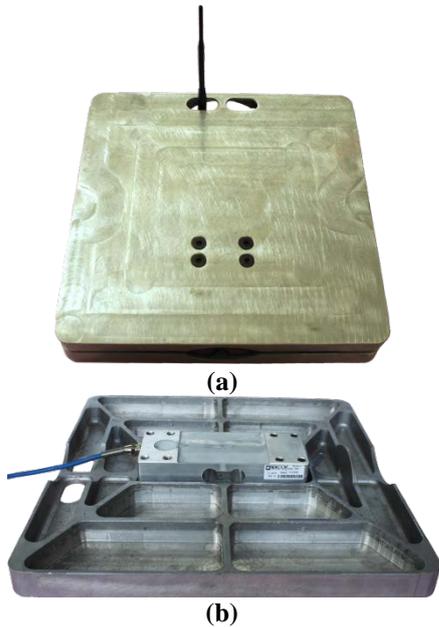


FIGURA 14 – Pad (a) completo e (b) desmontado, apenas com a célula de carga.

Em cada *pad* foi utilizada uma célula de carga da fabricante ITX, configurada em ponte de Wheatstone. Para os *pads* destinados aos semi-eixos dianteiros, foram utilizadas células de carga do tipo CZCB-700 de 700 kg, com sensibilidade de 2 mV/V, e para os *pads* destinados aos semi-eixos traseiros, foram utilizadas células de carga do tipo CZCB-500 de 500 kg, com igual sensibilidade.

3.2.2. Condicionamento e radiotransmissão

Uma vez que o sinal da célula de carga possui baixa amplitude, foi necessário realizar o condicionamento analógico do sinal através de um amplificador de instrumentação.

O amplificador de instrumentação utilizado foi o INA125. Este amplificador possui baixa alteração de sinal com aumento da temperatura, baixo consumo, especialmente em modo *sleep*. Para o protótipo, as grandes vantagens são a possibilidade de alimentação assimétrica em 9 V e referências de tensão integradas que permitem a alimentação da célula de carga.

O diagrama esquemático do circuito do amplificador de instrumentação é apresentado na Figura 15.

Após o condicionamento do sinal da célula de carga, o valor do peso é medido através do conversor analógico-digital de 10 bits do microcontrolador.

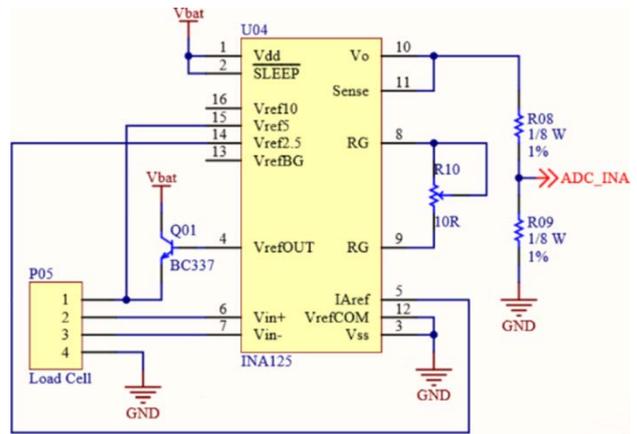


FIGURA 15 – Esquemático do circuito do amplificador de instrumentação.

O microcontrolador do *pad* foi programado para permanecer em modo *sleep*, desta forma, o *pad* otimiza o uso da bateria para máxima duração. Ao comando do *handheld*, o *pad* ativa-se e inicia uma conversão A/D. Finalizada a conversão, o *pad* responde à solicitação com o valor adquirido e retorna ao modo *sleep*.

O módulo XBee do *pad* foi configurado como *end device*.

A Figura 16 mostra o *pad* aberto com a célula de carga e o circuito de condicionamento e radiotransmissão.

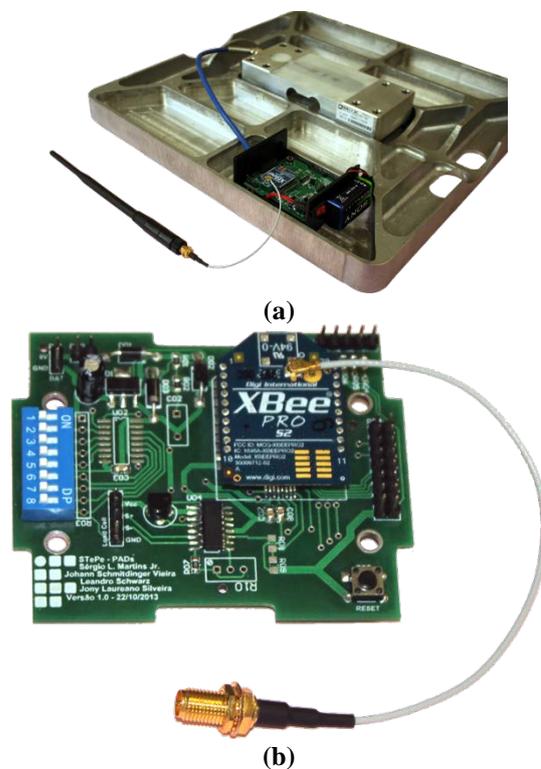


FIGURA 16 – Placa de condicionamento e radiotransmissão. (a) posicionamento do pad na placa e (b) detalhe da placa com o módulo XBee Pro.

3.3. Handheld

O *handheld* é responsável pela interface entre usuário e sistema. Seu diagrama em blocos é apresentado na Figura 17.

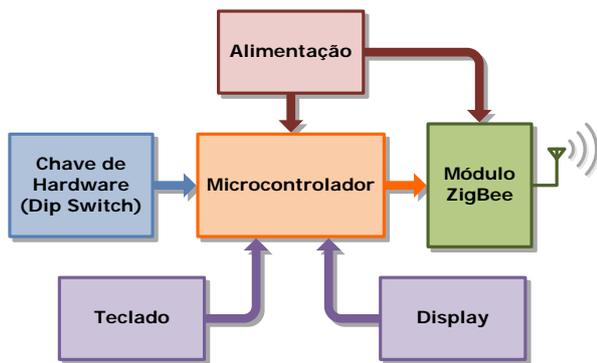


FIGURA 17 – Diagrama em blocos do *handheld*.

Cada balança possui um *handheld*, composto por um microcontrolador ATmega328P, um módulo XBee, um *display* LCD gráfico e sete botões de comando. Desta forma, as funcionalidades do sistema são acessadas pelo usuário através do *handheld*. Quando o sistema está em funcionamento o *handheld* é o responsável por solicitar aos *pads* o valor do peso em cada semi-eixo. Ao receber os dados, ele os processa e os converte em peso de eixos, peso diagonais e peso total, informando-os ao usuário no *display* LCD.

O sistema foi projetado para permitir o intercâmbio entre *handhelds* e *pads*. Logo, há uma configuração no *handheld* que permite ao usuário informar ao sistema qual *pad* está posicionado em cada semi-eixo do veículo. Visando a facilidade de utilização do sistema, a última configuração utilizada é gravada na memória do *handheld* e carregada automaticamente quando o mesmo é ativado.

O controlador do sistema identifica os *handhelds* e *pads* automaticamente no momento em que são acionados e os associa à rede, destinando-os o mesmo PAN ID. Desta forma, várias balanças podem ser utilizadas simultaneamente no mesmo ambiente. Quando o *pad* é destinado a um *handheld*, o controlador do sistema guarda a informação que o *pad* já está em uso. Em intervalos de tempo definidos, *pads* e *handhelds* informam ao controlador do sistema seu estado de funcionamento, desta forma, se a balança for desativada, o controlador libera os *pads* para uso por outro *handheld*.

3.4. Firmware

3.4.1. Microcontrolador

A programação do microcontrolador ATmega328P foi realizada através do *software*

AVR Studio 4.1 da Atmel e a gravação do *firmware* foi feita com o *software* AVRdude-GUI.

Para acelerar o desenvolvimento do *firmware* do microcontrolador foi utilizada a biblioteca Library Source (LS) da R2R Tecnologia, empresa júnior do Departamento Acadêmico de Eletrônica. A biblioteca foi criada e é mantida pela empresa júnior como parte de um projeto *open-source*.

3.4.2. XBee

Para a programação dos módulos XBee foi utilizado o *software* da Digi X-CTU. Para gravação dos *firmwares* nos módulos XBee através do *software*, foi utilizado o *kit* de desenvolvimento CON-USBBEE XPlus da Rogercom, apresentado na Figura 18.

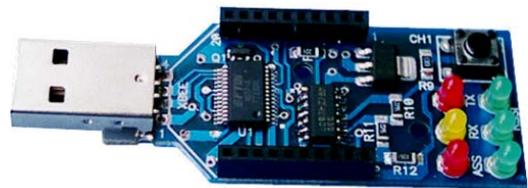


FIGURA 18 – Adaptador CON-USBBEE utilizado para gravação dos *firmwares* nos módulos XBee.

O X-CTU permite a gravação de *firmwares* tanto em modo de operação AT quanto em modo API em todos os modelos de módulos XBee ZB. O *firmware* gravado já possui a função específica de coordenador, roteador ou *end device*. Além disso, o *software* permite ao usuário fazer as configurações iniciais dos *firmwares* através de uma interface gráfica amigável. Ressalta-se também, que todas as configurações que o *software* realiza também podem ser feitas remotamente através de comandos AT ou API dos próprios elementos da rede.

Optou-se gravar os *firmwares* em modo de operação API em todas as estações do sistema, uma vez que a rede de comunicação mínima possui seis estações (um controlador do sistema, um *handheld* e quatro *pads*).

Desta forma, para permitir a melhor utilização do modo de operação API, desenvolveu-se uma biblioteca, em linguagem C, com funções específicas para configuração e tratamento dos pacotes de dados recebidos e enviados pelos rádios XBee.

A biblioteca desenvolvida integra-se à biblioteca LS, formando o módulo LS_ZigBee, especializado no trabalho com módulos XBee que suportem protocolo de comunicação ZigBee através de pacotes API. A formação de um pacote API é ilustrada na Figura 19.

Por ser responsável por criar e manter a rede do sistema utilizou-se no módulo XBee do controlador do sistema um *firmware* de coordenador.

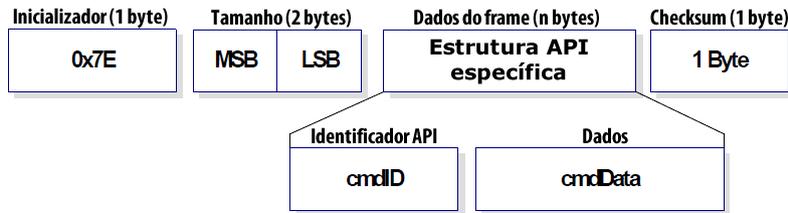


FIGURA 19 – Estrutura básica de um pacote API. Modificado de Digi (2003).

É responsabilidade do coordenador adicionar novos módulos a rede e retirar algum possível módulo que não deveria estar incluso no sistema.

Devido à importância de se economizar energia nos *pads*, para diminuir o intervalo entre a troca de baterias dos mesmos, foi empregado nesses módulos a configuração de *end device*. Desta forma, entre os intervalos de aquisição de dados e transmissão de pacotes, os *pads* podem entrar em modo *sleep*.

O *handheld* precisa se comunicar tanto com o controlador quanto com os *pads*, para rotear as informações do sistema. Portanto, foi escolhido para esta estação, o *firmware* roteador.

4. RESULTADOS

Após a montagem de cada um dos componentes já citados, passou-se aos testes de funcionamento dos blocos e de integração do sistema.

4.1. Pads de pesagem

Os primeiros testes nos *pads* foram feitos apenas com a célula de carga e o condicionamento de sinal, desconsiderando, assim, o circuito de radiotransmissão. Os *pads* foram calibrados usando-se um conjunto de pesos previamente conhecidos. A Figura 20 mostra a roda de um veículo de passeio sobre o *pad* no momento do teste de medição após a calibração.



FIGURA 20 – Roda posicionada sobre o *pad* durante o teste da célula de carga.

4.2. Rede

Para o teste da rede de comunicação, foi utilizado um osciloscópio MSO-2014B, conectado na USART entre o rádio e o microcontrolador do *handheld* e do *pad*. A Figura 21 apresenta uma imagem dos pacotes sendo transmitidos pelos rádios aos microcontroladores.

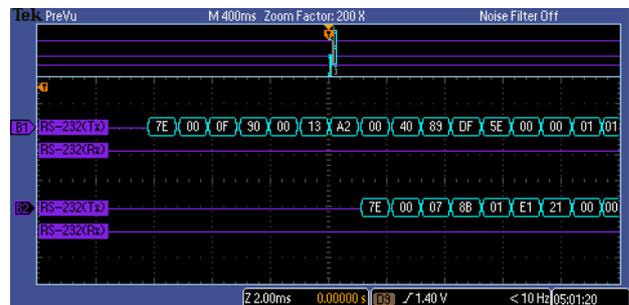


FIGURA 21 – Imagem do osciloscópio apresentando a comunicação USART entre o módulo de rádio e microcontrolador do *handheld* (B1) e do *pad* (B2).

O *handheld* é o responsável por solicitar os dados dos *pads* e concentrá-los para gerar os valores de peso desejados. Isto é feito através de um protocolo desenvolvido para o projeto baseado em um conjunto de comandos e suas respostas. Por exemplo, quando o *handheld* deseja receber os dados de um *pad*, ele envia para o seu módulo de rádio um pacote como o da Figura 22(a).

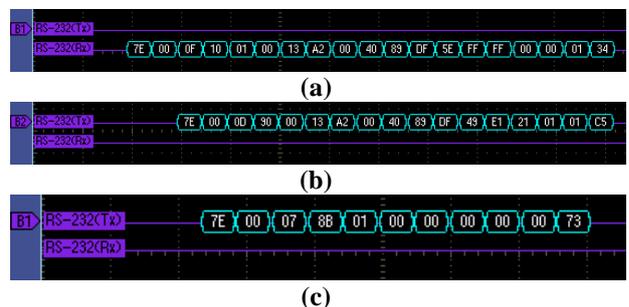


FIGURA 22 – Pacotes de dados gerados na comunicação entre *handheld* e *pad*.

Ao receber os dados, o rádio do *pad* repassa a informação ao seu microcontrolador através do pacote de dados da Figura 22(b) e uma resposta de confirmação é retornada ao *handheld* através do pacote de dados da Figura 22(c). Esta confirmação de recebimento é gerada pelos roteadores da rede

(não necessariamente pela estação destino da mensagem). Desta forma, mesmo que a estação destino esteja inacessível ou desligada, uma resposta (no caso negativa) será retornada ao *handheld*.

Ao receber o pedido de dados do *handheld*, o *pad* inicia um novo ciclo de comunicação, transmitindo o dado de peso atual de volta para o *handheld*, conforme apresentado nas Figura 23.

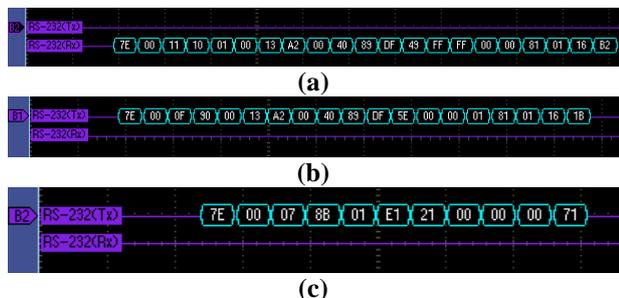


FIGURA 23 – Pacotes de dados gerados na comunicação entre *pad* e *handheld*.

O novo ciclo de comunicação inicia com o *pad* enviando uma solicitação de transmissão para o rádio com os dados a serem enviados para o *handheld* (Figura 23(a)). Na sequência, os dados são recebidos pelo *handheld*, resultando em um pacote de recepção de dados (Figura 23(b)) e em pacote de confirmação de recebimento (Figura 23(c)).

5. CONCLUSÕES

Este documento relatou o desenvolvimento de um sistema de pesagem automotiva distribuída e reconfigurável para oficinas mecânicas automotivas de pequeno, médio e grande porte, com maior ênfase no projeto dos *pads*. Foram montadas quatro balanças independentes utilizando células de carga a *strain gauges* de liga metálica para 700 e 500 kg, um monitor do tipo *handheld* com *display* gráfico, e um controlador de sistema para o estabelecimento

da rede ZigBee. Estes componentes desenvolvidos são capazes de constituir um subsistema de pesagem.

Após a execução de vários testes o sistema foi considerado funcional e atendeu às especificações propostas para este projeto.

Considera-se importante a montagem de, pelo menos mais um subsistema (outras quatro balanças e outro monitor) para verificar a segurança do sistema, bem como sua viabilidade de uso em oficinas de maior porte.

REFERÊNCIAS

DIGI. *XBee / XBee-PRO ZB RF Modules*. 2013. Disponível em <<http://digi.com/>>. Acessado em 23 mai. 2013.

FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, designs, and applications*. 3th ed. New York: Springer-Verlag, p. 64-65, 2004.

HALDERMAN, J. D. *Automotive Technology: Principles, diagnosis, and service*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2011.

MAXSTREAM. *XBee / XBee-PRO OEM RF Modules - Product Manual v8.x1x Beta - ZigBee Protocol*. 2006.

PROFORM SPECIALTY AUTO PARTS U.S.A. **5000lb Vehicle Weighing Scale**. Disponível em <http://www.proformparts.com/product-exec/product_id/280/nm/>. Acessado em 23 mai. 2013.

VISHAY PRECISION GROUPS. *Precision Strain Gages - Micro-Measurements Interactive Data Book (VMM-DB0103-1011)*. Disponível em <<http://www.vishaypg.com/docs/50003/precsg.pdf>>. Acessado em 18 jun. 2013.

WEBSTER, J.G. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC, p. 22.1-22.19, 1999.