

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**IVAN MÜLLER**

**SISTEMAS INSTRUMENTADOS PORTÁTEIS: ESFERAS  
INSTRUMENTADAS PARA SENSORIAMENTO DE FORÇAS EM  
TRÊS DIMENSÕES**

Porto Alegre

2008

**IVAN MÜLLER**

**SISTEMAS INSTRUMENTADOS PORTÁTEIS: ESFERAS  
INSTRUMENTADAS PARA SENSORIAMENTO DE FORÇAS EM  
TRÊS DIMENSÕES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletroeletrônica

ORIENTADOR: Dr. Renato Machado de Brito

Porto Alegre

2008

IVAN MÜLLER

**SISTEMAS INSTRUMENTADOS PORTÁTEIS: ESFERAS  
INSTRUMENTADAS PARA SENSORIAMENTO DE FORÇAS EM  
TRÊS DIMENSÕES**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Renato Machado de Brito, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João César Netto, Ufrgs  
Doutor pela Universidade Católica de Louvain – La Neuve, Bélgica

Prof. Dr. Eric Ericson Fabris, Ufrgs  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, Ufrgs  
Doutor pela Universidade de Stuttgart– Stuttgart, Alemanha

Prof. Dr. Marcelo Soares Lubaszewski, Ufrgs  
Doutor pelo INPG - Grenoble, França

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre, Maio de 2008.

## **DEDICATÓRIA**

À minha mãe por acreditar e incentivar sempre.

À minha esposa cujo amor e dedicação tornaram este trabalho possível.

Aos meu filhos por me inspirarem.

Aos meus irmãos por me prestigiarem.

À memória de meu pai, que certamente ficaria orgulhoso por esta conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas de mestrado pela camaradagem e apoio.

À empresa Tecnocircuit pela doação das placas de circuito impresso.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

## RESUMO

Neste trabalho foram desenvolvidos sistemas de aquisição portáteis de formato esférico, capazes de sensoriar forças de compressão e impacto ao longo dos três eixos cartesianos. Os instrumentos desenvolvidos foram utilizados em diferentes experimentos feitos em estabelecimentos de beneficiamento de frutas (*packinghouses*) durante o processo de pós-colheita a fim de verificar os danos mecânicos sofridos pelas mesmas. Os instrumentos são sistemas microcontrolados compostos por quatro sensores (acelerômetros, célula de carga, temperatura e umidade), memória Flash para o armazenamento dos dados, transceptor de rádio frequência e uma porta de comunicações serial universal (USB). A coleta, apresentação e processamentos dos dados obtidos foram feitos por um software desenvolvido em ambiente C++ para o sistema operacional Windows. Fortes forças de compressão e impacto foram registradas, sugerindo a necessidade de mudanças no processo de seleção (mecânica e manual), empacotamento e transporte de frutas. Quatro protótipos diferentes foram desenvolvidos, dois com cabos e dois sem. Os dispositivos provaram ser úteis, funcionando como esperado e o seu projeto modular permite o desenvolvimento de diferentes instrumentos. Os resultados obtidos propiciaram pesquisas relativas aos danos sofridos por frutas durante o processo de pós-colheita.

**Palavras-chaves:** Sistemas Instrumentados Portáteis, Coletores de Dados, Células de carga, Acelerômetros.

## **ABSTRACT**

In this work, spherical shape portable data acquisition systems that are capable of sensing compression and impact forces along the three Cartesian axes were developed. The developed instruments were utilized in several different experiments done in fruit packinghouses during the post harvest process in order to check the mechanical damages they suffer. They are microcontrolled systems composed by four sensors (accelerometers, load cell, temperature and humidity), Flash memory for data storage, radio frequency transceiver and a universal serial bus (USB) communication port. The download, presentation and data processing were done by developed C++ software that runs in a Windows environment. Strong compression and impact forces were recorded, suggesting a need for changes in the mechanical and manual selection, packing and transportation of fruits. Four different prototypes were developed, two corded and two wireless versions. The devices developed were proven to be useful, worked as expected and their modular design permit future developments. The results allowed for different research concerning the damages suffered by the fruits, during the post harvest process.

**Keywords: Portable Instrumented Systems, Data Loggers, Load Cells, Accelerometers.**

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>TRANSDUTORES.....</b>	<b>16</b>
2.1.1	Confiabilidade .....	16
2.1.2	Resposta no tempo.....	16
2.1.3	Largura de banda .....	16
2.1.4	Robustez .....	17
2.1.5	Características de entrada e saída .....	17
<b>2.2</b>	<b>SISTEMAS INSTRUMENTADOS .....</b>	<b>17</b>
2.2.1	Resolução .....	17
2.2.2	Retenção de dados .....	17
2.2.3	Transmissão de dados.....	17
2.2.4	Autonomia do sistema .....	18
2.2.5	Desempenho e robustez.....	18
<b>2.3</b>	<b>EXTENSÔMETROS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>ACELERÔMETROS.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>SENSORES DE TEMPERATURA E UMIDADE.....</b>	<b>23</b>
2.5.1	Sensores de umidade .....	23
2.5.2	Sensores de temperatura .....	24
<b>2.6</b>	<b>CONDICIONAMENTO DE SINAIS.....</b>	<b>26</b>
2.6.1	Amplificadores de instrumentação .....	26
2.6.2	Condicionamento de sinais de extensômetros .....	28
<b>2.7</b>	<b>MICROCONTROLADORES E MEMÓRIAS .....</b>	<b>31</b>
<b>2.8</b>	<b>BATERIAS E CONVERSORES CHAVEADOS.....</b>	<b>33</b>
2.8.1	Conversores CC/CC .....	33
2.8.2	Baterias .....	37
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>SISTEMAS INSTRUMENTADOS PORTÁTEIS.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2</b>	<b>ESFERAS INSTRUMENTADAS .....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODOS E MATERIAIS .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>ESFERAS INSTRUMENTADAS COM CABOS .....</b>	<b>51</b>
4.1.1	Projeto Mecânico .....	51
4.1.2	Fixação dos extensômetros.....	53
4.1.3	Condicionamento de sinais.....	56
4.1.4	Sistema de aquisição de dados.....	58
4.1.5	Softwares desenvolvidos .....	61

<b>4.2</b>	<b>ESFERAS INSTRUMENTADAS SEM CABOS</b> .....	<b>65</b>
4.2.1	Hardware .....	65
4.2.2	Firmware e software .....	74
4.2.3	Protótipos desenvolvidos .....	78
<b>4.3</b>	<b>PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO</b> .....	<b>80</b>
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTOS E RESULTADOS</b> .....	<b>82</b>
<b>5.1</b>	<b>ESFERAS INSTRUMENTADAS COM CABOS</b> .....	<b>82</b>
<b>5.2</b>	<b>ESFERAS INSTRUMENTADAS SEM CABOS</b> .....	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>89</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE A:</b> Diagrama esquemático do condicionador de sinais.....	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE B:</b> Diagramas esquemáticos esferas instrumentadas .....	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE C:</b> Placas de circuito impresso .....	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE D:</b> <i>Firmware</i> para o MSC 1211.....	<b>102</b>
	<b>APÊNDICE E:</b> <i>Firmware</i> para as esferas sem fios .....	<b>102</b>
	<b>APÊNDICE F:</b> Software para as esferas com e sem fios.....	<b>102</b>
	<b>APÊNDICE G:</b> Protocolo de comunicação .....	<b>102</b>
	<b>APÊNDICE H:</b> Dados de calibração das esferas com extensômetros .....	<b>102</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação gráfica de um transdutor .....	16
Figura 2: Elemento tipo viga submetido a uma força de tração .....	19
Figura 3: Diagrama esquemático de uma ponte de <i>Wheatstone</i> .....	20
Figura 4: Dois tipos de acelerômetros .....	22
Figura 5: Acelerometro capacitivo. ....	23
Figura 6: Sensor de umidade capacitivo.....	23
Figura 7: Sensor de temperatura de silício simples .....	25
Figura 8: Sensor de temperatura de silício diferencial .....	26
Figura 9: Configuração amplificadora diferencial simples .....	27
Figura 10: Configuração amplificadora diferencial (amplificador de instrumentação) .....	27
Figura 11: Diagrama de blocos do INTEL MCS-48 .....	32
Figura 12: Circuito <i>charge pump</i> dobrador simples.....	34
Figura 13: Gráfico da corrente no indutor no modo de condução contínua .....	35
Figura 14: Diagrama simplificado de um conversor tipo <i>Buck</i> .....	35
Figura 15: Diagrama simplificado de um conversor tipo <i>Boost</i> .....	36
Figura 16: Gráfico da tensão por porcentagem de descarga de um bateria NiMH .....	39
Figura 17: Comportamento da tensão e temperatura em função da carga de baterias NiMH..	41
Figura 18: Diagrama da célula de carga multiaxial.....	45
Figura 19: Condicionador de sinais de célula de carga multiaxial .....	46
Figura 20: Protótipo do IRD, desenvolvido em 1989.....	47
Figura 21: Diferentes utilizações do IRD.....	48
Figura 22: <i>Smart Spud</i> da <i>Sensor Wireless</i> .....	48
Figura 23: <i>Crackless Egg</i> da <i>Sensor Wireless</i> .....	49
Figura 24: Sensor desenvolvido por Bollen e outros.....	49
Figura 25: O <i>Spy-Cobble</i> .....	50
Figura 26: Desenho da simulação de esforço sofrido por um dos anéis da célula de carga.....	52
Figura 27: Desenho da esfera em perspectiva e em corte gerado.....	52
Figura 28: Extensômetros: problema da célula de carga em anel .....	54
Figura 29: Um dos anéis instrumentados que compõem a esfera.....	55
Figura 30: Componentes da esfera de 80 mm .....	55
Figura 31: Esfera de 80 mm montada sem as calotas.....	56
Figura 32: Protótipos de 80 e 55 mm com cabos .....	56
Figura 33: Diagrama esquemático do amplificador para a ponte de <i>Wheatstone</i> .....	58
Figura 34: Placa de circuito impresso desenvolvida para a esfera de 55 mm .....	58
Figura 35: Gráfico da carga da bateria utilizada no sistema de aquisição de dados.....	60
Figura 36: Gráfico da descarga da bateria utilizada no sistema de aquisição de dados .....	60

Figura 37: Sistema de aquisição de dados com o EVM MSC1211 .....	61
Figura 38: Diagrama de blocos simplificado do software .....	62
Figura 39: Diagrama de seqüências básico do funcionamento do sistema de aquisição.....	62
Figura 40: Diagrama de seqüências da comunicação realizada entre software e <i>firmware</i> ....	63
Figura 41: Fluxograma do algoritmo de compensação de <i>offset</i> .....	64
Figura 42: Imagem da interface gráfica do software para análise de compressão .....	64
Figura 43: Diagrama de blocos da esfera instrumentada sem cabos .....	65
Figura 44: Placa de sensores.....	67
Figura 45: Método <i>ShockBurst</i> para redução de consumo e colisões no ar .....	70
Figura 46: Gráfico do processo de carga das baterias de NiMH .....	72
Figura 47: Gráfico do processo de descarga das baterias de NiMH.....	73
Figura 48: Gráfico da tensão de saída do conversor <i>Charge Pump</i> .....	73
Figura 49: Gráfico da tensão de saída do conversor <i>Buck</i> .....	74
Figura 50: Diagrama de seqüências do sistema de aquisição (esfera sem fios) .....	76
Figura 51: Tela gráfica de registro do software.....	77
Figura 52: Tela gráfica de configuração do software .....	78
Figura 53: À direita o protótipo da esfera aberta e à esquerda, fechada.....	78
Figura 54: Esfera instrumentada com extensômetros sem fios .....	79
Figura 55: Adaptador USB-RF.....	79
Figura 56: Protótipo do sistema de aquisição de dados sem fios em detalhe .....	79
Figura 57: Procedimento de calibração das células de carga .....	80
Figura 58: Esfera colocada no interior de uma caixa a ser preenchida .....	83
Figura 59: Formação de <i>pallet</i> com a esfera no interior de uma das caixas.....	83
Figura 60: Gráficos das compressões sofridas pela esfera no interior de uma caixa de frutas	84
Figura 61: Experimento realizado no “cocho” de seleção de laranjas .....	85
Figura 62: <i>Pallet</i> sendo transportado com o auxílio de uma <i>palleteira</i> .....	86
Figura 63: Mudança dos valores de compressão durante o transporte do <i>pallet</i> .....	86
Figura 64: Deformações devido ao excesso de compressão sofrida por laranjas em um silo..	87
Figura 65: Experimento realizado com o sistema de aquisição de dados .....	88
Figura 66: Possível redução do tamanho ocupado pelos dados adquiridos.....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre as memórias de tecnologia NAND ou NOR .....	33
Tabela 2: Comparação entre conversores CC/CC. ....	36
Tabela 3: Comparação entre baterias 1.....	38
Tabela 4: Comparação entre baterias 2.....	38
Tabela 5: Parâmetros do transdutor de esforço utilizado, marca Kyowa. ....	53
Tabela 6: Valores de resistência dos extensômetros obtidos após fixação.....	54
Tabela 7: Características do amplificador de instrumentação INA118.....	57
Tabela 8: Características do amplificador de instrumentação MAX4460.....	57
Tabela 9: Principais características do EVM MSC1211 .....	59
Tabela 10: Principais características do microcontrolador utilizado.....	66
Tabela 11: Tempos e consumo típicos da memória <i>Flash</i> . ....	68
Tabela 12: Principais características do transceptor de RF .....	69
Tabela 13: Consumo por dispositivo (teórico). ....	71
Tabela 14: Consumo por placa (medido). ....	72
Tabela 15: Comandos de gerência do ADC implementados.....	75
Tabela 16: Comandos de gerência do link de rádio implementados .....	76
Tabela 17: Comandos de operação implementados. ....	76
Tabela 18: Não linearidades obtidas.....	81
Tabela 19: Resumo dos protótipos construídos.....	90
Tabela 20: Comparação entre as diferentes esferas instrumentadas.....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS

ADC: *Analog to Digital Converter*  
BCD: *Binary Coded Digit*  
CA: *Corrente Alternada*  
CC: *Corrente Contínua*  
DAC: *Digital to Analog Converter*  
DIP: *Dual In-Line Package*  
DTR: *Data Terminal Ready*  
E<sup>2</sup>PROM: *Electrically Erasable Programmable Read-only Memory*  
ECG: *Eletro Cardiograma*  
EVM: *Evaluation Module*  
FHSS: *Frequency Hopping Spread Spectrum*  
GFSK: *Gaussian Frequency Shift Keying*  
GPS: *Global Positioning System*  
I<sup>2</sup>C: *Inter-integrated circuits*  
ID: *Identification*  
IDE: *Integrated Development Environment*  
IEE: *Instrumentação Eletro-eletrônica*  
IP: *Ingress Protection*  
IRdA: *Infra-red Data Access*  
MEMS: *Micro Electrical-Mechanical System*  
NiMH: *Nickel Metal Hydride*  
OCX: *Ole Control Extended*  
PC: *Personal Computer*  
PDA: *Personal Data Assistance*  
PGA: *Programmable Gain Amplifier*  
PPGEE: *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*  
PWM: *Pulse Width Modulation*  
RF: *Rádio Frequência*  
ROM: *Read Only Memory*  
RTC: *Real Time Clock*  
SNR: *Signal-to-Noise Ratio*  
SOT: *Small Outline Transistor*  
SPI: *Serial Peripheral Interface*  
UR: *Umidade Relativa*  
USART: *Universal Synchronous-Asynchronous Receiver Transmitter*  
USB: *Universal Serial Bus*  
VCL: *Visual Component Library*  
XML: *eXtensible Markup Language*



## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da microeletrônica, a miniaturização dos dispositivos eletrônicos, de consumo ou industriais, é cada vez maior. Esta característica, aliada à portabilidade, à grande autonomia e a funcionalidades como interface gráfica e memória interna, faz com que não sejam mais aceitos produtos eletrônicos volumosos e pesados. Diversas áreas beneficiaram-se da miniaturização da eletrônica e em todas as linhas de produção empregam-se dispositivos cada vez mais compactos. A agricultura de precisão, uma das áreas beneficiadas com os avanços da eletrônica, é muito importante nos dias atuais especialmente para o Brasil que é um dos maiores produtores agrícolas mundiais. Diversas técnicas estão sendo empregadas com o intuito de maximizar a produção de alimentos incluindo-se a redução de desperdício que ocorre nas mais diversas etapas do processo agrícola, desde a colheita até a disponibilização para consumo.

As perdas de frutas, hortaliças e flores após a colheita são atribuídas a muitos fatores: ocorrência de podridões, senescência acelerada ou perda de qualidade visual ou gustativa. Em muitos dos casos de descarte de produtos hortícolas, a causa primária pode ser atribuída a danos mecânicos. Impactos e compressões, às vezes não visíveis, resultam em oportunidades para o estabelecimento de fungos ou bactérias sendo então estes últimos considerados como causas primárias. Esta dedução levou e leva ainda para a recomendação de aplicação de tratamentos com agroquímicos após a colheita para diminuir as perdas. Tratamentos com fungicidas estão sofrendo cada vez mais restrições de uso por parte dos consumidores. Por outro lado, o uso indiscriminado de fungicidas tem resultado em perda de eficiência dos tratamentos, principalmente pelo surgimento de raças resistentes de patógenos (OSTER *et al.*, 2006), como é o caso da resistência aos benzimidazóis, composto químico biocida utilizado em agrotóxicos. Combater as causas primárias é então uma forma de diminuir o problema das perdas. Para tanto têm sido desenvolvidos instrumentos que possam quantificar estes danos (BOLLEN, 2006).

As estimativas de perdas apresentam valores muito diferentes dependendo das espécies, mas, de uma maneira geral, há concordância de que passam dos 20% ao longo da cadeia pós-colheita no Brasil (SANHUEZA, 2004) e estes são descartes ao qual não se dá nenhuma utilidade. No entanto, temos as perdas que são infligidas (e que não resultam em descarte) por manuseios inadequados. Entre estes, podem ser citados os impactos que o produto recebe na colheita como, por exemplo, queda ao chão e tombo na caixa de colheita, batimentos no transporte da área de produção até a área de preparo para comercialização, na classificação (com ou sem uso de máquina classificadora) e no transporte até os centros de comercialização (atacado e varejo). Em muitos dos casos, é um somatório de danos que vem se acumulando desde a colheita (DESMET *et al.*, 2004). Afora o problema de danos visíveis, há aqueles danos causados principalmente por compressão e que não resultam em uma mancha facilmente observável a olho nu. Normalmente são danos que atingem extensões apreciáveis do tecido subepidérmico. São conjuntos de células que tem seu metabolismo alterado e que afetam o metabolismo de tecidos não atingidos pelo dano mecânico. Esta situação resulta em perda de componentes importantes, vitamina C, por exemplo (LEE; KADER, 2000).

Com o intuito de contribuir para a diminuição de perdas de frutas, desenvolveu-se este trabalho no qual são propostas quatro esferas instrumentadas diferentes (pseudofrutas) para quantificar os impactos e compressões sofridas por frutas durante o processo de colheita, seleção e transporte das mesmas. O emprego da tecnologia necessária para o desenvolvimento das esferas instrumentadas também é objeto de estudo deste trabalho assim como a análise de dispositivos portáteis atuais.

O trabalho proposto iniciou-se com o desenvolvimento de células de carga com extensômetros de formato esférico para quantificar as forças de compressão sofridas por frutas. Como meta final, objetivou-se o desenvolvimento de esferas autônomas (sem fios) e cuja plataforma pudesse ser utilizada como base para o desenvolvimento de futuros instrumentos portáteis.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo dois é apresentada uma revisão teórica relativa às técnicas e dispositivos empregados e no capítulo três, a revisão de literatura relativa aos temas apresentados. No capítulo quatro apresenta-se o desenvolvimento das esferas instrumentadas com e sem cabos. No capítulo cinco apresentam-se os resultados obtidos nos experimentos realizados e no capítulo seis, possíveis trabalhos futuros. As conclusões são apresentadas no capítulo sete.

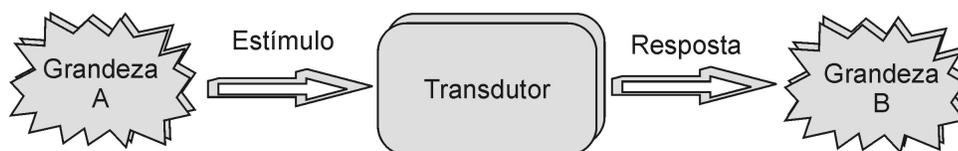
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresentam-se os fundamentos teóricos relativos aos conceitos e técnicas empregadas neste trabalho. São abordados temas relativos à instrumentação eletroeletrônica e aos dispositivos eletrônicos utilizados.

### 2.1 TRANSDUTORES

Transdutor é um dispositivo, elétrico ou não, que converte um estímulo (sinal de entrada) em uma resposta (sinal de saída) proporcional, adequada à transferência de energia, medição ou processamento da informação. Em geral, o sinal de saída é uma grandeza física diferente do sinal de entrada. O sinal de saída é utilizado para que se possa saber a magnitude entre outras características da primeira energia (BORCHARDT; ZARO, 1981). A Figura 1 ilustra o comportamento de um transdutor.

As características principais de um transdutor são escolhidas de modo a satisfazer as necessidades do sistema instrumentado. Nas subseções a seguir, algumas das principais características são descritas.



**Figura 1: representação gráfica de um transdutor.**

#### 2.1.1 Confiabilidade

Espera-se que um transdutor, sensor ou atuador, seja capaz de converter a energia de entrada na de saída sem falhar ao longo do tempo. Fatores como exposição a intempéries podem reduzir a confiabilidade de um transdutor. O fator IP (*Ingress Protection*) quantifica a suscetibilidade de um equipamento com relação a características como incidência de poeira e água no mesmo.

#### 2.1.2 Resposta no tempo

Um transdutor deve modificar sua saída imediatamente após a uma modificação do estímulo de entrada, não apresentando atrasos de transporte significativos. Na prática todo transdutor apresenta alguma característica com relação à resposta no tempo, como atrasos de transporte.

#### 2.1.3 Largura de banda

Um transdutor deve produzir como resposta todas as características do estímulo em toda a sua gama de frequências. No entanto ressonâncias e não linearidades na curva de resposta

são comuns e fazem com que a grandeza observada com o uso de um transdutor possa apresentar-se distorcida.

#### **2.1.4 Robustez**

Um transdutor sensor deverá suportar as condições ambientais que ocorrem no local da grandeza a ser medida, não alterando suas características ao longo do tempo. Quanto mais robusto um transdutor é, mais confiável e seguro.

#### **2.1.5 Características de entrada e saída**

As características de entrada e saída de um transdutor atuador ou sensor devem ser as melhores possíveis, ou seja, sensibilidade de entrada máxima e ótima característica de saída. Em um sistema ideal, o transdutor sensor elétrico teria sensibilidade de entrada infinita a fim de não alterar as características da grandeza a ser captada. A impedância de saída deveria ser idealmente nula para a resposta pudesse ser registrada por qualquer tipo de dispositivo indicador (mecânico, elétrico ou eletrônico).

### **2.2 SISTEMAS INSTRUMENTADOS**

Vários parâmetros devem ser considerados no desenvolvimento ou utilização de sistemas instrumentados. Nas subseções a seguir estão descritos alguns dos principais.

#### **2.2.1 Resolução.**

É definida como a menor variação detectável do estímulo. Como na maioria dos sistemas atuais, as grandezas capturadas pelos transdutores são digitalizadas, a resolução do sistema de digitalização deverá ser coerente com o grau de acuidade que se deseja (OPPENHEIM; SCHAFER, 1989). A taxa de amostragem do sinal a ser digitalizado também é um parâmetro relevante para a escolha ou projeto do sistema, pois deverá ser de no mínimo duas vezes a máxima frequência do sinal a ser digitalizado (frequência de Nyquist).

#### **2.2.2 Retenção dos dados.**

Após a digitalização dos sinais analógicos oriundos dos sensores, os dados obtidos poderão ser transmitidos imediatamente a um dispositivo hospedeiro ou poderão ser guardados em algum tipo de memória para posterior coleta. Com relação à retenção dos dados obtidos, deve-se levar em conta, entre os diversos parâmetros, a quantidade de memória disponível, a velocidade de escrita e leitura, o número máximo de escritas e leituras, o tempo de retenção dos dados e o consumo de energia do dispositivo de memória.

#### **2.2.3 Transmissão dos dados.**

Os dados obtidos por um instrumento, armazenados internamente ou não, normalmente são coletados por um dispositivo hospedeiro, como um PC (*Personal Computer*) ou PDA (*Personal Data Assistant*). Com relação à transmissão dos dados adquiridos, os parâmetros mais comumente quantificados são a velocidade de transmissão e recepção, o uso ou não de cabo de coleta e o alcance do sistema de coleta, no caso de dispositivos de aquisição de dados sem fios.

#### 2.2.4 Autonomia do sistema.

Sistemas portáteis são normalmente alimentados à bateria. A tecnologia da bateria bem como a tecnologia do dispositivo em si definem a autonomia do sistema. Os dispositivos eletrônicos atuais consomem menos energia que os antigos e equipamentos de grande autonomia são produzidos atualmente aliando-se um bom projeto eletrônico (no que se refere ao consumo) a uma bateria de tecnologia moderna. Os parâmetros físico-químicos da bateria empregada no sistema são relevantes na autonomia além de definirem a longevidade e características como tempo de carga, auto-descarga e ciclagem (MICROCHIP, 2007).

#### 2.2.5 Desempenho e robustez.

Deseja-se que os equipamentos portáteis sejam bastante robustos, pois estarão sujeitos a quedas, à umidade e outras intempéries. Sendo assim, detalhes como vedação, resistência a impactos, ao calor excessivo devem ser considerados.

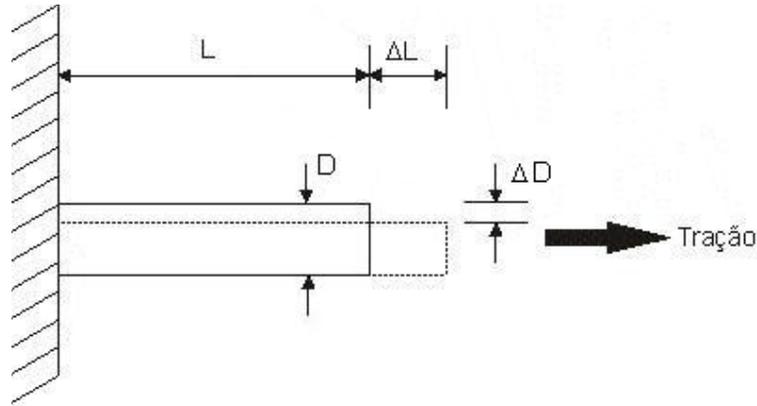
### 2.3 EXTENSÔMETROS

Os extensômetros (*Strain Gages*) são sensores de deformação mecânica baseados em transdutores que tem resistência elétrica variável de acordo com a deformação mecânica, compressão ou tração que sofrem (BORCHARDT; ZARO, 1981). A variação da resistência elétrica dos condutores em função da sua deformação é conhecida desde 1856, ano em que Lord Kelvin constatou este fenômeno em seu laboratório na Inglaterra.

Desde a sua descoberta até hoje, os extensômetros evoluíram na forma como são construídos, sendo hoje sensores de deformação com característica vetorial. Podem indicar intensidade, direção e sentido de um deformação mecânica. Atualmente estes dispositivos são utilizados em sensores de tração, compressão, torque e pressão, empregados nos mais diversos tipos de equipamentos.

Quando um material é submetido a um esforço mecânico, ocorre a expansão ou contração do mesmo. O extensômetro é afixado a superfície do material que irá contrair-se ou expandir-se e estas solicitações mecânicas serão replicadas à estrutura do extensômetro. A intensidade da variação da resistência elétrica do extensômetro é proporcional à intensidade da solicitação mecânica realizada no material. Ao material submetido aos esforços mecânicos dá-se o nome de 'elemento mola' e suas características físicas como elasticidade e coeficiente de Poisson são consideradas no projeto de um transdutor de força.

Na Figura 2, um elemento de comprimento  $L$  e resistência elétrica  $R$  sofrerá uma deformação  $\epsilon$  (*strain*), se uma força de tração ou compressão for aplicada ao mesmo. Neste caso a tração foi aplicada a uma barra fixada em uma das extremidades ou viga engastada.



**Figura 2: elemento tipo viga submetido a uma força de tração.**

As variações dimensionais transversais e longitudinais do elemento mola são correlacionadas e possuem valores específicos que dependem do material submetido ao estresse mecânico. O coeficiente de acoplamento entre as variações dimensionais é chamado de coeficiente de Poisson e é definido da seguinte forma:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta D}{D} \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = -\nu \varepsilon_l \quad (3)$$

, onde  $\varepsilon_l$  é o coeficiente de variação dimensional longitudinal,  $\varepsilon_t$  é o coeficiente de variação dimensional transversal e  $\nu$ , o coeficiente de Poisson. Este coeficiente, varia entre 0 e 0,5 para a maioria dos materiais, excetuando os materiais auxéticos, cujo coeficiente é negativo.

A resistência elétrica de um condutor é função de seu comprimento e área da seção reta. Logo, se o comprimento do condutor aumentar e se sua seção diminuir, a resistência elétrica aumentará, conforme a equação:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4)$$

, onde  $\rho$  é a resistividade de um condutor,  $l$ , seu comprimento e  $A$ , a área de seção transversal.

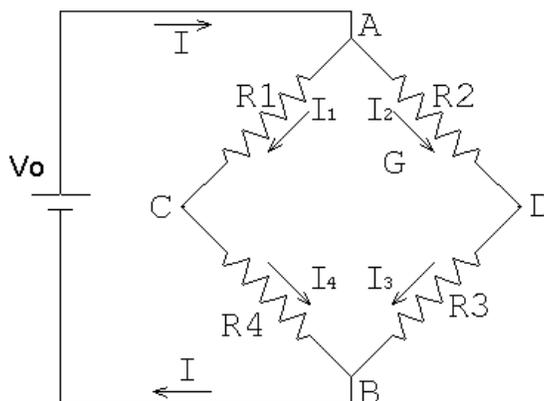
Correlacionando estes parâmetros, o fator *Gage*, parâmetro que é utilizado para quantificar extensômetros, é definido por:

$$Gage = \frac{\frac{\partial R}{\partial L}}{\frac{R}{L}} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{\partial \rho}{\partial L}}{\frac{\rho}{L}}$$

(5)

Os valores de deformação sofridos pelo elemento mola são pequenos e normalmente expressos pela razão micrometros por metro,  $\mu\epsilon/\epsilon$ . Como consequência das pequenas variações da deformação, ocorrem pequenas variações da resistência do extensômetro, da ordem de 0,1 a 0,3 % do valor nominal. Um valor típico de resistência é de  $120\Omega$  para cada extensômetro, logo, variações de  $0,36\Omega$  ocorreriam. Como estas variações são muito pequenas, utiliza-se normalmente o circuito ponte de *Wheatstone* para o uso prático dos extensômetros (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1984).

O circuito ponte de *Wheatstone* é utilizado para medir resistências elétricas cuja variação seja pequena. Esta medição é feita de forma indireta, medindo-se a tensão no centro da ponte, que varia conforme o desbalanço da mesma. Analisando a Figura 3, os pontos A e B é onde a excitação, de tensão ou corrente constantes ou alternadas, é inserida na ponte, e os pontos C e D, o sinal de saída da ponte. A variação de alguma das quatro resistências que compõem a ponte de *Wheatstone* provocará uma variação do sinal de saída, nos pontos C e D.



**Figura 3: diagrama esquemático de uma ponte de *Wheatstone*.**

A equação que define a relação da tensão de saída de uma ponte pela excitação é mostrada em (6), onde  $S$  é a sensibilidade da ponte,  $\Delta R$  a variação da resistência da ponte e  $i$  o índice que quantifica o número de elementos ativos, ou variáveis da ponte, variando de um a quatro.

$$\frac{\Delta V_o}{V_i} = S \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i} (-1)^{i+1} \quad (6)$$

A sensibilidade da ponte,  $S$ , para uma variação  $\Delta R$  de  $R$  é dada por:

$$S = S_o \frac{(1 + \alpha)}{(1 + \beta + \gamma)} \quad (7)$$

onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são definidos por:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{\Delta R1 \Delta R3}{R1 R3} - \frac{\Delta R2 \Delta R4}{R2 R4}\right)}{\left(\sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{r_i} (-1)^{i+1}\right)} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{(1+B)^2} \left( B \frac{\Delta R1}{R1} \frac{\Delta R3}{R3} + B^2 \frac{\Delta R1}{R1} \frac{\Delta R4}{R4} + B^2 \frac{\Delta R2}{R2} \frac{\Delta R3}{R3} + B \frac{\Delta R2}{R2} \frac{\Delta R4}{R4} \right) \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{1}{1+B} \left( \frac{\Delta R1}{R1} + B \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} + \frac{\Delta R4}{R4} \right) \quad (10)$$

B é a razão entre as resistências que formam a ponte, sendo este valor igual a um se as resistências são iguais entre si.

Com relação ao ruído e estabilidade de uma ponte de *Wheatstone*, diversas técnicas são empregadas, entre elas a excitação em corrente alternada. Quando empregadas em células de carga, as pontes poderão ter os quatro elementos ativos, dois ou somente um e, quanto menor o número de elementos ativos, menor a sensibilidade da ponte. As pontes formadas por um único elemento ativo apresentam ainda o problema da variação da resistência elétrica do extensômetro em função da variação da temperatura, o que acarreta o desbalanço da mesma. Uma ponte de pelo menos dois elementos ativos, ou dois elementos, um ativo e outro passivo mas pertencente ao circuito da ponte (*dummy*), torna-a imune à variação do balanço em função da temperatura.

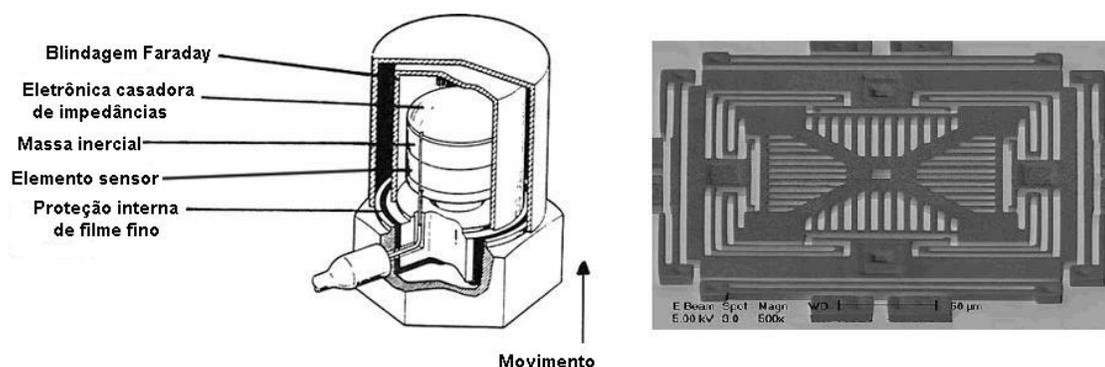
## 2.4 ACELERÔMETROS

Diversas técnicas e dispositivos são empregados para a medição da aceleração de um corpo. (DOEBELIN, 1990) descreve tipos variados de acelerômetros como os de deflexão, os sísmicos (absolutos), servo acelerômetros e sensores que medem a taxa de variação da aceleração. O interesse neste tipo de sensores é muito grande devido às inúmeras possibilidades de uso. Um exemplo de aplicação é o controle de uma frota de veículos, onde o comportamento do motorista, através da aceleração e inclinação do veículo, pode ser registrado em um *data logger* (coletor de dados) para posterior análise. Em outro exemplo, câmeras fotográficas podem mudar a configuração de uma fotografia de retrato para paisagem, captando a inclinação através de um inclinômetro.

Um tipo de acelerômetro bastante utilizado é o piezoelétrico (SENSORLAND, 2008), onde o elemento sensor é um cristal cuja propriedade de geração de cargas elétricas quando submetido a forças de compressão é utilizada. No interior do acelerômetro, o cristal é colado a uma massa de modo que o conjunto está submetido a forças  $g$  (de aceleração). O

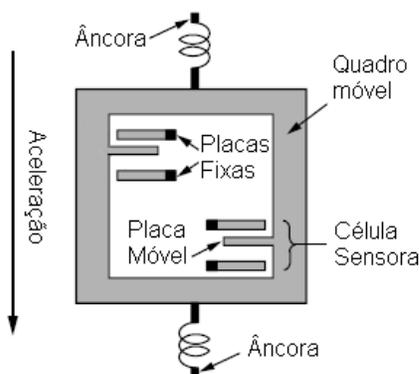
elemento sensor é encapsulado em uma caixa resistente a intempéries, geralmente de aço inoxidável, com elevado IP. Muitos acelerômetros possuem incorporados circuitos de condicionamento de sinal, conversão analógica-digital e linearização. As técnicas para a fixação dos acelerômetros ao corpo de prova são importantes pois podem suavizar o impacto se mal feitas.

Novas aplicações são hoje possíveis graças aos acelerômetros construídos com a tecnologia *MEMS* (*Micro Electrical-Mechanical System*) (MEMS, 2008). Os sistemas *MEMS* são a integração de elementos mecânicos, sensores, atuadores, e eletrônica em uma pastilha comum de silício com a tecnologia de micro-fabricação. Enquanto a eletrônica é fabricada usando processos de integração de circuitos (IC) (exemplo: CMOS, Bipolares ou BICMOS), os componentes micro-mecânicos são fabricados usando os processos compatíveis tipo "*micromachining*" que gravam seletivamente partes ausentes numa placa de silício ou adicionam camadas estruturais novas para dar forma aos dispositivos mecânicos e eletromecânicos (MEMS, 2008). Acelerômetros feitos com a tecnologia *MEMS* estão rapidamente substituindo os acelerômetros eletromecânicos convencionais em diversas áreas como nos sistemas de *air-bag* para automóveis. Os sistemas antigos utilizavam diversos dispositivos discretos montados na frente dos veículos com a eletrônica posicionada próxima ao *air-bag*, custando mais de cinquenta dólares por automóvel. A tecnologia *MEMS* tornou possível integrar o acelerômetro com a eletrônica em um único circuito integrado, custando entre cinco e dez dólares. Estes dispositivos são menores, mais funcionais e mais confiáveis, custando uma fração dos antigos acelerômetros cujos elementos mecânicos são fabricados em escala macroscópica. A Figura 4 ilustra acelerômetros macroscópicos e microscópicos.



**Figura 4:** dispositivo da esquerda é um acelerômetro de massa inercial, eixo simples, de escala macroscópica enquanto o da direita, produzido em escala microscópica é um acelerômetro de três eixos *MEMS* (fontes: [www.vibrametrics.com](http://www.vibrametrics.com), [www.analogdevices.com](http://www.analogdevices.com)).

Os acelerômetros *MEMS* mais utilizados atualmente operam pelo princípio capacitivo. A Figura 5 é um diagrama simplificado destes acelerômetros. Cada sensor inclui várias células capacitivas diferenciais. Cada célula é composta por diferentes placas conectadas ao substrato e as placas móveis, conectadas a um quadro móvel. O deslocamento deste quadro muda a capacitância diferencial que é medida pelo condicionador de sinais interno do dispositivo.



**Figura 5: diagrama simplificado de um sensor de aceleração baseado em células capacitivas.**

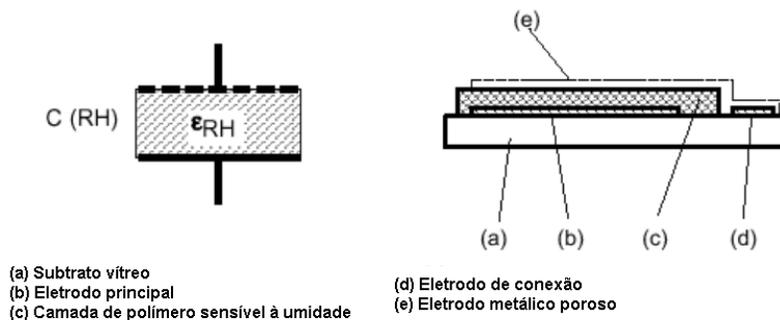
## 2.5 SENSORES DE TEMPERATURA E UMIDADE

O conhecimento da quantidade de vapor de água e da temperatura do ar é importante para operações de controle de processos assim como no armazenamento de produtos. Estas informações podem ser obtidas de diversas formas, dependendo da faixa de temperaturas e umidade a medir.

### 2.5.1 Sensores de umidade

As formas comuns de medição de umidade são a relativa (razão entre a pressão parcial da água em relação à pressão de saturação, temperatura do ponto de orvalho) e taxa de volume (partes por milhão de vapor de água por partes de ar). Atualmente, os sensores de umidade capacitivos estão substituindo outros tipos por sua simplicidade, que, aliado à integração dos dispositivos eletrônicos, possibilitou o desenvolvimento de sensores miniaturizados.

Um sensor de umidade capacitivo é feito do mesmo modo que um capacitor de placas paralelas. Uma camada de polímero é colocada entre os eletrodos metálicos e o conjunto é coberto por um substrato vítreo. A permissividade elétrica,  $\epsilon$ , do polímero depende da quantidade de água no mesmo. A Figura 6 esboça o interior de um sensor de umidade capacitivo.



**Figura 6: diagrama simplificado de um sensor de umidade capacitivo.**

A camada do eletrodo metálico poroso é feita muito fina, entre 0,1 e 1  $\mu\text{m}$  de modo a propiciar uma fácil troca com o meio externo, captando a umidade com facilidade. Normalmente não há camadas isolantes intermediárias, para que a sensibilidade seja máxima, porém com detrimento da capacitância. A capacitância de um sensor de umidade é definida por:

$$C(RH) = \frac{\epsilon_{RH} \epsilon_0 A}{d} \quad (11)$$

onde,  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo,  $d$ , a distância entre as placas paralelas,  $A$ , a área das placas e  $\epsilon_{RH}$  é a permissividade dielétrica relativa, que é dependente da umidade, variando tipicamente entre 3,0 a 3,9 quando a umidade relativa varia de 0 a 100%. Os sensores de umidade integrados modernos possuem condicionamento de sinais interno que lineariza a curva de resposta do transdutor.

### 2.5.2 Sensores de temperatura

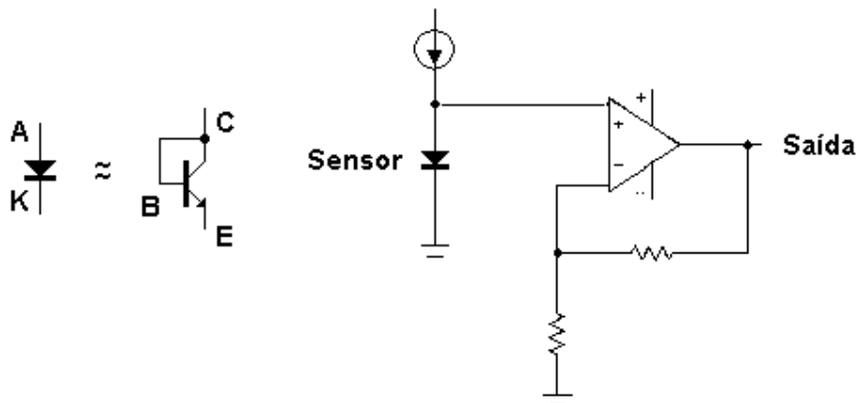
Temperatura é uma das variáveis cuja quantificação é de maior interesse em qualquer processo, devido ao fato de que os sistemas físicos, eletrônicos, químicos e biológicos são frequentemente afetados pelo calor (TSE; MORSE, 1989). Alguns processos funcionam bem somente dentro de uma estreita faixa de temperatura, como reações químicas, processos biológicos e mesmo alguns circuitos eletrônicos tem sua performance máxima dentro de uma determinada faixa de temperaturas. Quando estes processos são otimizados, sistemas de controle automático mantêm a temperatura dentro dos limites desejáveis. No caso do armazenamento e transporte de frutas, por exemplo, a longevidade destas está diretamente associada à temperatura das câmaras frigoríficas. Sensores de temperatura provêm o sinal de entrada para estes sistemas. Na eletrônica, vários tipos de dispositivos são sensíveis ao calor e devem ter suas temperaturas monitoradas, como no caso dos displays de cristal líquido e baterias durante o processo de recarga.

Existem vários sensores de temperatura disponíveis, conforme a faixa de temperaturas necessária. Há sensores absolutos, como os RTDs (*Resistance Temperature Detector*), Pirômetros e Termistores e os relativos, notadamente os termopares (DOEBELIN, 1990). Para o desenvolvimento deste trabalho, necessitava-se de um sensor de faixa pouco ampla, estimada entre zero e setenta graus Celsius. Optou-se pelo tipo de sensor mais barato e de utilização mais simples atualmente, os sensores de temperatura integrados de silício.

Sensores integrados de silício diferem significativamente dos outros tipos em vários parâmetros (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2007). O primeiro é a faixa operacional que varia de  $-55^{\circ}\text{C}$  to  $+150^{\circ}\text{C}$  tipicamente. Esta faixa inviabiliza o uso destes sensores na maioria dos processos industriais, mas torna-os compatíveis em aplicações como monitoramento ambiental e biológico. Alguns dispositivos integrados vão além desta faixa enquanto outros, devido a restrições no encapsulamento principalmente em função do custo, operam em faixas menores. A segunda maior diferença é o modo de funcionamento. Um sensor de temperatura de silício é um circuito integrado e, portanto inclui circuitos de processamento do sinal adquirido pelo transdutor. Não há necessidade de compensar uma junta fria como no caso dos termopares, nem há necessidade de desenvolver complexos circuitos linearizadores de sinal pois atualmente, estes já estão incluídos na eletrônica embutida no próprio circuito integrado.

Em alguns casos, conversores analógico-digitais são incorporados e em outros, há dispositivos programáveis, que sinalizam sub ou sobre temperatura.

Um estudo da dependência da temperatura de uma junção de um diodo provê a compreensão básica do funcionamento destes dispositivos. A tensão de saída analógica do transdutor sensor é gerada proporcionalmente à temperatura a qual é submetido o sensor. Normalmente, um sensor de temperatura simples é um diodo ou transistor operando como diodo e que é polarizado por uma fonte de corrente constante (Figura 7).



**Figura 7: sensor de temperatura de silício simples.**

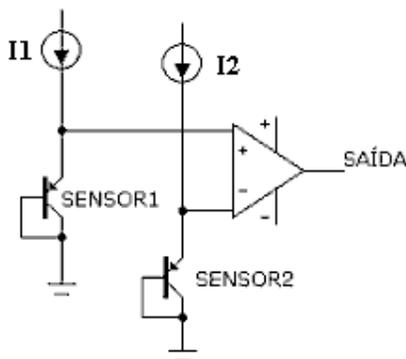
A Equação 12 relaciona  $V_F$ , queda de tensão no diodo (ou  $V_{BE}$  do transistor), com os parâmetros de polarização e outras variáveis com dependência da temperatura. Os parâmetros  $V_F$  de um diodo ou  $V_{BE}$  de um transistor são também referidos como coeficientes de temperatura, pois são dependentes da mesma. Tipicamente, o  $V_{BE}$  tem um coeficiente negativo de  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$  (para o silício).

$$V_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_F}{I_S} \quad (12)$$

Ainda referindo-se à Equação 12,  $k$ , é chamada constante de Boltzmann, igual a  $1,38 \times 10^{-23}$  Joules/ $^\circ\text{K}$ .  $T$  é a temperatura absoluta da junção em graus Kelvin e  $q$  é a carga do elétron, igual a  $1,6 \times 10^{-19}$  Coulombs. Os parâmetros de polarização são a corrente direta,  $I_F$  e a corrente de saturação,  $I_S$ .

Outra abordagem é a medição da diferença de tensão entre duas junções de dois diodos com diferentes densidades de corrente (Equação 13, Figura 8). A tensão de saída é proporcional a temperatura absoluta e como é pequena, da ordem de  $1\text{mV}/^\circ\text{K}$ , é utilizada amplificação para criar um coeficiente de temperatura mais adequado como  $10\text{mV}/^\circ\text{K}$ .

$$\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_1} \quad (13)$$



**Figura 8: sensor de temperatura de silício diferencial.**

## 2.6 CONDICIONAMENTO DE SINAIS

As funções realizadas por um sistema de medição são a detecção do sinal, o condicionamento, a transmissão e a apresentação deste sinal (TSE; MORSE, 1989). A instrumentação é geralmente elétrica por ser facilmente amplificável e modificável. Um sistema mecânico também pode ser amplificável e modificável mas não de forma simples e compacta como em um sistema elétrico.

O condicionamento de sinais de modo analógico envolve basicamente amplificação, manipulação, filtragem, modulação / demodulação e compensação dinâmica. No modo digital, a possibilidade de condicionamento de sinais é praticamente ilimitada, visto que são operações matemáticas facilmente realizáveis por um microprocessador ou microcontrolador. Porém, é preciso ter em mente que toda gama dinâmica do sinal a ser digitalizado deve ser compatível com a gama dinâmica do ADC, assim como os requisitos temporais de amostragem devem ser observados para evitar o fenômeno *aliasing* (KESTER, 2004).

O condicionamento de sinais analógico está sendo gradativamente substituído pelo digital, principalmente nas etapas de linearização pois, diferentemente dos sistemas analógicos, no mundo digital não há variações em função de temperatura ou tolerância de componentes. Mesmo com o grande avanço da eletrônica digital ainda é necessária a etapa inicial de amplificação e filtragem, comumente chamado de *analog front end*. Na amplificação, são utilizadas configurações simples, inversoras ou não e, em casos onde a resolução necessária é maior ou a impedância de entrada deve ser alta, utilizam-se amplificadores diferenciais ou amplificadores de instrumentação. Na filtragem, costuma-se empregar no mínimo um filtro passa-baixas de primeira ou segunda ordem para prevenir o *aliasing* nos casos mais simples. Em sistemas analógicos mais complexos, como a instrumentação biomédica, filtros rejeita-faixa ou passa-faixas de ordem elevada são utilizados.

### 2.6.1 Amplificadores de instrumentação

Considerando um *front end* simples, o circuito amplificador diferencial pode ser utilizado em casos que se necessite de uma taxa de rejeição a ruídos e impedância de entrada razoáveis, mas não excelentes. Analisando a Figura 9, os sinais de entrada  $V_1$  e  $V_2$  produzem uma saída cujo valor é proporcional à diferença entre eles. Sendo este o comportamento do amplificador diferencial, a amplificação só acontecerá para sinais diferenciais e o ruído, introduzido no sinal em modo comum, ou seja, a mesma fase e amplitude nas duas entradas, será anulado (TSE; MORSE, 1989).

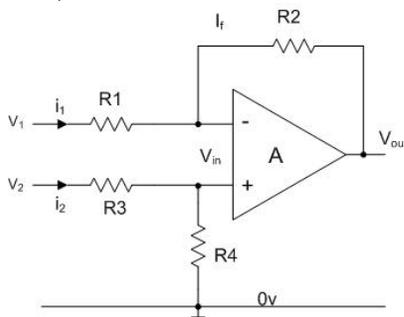


Figura 9: configuração amplificadora diferencial simples.

A relação entre a entrada e a saída deste circuito é dada por:

$$V_{OUT} = -\frac{R2}{R1}V_1 + \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)\left(\frac{R4}{R3 + R4}\right)V_2 \quad (14)$$

A maior limitação deste circuito reside na impedância de entrada baixa quando comparada com outras configurações. Cada fonte de sinal conectada à entrada desta configuração tem que fornecer corrente através da resistência de entrada que possui uma impedância geral menor que outras configurações. Quando uma configuração diferencial de alta impedância é necessária, utiliza-se o amplificador de instrumentação (TOBEY; GRAEME; HUELSMAN, 1971). O amplificador de instrumentação é baseado em pelo menos três blocos amplificadores e pode ser integrado em um único encapsulamento melhorando as características em comum dos amplificadores (“casamento”). Na Figura 10, o diagrama esquemático básico do amplificador de instrumentação é apresentado.

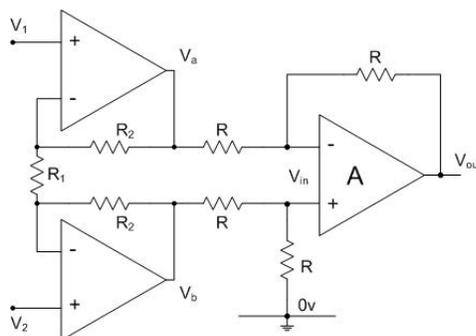


Figura 10: configuração amplificadora diferencial (amplificador de instrumentação).

Amplificadores de instrumentação são amplificadores diferenciais de alto ganho e podem apresentar saída diferencial ou simples. São utilizados para amplificar sinais muito fracos como os provenientes de termopares, extensômetros entre outros. A taxa de rejeição de modo comum destes amplificadores é muito alta e atenuações maiores que 100dB são possíveis. Analisando a Figura 10, a realimentação negativa do amplificador superior faz com que a tensão  $V_a$  seja igual a tensão de entrada  $V_1$ . Da mesma forma, a tensão  $V_b$  é igual a tensão  $V_2$  no amplificador inferior. Isto produz uma queda de tensão no resistor  $R_1$  igual à diferença de tensão entre as entradas  $V_1$  e  $V_2$ . A queda de tensão no resistor acarreta em corrente através do mesmo e, como as entradas dos amplificadores operacionais drenam uma corrente desprezível comparada à que passa por  $R_1$ , praticamente toda ela passa por  $R_2$ . Isto faz com que a tensão entre os pontos  $V_a$  e  $V_b$  seja igual a:

$$V_a - V_b = (V_1 - V_2) \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \quad (15)$$

A diferença de tensão,  $V_a - V_b$ , é conectada à entrada do amplificador diferencial e, normalmente amplificada com ganho um, caso em que os resistores  $R$  são de valor igual. Sendo assim, a expressão da saída em função da entrada neste circuito será:

$$A_v = 1 + \frac{2R}{R_1} \quad (16)$$

Em geral, estes amplificadores apresentam outras características importantes para instrumentação como elevada taxa de rejeição ao ruído da fonte de alimentação, baixo *drift*, baixo *offset* de saída e baixa corrente de polarização das entradas. Uma das vantagens dos circuitos integrados é o “casamento” dos resistores, o que contribui para o aumento da rejeição ao ruído de modo comum.

### 2.6.2 Condicionamento de sinais de extensômetros

A medição de sinais de extensômetros envolve o sensoriamento de variações de resistência extremamente baixas. Este tipo de medição é feita mais adequadamente com o uso de pontes de *Wheatstone* onde o efeito do desbalanço da ponte é percebido por um amplificador de instrumentação (NATIONAL INSTRUMENTS (1), 1998). A configuração da ponte, o condicionamento de sinais, o cabeamento e a aquisição de dados fazem parte do processo de *design* do sistema com um todo. A ponte de *Whetastone* poderá ser completa, meia ponte ou com somente um elemento sensor. Caso a ponte não seja completa, resistores de referência deverão ser utilizados para formar a parte que falta. A resistência nominal dos resistores que completam a ponte é menos importante que o casamento entre eles, ou seja, a incerteza associada aos seus valores nominais. Resistores de valores maiores, assim como os extensômetros propriamente, ajudam a minimizar a corrente de excitação necessária para a ponte. Em detrimento, possuem ruído intrínseco maior e uma variação do seu valor nominal maior (incerteza).

Se o elemento mola está afastado do circuito condicionador de sinais, erros devido à resistência dos cabos poderão ocorrer, necessitando o emprego de técnicas de sensoriamento

remoto onde os circuitos de alimentação e medição são separados, compensando o efeito da queda de tensão nos fios.

A amplificação do sinal proveniente da ponte de *Wheatstone* é quase sempre necessária devido à baixa sensibilidade de uma célula de carga. Valores como 2mV/V são típicos e, com uma excitação de três volts, apenas seis milivolts estarão disponíveis no fim de curso da célula. São utilizados, portanto, amplificadores de instrumentação para elevar o sinal e melhorar a relação sinal-ruído do sistema. Em alguns casos, ganhos de até 2000 vezes são necessários, exigindo portanto, boa qualidade do amplificador.

A relação entre o sinal produzido pela ponte de *Wheatstone* e ruído presente no sistema é um parâmetro importante a ser considerado. O termo utilizado, relação sinal-ruído ou SNR (*Signal to Noise Ratio*) descreve a relação entre a amplitude do sinal e a amplitude do ruído total. Um grande SNR, tipicamente resulta em uma medição menos ruidosa e que possibilita uma resolução maior. No caso de *Strain Gages*, o SNR pode ser particularmente importante devido aos sinais pequenos produzidos pela ponte de *Wheatstone* frente ao ruído. O SNR pode ser melhorado aumentando-se a amplitude do sinal ou reduzindo-se o ruído, antes do processo de digitalização. Ruídos que são introduzidos por uma fonte externa ao sistema freqüentemente possuem freqüências específicas o que possibilita filtragem por hardware ou software, sendo o tipo mais comum, o ruído introduzido pela rede elétrica, de 50 ou 60 Hz. Diferentes técnicas podem ser empregadas para redução de ruído, diferenças estas que ocorrem em função do tipo de ruído. Uma das técnicas mais simples consiste em reduzir o comprimento dos fios e mantê-los afastados da fonte geradora de ruído. O aterramento com cabos blindados e superfícies metálicas que formem gaiolas de Faraday também auxilia na prevenção. Outra técnica consiste em utilizar dispositivos de medição que possuam ampla faixa dinâmica de entrada. A faixa dinâmica define o nível de ruído relativo à faixa do sinal de entrada máxima permissível pelo dispositivo de medição, medida em dB. Aumentar a amplitude do sinal de entrada resulta no aumento do SNR e pode ser realizada com a amplificação do sinal ou com o aumento da tensão de excitação da ponte.

A excitação da ponte é tipicamente feita por fontes de tensão constante, mas também são utilizadas fontes de corrente constante. Não há um nível de tensão padrão ou que seja reconhecido pela indústria, mas tensões entre três e dez volts são comumente utilizadas. Tensões de excitação mais altas geram sinais de saída maiores porém, podem causar erros devidos ao auto-aquecimento dos extensômetros. A limitação da tensão na ponte é função direta da dissipação de potência nos extensômetros e por esta forma, a amplificação do sinal é quase sempre necessária.

Uma das principais razões para a aplicação de ganho a um sinal é realizar a conversão da escala de sinais pequenos a fim de aproveitar toda a resolução de entrada do conversor analógico-digital. Se o caminho do sinal é propício à introdução de ruído, aplicar ganho no início deste caminho aumenta o SNR. Entretanto, circuitos de ganho elevado também introduzem ruídos e novos cuidados devem ser tomados (NATIONAL INSTRUMENTS (2), 2007). A fim de evitar a necessidade de ganhos muito elevados, considera-se a possibilidade de elevar a tensão de excitação da ponte. Porém, dois prováveis problemas deverão ser observados; o auto-aquecimento dos *Strain Gages* e o consumo elevado de corrente, que impossibilita o uso em sistemas alimentados à bateria. Os fatores que determinam um nível tensão ou corrente de excitação ideal são:

- a) Área da grade do *Strain Gage*: o comprimento pela largura da parte ativa do extensômetro.
- b) Resistência do extensômetro: resistências maiores permitem tensões de excitação maiores.
- c) Propriedade de dissipação de calor do elemento mola: seções largas de materiais metálicos como cobre ou alumínio, possuem boa capacidade de dissipação de calor. Seções finas ou metais como aço ou titânio não possuem boa capacidade de dissipação. O formato do elemento mola e a localização do extensômetro, também influenciam neste parâmetro.

Na prática, a tensão de excitação ideal da ponte pode ser obtida observando-se o zero sem aplicar carga ao sistema. Aumenta-se a tensão de excitação enquanto observa-se o zero da ponte buscando pelo ponto onde a tensão é a maior possível, sem gerar instabilidade (NATIONAL INSTRUMENTS (2), 2007). Utilizar um extensômetro de valor nominal maior também propicia uma maior tensão de excitação.

Para a realização de uma análise teórica do valor da tensão de excitação, deve-se levar em conta a seguinte equação da potência na ponte:

$$P_G = \frac{V_B^2}{4R_G} \quad (17)$$

onde,  $R_G$  é a resistência do extensômetro, e  $V_B$ , a tensão de excitação para uma ponte de *Wheatstone* de “braços” iguais.

A densidade de potência da ponte, em Watts por unidade de área, é definida como a razão da potência gerada pela área da grade ativa do extensômetro, como segue:

$$P_G' = \frac{P_G}{A_G} \quad (18)$$

onde  $A_G$  é a área da grade ativa do extensômetro. Combinando-se as equações 17 e 18, obtém-se:

$$V_B = 2\sqrt{R_G P_G' A_G} \quad (19)$$

sendo esta, a equação final para determinação da tensão de excitação da ponte.

Quando um circuito em ponte é construído, dificilmente estará balanceado, ou seja, uma tensão ou corrente já estará presente na saída da ponte devido a diferenças nos elementos que a compõem. Durante a fixação dos extensômetros em uma célula de carga, pequenas variações poderão ocorrer devido à imperfeição da superfície ou variações da espessura da cola. A resistência dos fios de conexão dos extensômetros também provocará o desbalanço da ponte. Diferentes técnicas para compensar o desbalanço poderão ser empregadas. Na compensação feita por software, a tensão inicial é medida tomando-se o cuidado de não submeter nenhum esforço à célula de carga. Um algoritmo simples reduz gradativamente o desbalanço subtraindo do valor de saída amostrado um outro valor que é incrementado até que zere o valor de saída inicial. Este método é simples, rápido e não requer

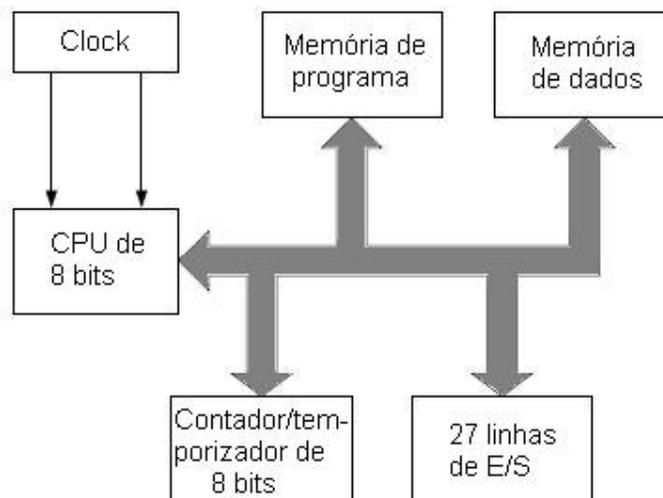
nenhum ajuste manual. Como desvantagem, o *offset* da ponte não é removido na realidade, apenas compensado. Se o desbalanço da ponte é muito grande, ocorre a limitação da faixa dinâmica do amplificador de instrumentação além do *offset* ser amplificado, limitando o ganho máximo. Outro método de balanceamento da ponte utiliza um resistor colocado em paralelo com o extensômetro. Também chamado de resistor *shunt*, este resistor simula a aplicação de uma força na célula de carga e pode ser colocado em paralelo com qualquer elemento da ponte, anulando *offsets* positivos ou negativos. A variação da resistência em função da temperatura deve ser considerada nestes resistores, pois poderá levar ao desbalanço da ponte novamente.

## 2.7 MICROCONTROLADORES E MEMÓRIAS

Microcontroladores são dispositivos digitais síncronos, geralmente seqüenciais, que realizam tarefas diversas como acionamentos, cálculos e sensoriamento. São chamados síncronos por realizarem as tarefas sob comando de um sinal de relógio (*clock*), que impõe uma cadência ao funcionamento do mesmo (SILVA JR, 1990). Estes dispositivos normalmente operam de forma seqüencial, sendo que a execução de tarefas concorrentes, é feita por processos especiais, chamados *Threads* ou *Forks*. Microcontroladores diferem de microprocessadores por possuírem internamente vários blocos funcionais como temporizadores, memória de dados e programa, interfaces de entrada e saída, entre outros. Estes dispositivos executam um conjunto armazenado de instruções (*firmware*) para realizar tarefas definidas pelo usuário. Memórias externas podem ser utilizadas para ler e escrever dados de programa ou temporários, porém, atualmente os microcontroladores possuem quantidades variadas de memória interna, não necessitando na maioria das aplicações, memórias externas adicionais.

Microcontroladores são utilizados em uma vasta gama de produtos eletrônicos como, sistemas de gerenciamento de motores de automóveis, teclados de PC, instrumentos de medição eletrônicos como multímetros e osciloscópios, impressoras, fax-símile, telefones celulares, PDAs, televisores, equipamentos de som domésticos e profissionais, sistemas de alarme e monitoração remota, para citar alguns.

Os primeiros microcontroladores foram criados para auxiliar microprocessadores em tarefas rotineiras e específicas como varredura de teclado. Os modelos Intel 8042 e 8048 cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 11, foram criados justamente para esta finalidade quando foi desenvolvido o computador pessoal PC-XT, desonerando o microprocessador interno (8088) desta tarefa específica. Possui arquitetura Harvard modificada e, contando com um conjunto de 96 instruções (LÄUGER, 2007), é um microcontrolador tipo CISC, e era capaz de realizar algumas delas em um período de 1,36  $\mu$ S. A partir deste projeto, a empresa Intel desenvolveu um microcontrolador para uso geral, o 8051 que era produzido com o *firmware* já gravado internamente em uma memória tipo máscara. Outro modelo, o 8031, foi produzido sem a memória interna e popularizou-se devido ao baixo custo e versatilidade. Várias versões utilizando o núcleo original do 8051 foram desenvolvidas por empresas diferentes e algumas destas versões incorporaram outros blocos internos como conversores analógicos-digitais, memória *flash*, relógio de tempo real entre outros, possibilitando o desenvolvimento de sistemas microcontrolados menores e mais complexos.



**Figura 11: diagrama de blocos do INTEL MCS-48**

Com o passar do tempo, outros tipos de microcontroladores foram desenvolvidos, em destaque os produzidos pelas empresas Motorola (68HC), Microchip (PIC), Atmel (AVR), Texas (MSP) e National (COP). Atualmente existem inúmeras opções, incluindo versões modernas do antigo 8051. Somente a Renesas, um dos maiores fabricantes de microcontroladores do mundo, possui mais de três mil tipos diferentes de microcontroladores, com modelos de 4, 8, 16 ou 32 bits e memória *flash* interna variando de 1 kB a 1 MB. Há modelos que operam em frequências de relógio maiores que 100 MHz contando com vários módulos internos.

Com a evolução da tecnologia de memórias, foram incorporadas dentro dos microcontroladores, memórias de programa e dados e, em alguns casos, memórias para configuração. Um típico microcontrolador atual contém uma memória de programa e uma memória de dados. A memória de programa é usualmente chamada de ROM (*Read Only Memory*) embora este conceito não seja propriamente correto pois, com o advento das *flash*, pode-se regravar milhares de vezes o mesmo dispositivo o que a torna uma RWM (*Read-Write Memory*). O requisito básico desta memória é a sua capacidade de retenção de dados ou seja, deve ser não-volátil. A memória *flash* é um tipo de memória eletricamente apagável, porém difere da memória tipo E<sup>2</sup>PROM (*Electrically Erasable Programmable Read-only Memory*) pelo custo mais baixo e pela forma como os dados são apagados. Na E<sup>2</sup>PROM, o apagamento é feito em pequenos blocos ou mesmo bytes individuais e nas memórias tipo *flash*, blocos grandes de 1kB ou mais são apagados de cada vez. A E<sup>2</sup>PROM é freqüentemente utilizada para a retenção de dados de configuração e, por ser mais cara, são disponíveis em pequenas quantidades como 256 bytes. As memórias *flash* substituíram as UVEPROMS (*Ultraviolet Erasable Programmable Read-only Memory*), simplificando enormemente a etapa de programação de dispositivos microcontrolados. Versões modernas de microcontroladores tem suas memórias de programa graváveis em circuito, eliminando a necessidade da remoção do componente para gravação externa. As memórias de configuração são geralmente E<sup>2</sup>PROMs de pequena quantidade e em alguns casos utiliza-se a própria memória de programa para reter dados de configuração.

Há basicamente duas tecnologias empregadas na construção de memórias *flash*: as do tipo NAND e as do tipo NOR (TOSHIBA, 2007). Os nomes são derivados dos tipos de interconexão

entre as células de memória. No caso das NOR as células são conectadas em paralelo à linhas de dados binários, permitindo a programação das células individualmente. A conexão em paralelo das células lembra as conexões dos transistores em uma porta lógica NOR CMOS. Em uma memória NAND, as células são conectadas em série, lembrando uma porta lógica NAND CMOS e as células não são programáveis individualmente. Desta forma as memórias do tipo NOR permitem acesso individual dos bytes programados e as do tipo NAND, somente a páginas, ou seja, blocos de bytes. A grande vantagem da memória tipo NAND é que sua arquitetura permitiu a redução do tamanho do chip, aumentando a capacidade de memória por circuito integrado o que a tornou concorrente de dispositivos de memória de massa como os discos rígidos. A Tabela 1 resume a comparação entre as duas tecnologias de memórias *flash*.

**Tabela 1: comparação entre as tecnologias NAND e NOR.**

<i>Característica</i>	<i>NAND</i>	<i>NOR</i>
Densidade	Maior	Menor
Tempo de escrita	Menor	Maior
Tempo de leitura	Maior	Menor
Tempo de apagamento	Menor	Maior
Acesso aos dados	Páginas	Aleatória

Com o desenvolvimento das memórias tipo *flash*, uma grande variedade de produtos eletrônicos foram produzidos como *Pen Drives*, telefones celulares e máquinas fotográficas digitais. Com relação especificamente a instrumentos portáteis como *data loggers*, a grande vantagem da utilização de memórias *flash* tipo NAND reside no fato da linearidade com que os dados são gravados na memória, ou seja, a gravação por páginas de código não representa necessariamente um empecilho para a utilização destas memórias. Uma desvantagem seria a possibilidade de perda de dados durante o período de acumulação dos mesmos na memória *cache* interna, no instante anterior à gravação.

## 2.8 BATERIAS E CONVERSORES CHAVEADOS

Sistemas instrumentados autônomos geralmente fazem uso de baterias para que a máxima portabilidade seja atingida. Como a tensão disponível em uma bateria de células é variável, torna-se necessária a utilização de algum dispositivo regulador de tensão ou corrente.

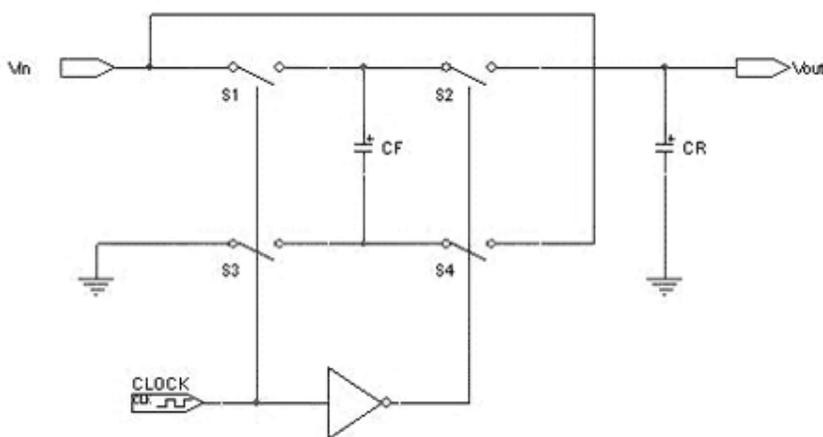
### 2.8.1 Conversores CC/CC

Reguladores de tensão lineares apresentam como principal vantagem o baixo ruído quando comparado com os chaveados, porém a um custo alto para as baterias. Este custo vem do fato de que o processo de regulação apresenta perdas consideráveis pela utilização de dispositivos semicondutores operando em sua região linear. Por outro lado, os dispositivos chaveados criam ruído ao comutarem, ruído este que pode ser difícil de atenuar, acarretando problemas principalmente em dispositivos que contém sensores e amplificação. A escolha entre reguladores chaveados ou lineares pode então ser simplificada considerando-se os parâmetros eficiência e o ruído. Há reguladores de tensão lineares de boa eficiência, como os LDO (*Low Drop Out*) onde a queda de tensão no dispositivo é pequena, reduzindo a potência dissipada no mesmo. Por outro lado, os reguladores chaveados atuais operam em frequências cada vez maiores exigindo portanto filtros de saída menores e mais simples. Visando a maximização da

autonomia dos dispositivos alimentados à bateria, são utilizados mais frequentemente os conversores chaveados devido as suas altas eficiências que podem ultrapassar 95% (EREN; AI-SHOAILI; MILARSKI, 2004).

Considerando os conversores CC/CC chaveados utilizados em aplicações de baixa potência, dois tipos básicos podem ser classificados: os conversores com indutores e os com capacitores (*charge pumps*). Diversas técnicas podem ser empregadas com o intuito de elevar ou reduzir a tensão e uma grande variedade de tipos de conversores foram desenvolvidos (AHMED, 1999). Com relação aos conversores com indutores, dois grandes tipos são considerados: os isolados e os não-isolados. Em aplicações à bateria, os não isolados são comumente utilizados e entre eles o tipo *Buck*, redutor de tensão, o *Boost*, elevador de tensão e o *Buck-Boost*, elevador / redutor de tensão. Em aplicações onde a isolamento é necessária, uma vasta gama de topologias de conversores foi desenvolvida, com potências que variam desde mW até kW.

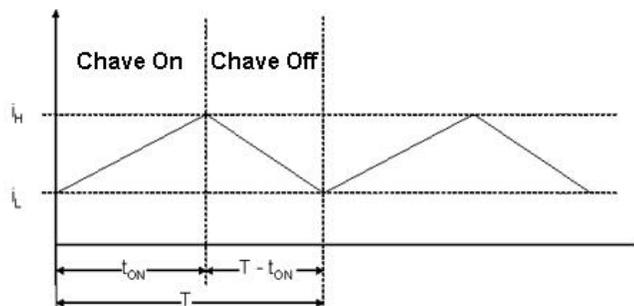
Os dispositivos tipo *Charge pump*, ou também usualmente chamados de conversores CC/CC sem indutores são uma classe especial de conversores CC/CC chaveados que utilizam capacitores como elemento de armazenamento de energia. Um tipo de *charge pump* comumente utilizado é o dobrador, que inclui quatro chaves, um capacitor externo para armazenamento de energia e transferência e um outro capacitor de reserva. A Figura 12 apresenta o diagrama esquemático do circuito básico do *charge pump* dobrador. Durante a fase de carga, as chaves  $S_1$  e  $S_3$  estão fechadas e as chaves  $S_2$  e  $S_4$  abertas. O capacitor de armazenamento,  $C_F$ , carrega-se com a tensão de entrada  $V_{IN}$  e armazena a energia que será transferida durante a fase de descarga. O capacitor de reserva,  $C_R$ , acaba por alimentar a carga com duas vezes a tensão  $V_{IN}$  pois, durante a fase da descarga, o estado de todas as chaves é invertido colocando o capacitor de armazenamento em série com  $V_{IN}$  e a carga.



**Figura 12: circuito *charge pump* dobrador simples.**

O equivalente ao *charge pump* dobrador com indutores é o chamado circuito *boost* (Figura 15). Os conversores CC/CC chaveados baseados em indutores opera de modo periódico ou seja, alterando o tempo de permanência ligado e desligado do indutor. Há conversores cuja frequência é variável mas normalmente não é o tipo utilizado em dispositivos portáteis alimentados à bateria onde se almeja o tamanho reduzido dos componentes. A relação entre ligado,  $T_{ON}$ , e desligado,  $T_{OFF}$ , regula o tempo de carga e descarga do indutor. A corrente no

indutor de carga poderá ser contínua quando nunca chega ou permanece em zero ampères, ou descontínua quando permanece em zero por algum tempo. A Figura 13 apresenta o gráfico da corrente do modo de condução contínua. A diferença entre os modos contínuo e descontínuo recai sobre o cálculo do indutor e do nível máximo de *ripple* aceito no projeto. Operando em condução contínua, o conversor exige um indutor maior, porém produz menos ruído que em condução descontínua.

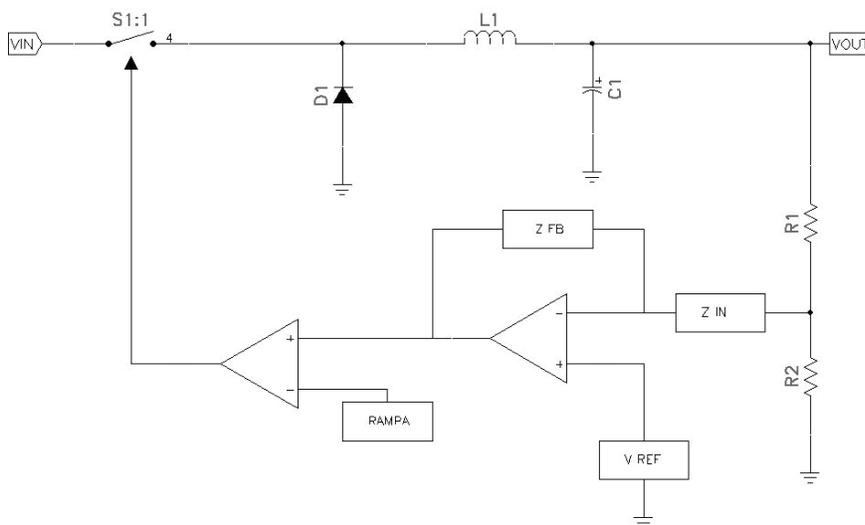


**Figura 13: gráfico da corrente no indutor no modo de condução contínua.**

Para a redução e controle da tensão, o conversor tipo *Buck* é utilizado nos casos onde não há necessidade de isolamento como nos dispositivos alimentados à bateria. A Figura 14 apresenta o diagrama simplificado do conversor tipo *Buck*. A tensão de saída regulada é dada pela expressão:

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{T_{ON}}{T} \quad (20)$$

onde  $T_{ON}$  é o tempo ligado (carga do indutor) e  $T$  é o período de comutação do indutor.



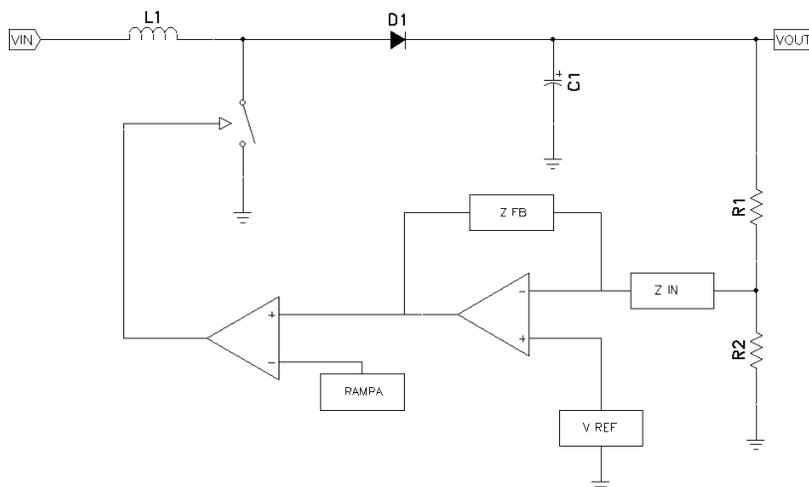
**Figura 14: diagrama simplificado de um conversor tipo *Buck*.**

Analisando o diagrama esquemático do conversor chaveado tipo *Buck*, pode-se afirmar que o núcleo do circuito é composto pelos componentes  $S_1$ ,  $D_1$ ,  $L_1$  e  $C_1$ . Durante o ciclo de

carga,  $S_1$  é fechado, carregando o indutor  $L_1$ . No ciclo de descarga,  $S_1$  abre e a energia acumulada em  $L_1$  impõe corrente no circuito no sentido da carga fazendo  $D_1$  conduzir. A relação entre os tempos ligado e desligado de  $S_1$  irá regular o valor da tensão em  $V_{OUT}$ , fazendo com que esta seja menor que  $V_{IN}$ . Uma amostra da tensão de saída é retirada por  $R_1$  e  $R_2$  e o valor desta amostra pode ser modificado pela ação da rede  $Z_{FB}$  para controlar o gerador de PWM (*Pulse Width Modulation*) que controla a chave. Isto faz com que este circuito seja um regulador de tensão realimentado, corrigindo eventuais variações da tensão de saída em função das variações da carga. No conversor tipo *Boost* (Figura 15), o indutor é colocado em série com a alimentação e a chave, em paralelo, controlando a carga do indutor. A tensão autoinduzida do indutor é então somada a  $V_{IN}$  e entregue para a carga através do diodo que está em série com a mesma. A tensão de saída regulada é obtida pela expressão:

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{T}{T_{ON}} \quad (21)$$

onde  $T_{ON}$  é o tempo ligado (carga do indutor) e  $T$  é o período de comutação do indutor.



**Figura 15: diagrama simplificado de um conversor tipo *Boost*.**

Existem ainda outros tipos de conversores CC/CC mais complexos onde objetiva-se a minimização os problemas gerados pela comutação dos dispositivos reativos. É o caso dos conversores *SEPIC*, *CUK* e *ZETA*. A Tabela 2 traz uma comparação entre os conversores CC/CC no que diz respeito aos parâmetros fundamentais destes circuitos.

**Tabela 2: comparação entre conversores CC/CC**

Parâmetro	Charge Pump	Buck	Boost	Sepic
Complexidade	Baixa	Média	Média	Alta
Tamanho	Pequeno	Médio	Médio	Grande
Custo	Baixo	Médio	Médio	Alto
Eficiência	Média	Alta	Alta	Média-Alta
Corrente máxima	Baixa	Alta	Média	Média-Alta

## 2.8.2 Baterias

Com as tecnologias disponíveis atualmente, os projetistas de equipamentos portáteis tentam integrar cada vez mais novas funcionalidades em equipamentos cada vez menores, enquanto tentam maximizar o tempo de vida da bateria. As baterias são a fonte principal de alimentação de equipamentos eletrônicos portáteis e, escolher a bateria correta ou a melhor possível para uma determinada aplicação, é um desafio para o projetista. Este desafio, envolve a escolha da química da bateria, a topologia do circuito de gerenciamento da energia e do circuito de recarga da bateria. A disponibilidade, o custo, a ciclagem máxima e o tempo de carga são parâmetros importantes para a escolha da bateria correta. Atualmente considera-se também o impacto ambiental que o descarte da bateria produzirá.

As baterias usualmente ocupam um espaço razoável no interior do equipamento portátil além de serem responsáveis pela maior parte do peso. A densidade de energia de cada tipo de bateria determina o tamanho e o peso do conjunto de células. As diferentes químicas tem suas próprias características que devem ser analisadas (MICROCHIP, 2007). As subseções a seguir definem as principais características das baterias mais comumente disponíveis.

### a) Alcalina

As baterias alcalinas não são recarregáveis mas ainda assim muito utilizadas em equipamentos portáteis devido a sua característica de baixa auto-descarga. Como estão sempre prontas para serem utilizadas após a compra, atualmente ainda são muito utilizadas. Uma das principais desvantagens deste tipo de bateria é o descarte, que deve ser feito de forma correta para a não-contaminação do meio ambiente.

### b) Chumbo-ácida selada

As baterias de chumbo ácido seladas são de baixo custo e apresentam uma baixa taxa de auto-descarga. Não são porém, boas candidatas para sistemas portáteis por possuírem uma baixa densidade de energia além de causarem grande impacto quando mal descartadas devido ao chumbo e o ácido que contêm.

### c) Níquel-cádmio

Este tipo de bateria apresenta uma das melhores capacidades de ciclagem (carga / descarga) entra es baterias recarregáveis. Como desvantagem, necessita ser utilizada periodicamente e apresenta o chamado efeito de memória (quando não são carregadas ou descarregadas a pleno, reduzem sua capacidade de carga). É um solução de baixo custo mas está com seus dias contados devido a presença de cádmio em sua química. O cádmio é uma substância perigosa para o meio ambiente e está listado na diretiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) (ROHS, 2008).

### d) Níquel-hidreto Metálico

É considerada a versão melhorada das baterias de NiCd por apresentar maior densidade de energia, baixo efeito de memória e não possuírem o Cádmio. Estas baterias podem substituir diretamente as antigas baterias de NiCd tanto no equipamento como no uso do recarregador. Porém se o processo de recarga escolhido for do tipo rápido, erros poderão ocorrer devido a

variação  $-\Delta V/\Delta t$  ser mais sutil nas baterias de NiMH. Variações menores de tensão ao longo do tempo poderiam não ser percebidas pelo circuito sensor de variação de tensão o que acarretaria uma sobrecarga na bateria.

#### e) Lítio-íon

As baterias de Lítio-íon apresentam várias vantagens como alta densidade de energia, baixa manutenção, baixa taxa de autodescarga e tensão maior por célula. Como desvantagens, têm custo mais alto, e auto-envelhecimento ou seja, deterioram-se com ou sem uso. O circuito de recarga é mais complexo devido a possibilidade de sobretensão e sobreaquecimento durante a recarga.

#### f) Lítio-po (Lítio-polímero)

Este tipo é uma variação das baterias de Lítio-íon e apresentam como principal diferença, o fato de que podem ser produzidas em diferentes formatos, o que facilita o desenvolvimento de produtos com perfil mais baixo ou com um desenho mecânico específico. O algoritmo de carga é semelhante ao utilizado nas baterias de lítio-íon.

As Tabelas 3 e 4 apresentam comparações entre os principais tipos de baterias disponíveis.

**Tabela 3: comparação entre baterias.**

<i>Química</i>	<i>Densidade de energia (horas/kg)</i>	<i>Densidade de energia (horas/litro)</i>	<i>Tensão por célula primária (Volts)</i>	<i>Tensão em circuito aberto (Volts)</i>	<i>Tensão final (Volts)</i>	<i>Tensão de recarga (Volts)</i>
Alcalina	145	400	1,5	1,6	0,9	Não se aplica
Chumbo-ácida	30-40	50-80	2,0	2,25	1,75	2,8
NiCd	40-80	100-150	1,2	1,3	0,9	1,6
NiMH	60-100	160-230	1,2	1,3	0,9	1,5
Li-ion	110-130	210-320	3,6	4,2	2,8	4,2

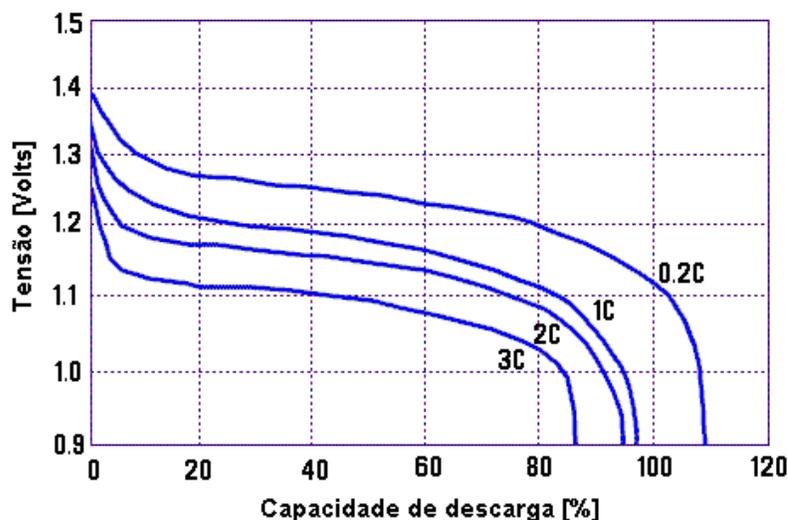
**Tabela 4: comparação entre baterias, continuação.**

<i>Química</i>	<i>Auto-descarga (% por mês)</i>	<i>Resistência interna (mΩ)</i>	<i>Ciclagem (carga-descarga)</i>	<i>Taxa de descarga (mA-hr)</i>	<i>Temperatura de operação (°C)</i>	<i>Custo inicial</i>
Alcalina	0,3	100-300	1	0,25C	-20 a +55	Baixo
Chumbo-ácida	2-8	2,5-25	50-500	<15C	-20 a +50	Baixo
NiCd	15-20	3,5-300	1500	<1	-20 a +60	Médio
NiMH	20-25	10-400	800	<3C	0 a +60	Médio
Li-ion	6-10	50-500	1000	<2C	-20 a +60	Alto

O algoritmo de recarga apropriado para cada tipo de química de bateria deve ser corretamente empregado pois afeta diretamente o tempo de vida e confiabilidade da bateria

(VILAS BOAS; OLMOS, 2004). Cada química tem seu comportamento próprio durante a recarga que varia inclusive de fabricante para fabricante.

O parâmetro  $C$  é a capacidade de carga e descarga de corrente de uma bateria. Esta capacidade é definida por Ampères-hora (Ah) ou em alguns casos Watts-hora. O comportamento de descarga de uma bateria não é linear, mas sim variável conforme a taxa de descarga (FONSECA, 2002). Como exemplo, supor uma bateria de capacidade  $C$  de 1 Ah operando em diferentes cargas, fornecendo portanto, diferentes correntes. Estas correntes são definidas como um múltiplo (ou percentual) de  $C$ , como  $0,2 C$ ,  $2 C$  ou outro. Analisando o gráfico da Figura 16, percebe-se que a taxa de descarga varia mais rapidamente no início do processo e após determinado período de uso, mais lentamente. Numa aplicação, tudo dependerá da tensão necessária para que o circuito continue a operar adequadamente ao longo do processo de descarga da bateria. Uma extrapolação linear do tempo de descarga de uma bateria fornece apenas uma aproximação do período em que a mesma é operacional. Para que se possa ter uma idéia mais correta do tempo de descarga de uma bateria, é necessário consultar o manual do fabricante e, sabendo a taxa de descarga imposta pela carga, encontra-se o valor da tensão mínima necessária para que o circuito opere.



**Figura 16:** gráfico da tensão por porcentagem de descarga de um bateria NiMH

Comparando-se os dados das Tabelas 3 e 4, verifica-se que as baterias de químicas Li-íon e NiMH são as melhores candidatas para o uso em sistemas instrumentados portáteis. Analisando a Figura 17, percebe-se que diferentes técnicas empregadas no processo de recarga de uma bateria tipo NiMH geram diferentes comportamentos da tensão e temperatura ao longo do tempo. Nas subseções a seguir, diferentes técnicas de recarga são apresentadas.

#### a) Tempo de recarga controlado

Esta técnica é empregada em diversos tipos de química e usualmente utilizada como forma de completar a carga após o uso de alguma outra técnica de recarga inicial. Uma corrente de manutenção é mantida por algum tempo após o ciclo de carga ser completado.

**b) Detecção de temperatura absoluta**

Neste método utiliza-se um sensor para detectar quando a bateria atingiu a temperatura especificada de carga plena, quando então desliga-se a recarga. Este método pode ser afetado pela temperatura ambiente resultando em uma carga inferior em dias quentes ou superior em dias frios.

**c) Detecção da variação de temperatura,  $\Delta T/\Delta t$** 

Este é um dos melhores métodos para a detecção do final de recarga em baterias como as NiMH. Quando a bateria atinge a carga plena durante o processo de recarga sua temperatura eleva-se rapidamente. Isto é devido a um aumento na conversão da energia de carga em energia térmica. Para a utilização do método  $\Delta T/\Delta t$ , emprega-se um sensor de temperatura para medir a temperatura da bateria e um microcontrolador é utilizado para calcular o tempo passado,  $\Delta t$ . O microcontrolador termina o processo de recarga quando a taxa de  $\Delta T/\Delta t$  exceder um limite pré-determinado. Este método é preferível com relação ao anterior, pois não está sujeito a erros produzidos pela temperatura ambiente.

**d) Tensão de carga controlada**

Neste método monitora-se a tensão em busca de uma elevação súbita da mesma que ocorre ao final do processo de recarga. Embora seja eficiente na recarga de baterias de NiCd, não é recomendado para a recarga de baterias tipo NiMH pois a variação da tensão quando ocorre a carga plena é pequena neste tipo de bateria. Em alguns casos, especialmente quando a temperatura ambiente é muito alta, a variação de tensão pode não ocorrer. O circuito que detecta a variação de tensão deve ter uma resolução de poucos milivolts para perceber o fim do processo de carga. Em alguns casos há variações na tensão final de carga entre diferentes fabricantes o que dificulta ainda mais a utilização deste método.

**e) Tensão invariável**

Neste método mede-se a variação da tensão ao longo do tempo em busca do ponto em que sua variação seja zero ou  $\Delta V/\Delta t = 0$ . Após encontrar  $\Delta V/\Delta t = 0$ , aplica-se o método de carga constante (*trickle charge*) para completar o processo de recarga.

Independentemente de qual método de monitoração for escolhido, o processo de carga pode ser lento ou rápido. Com o processo de carga lenta, quando uma corrente de carga de cerca de  $C/10$  ou menos é aplicada à bateria, pode-se fazer a recarga sem monitoramento. Como inconveniente, este método requer um longo tempo de recarga, durante toda a noite por exemplo. Nos processos de recarga rápida, quando  $C/3$  ou mais é aplicado à bateria, o monitoramento da recarga é obrigatório, pois nestes casos há risco de explosão.

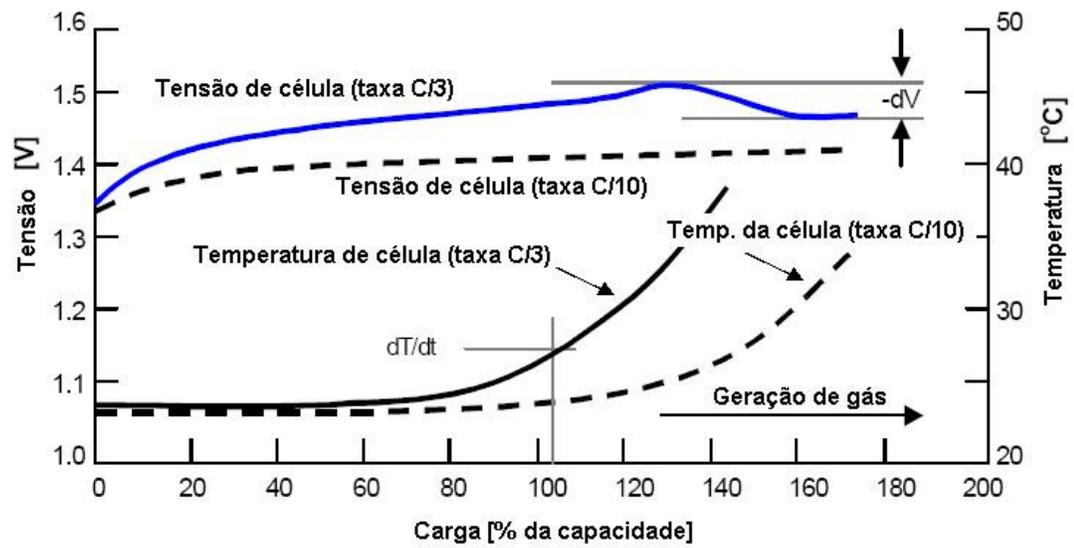


Figura 17: comportamento da tensão e temperatura em função da recarga de baterias NiMH.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA – ESTADO DA ARTE

Apresenta-se neste capítulo um resumo da investigação de trabalhos científicos publicados relacionados com dispositivos instrumentados portáteis. O critério de pesquisa por trabalhos já realizados foi a busca por temas como sistemas microcontrolados, acelerômetros, coletores de dados, extensometria, baterias, entre outros, a fim de correlacionar estes trabalhos com o tema principal desta dissertação. Focou-se também em estudos relacionados com a agricultura de precisão que necessitaram ou se beneficiaram da miniaturização dos dispositivos eletrônicos empregados. Na seção 3.1, são apresentados trabalhos anteriormente realizados que dizem respeito ao desenvolvimento de sistemas instrumentados portáteis em geral, e na seção 3.2, trabalhos sobre esferas instrumentadas.

#### 3.1 SISTEMAS INSTRUMENTADOS PORTÁTEIS

O desenvolvimento de sistemas instrumentados portáteis, seguindo a eletrônica de consumo, foi facilitado pelo aprimoramento da microeletrônica. Nas mais diversas áreas pode-se encontrar dispositivos portáteis capazes de adquirir dados para análise posterior ou em tempo real. Devido à capacidade de programabilidade, a utilização de microcontroladores em sistemas instrumentados portáteis é uma escolha conveniente. Considerando a indústria de microprocessadores atual, a gama de produtos disponíveis é muito grande, com dispositivos de 4, 8, 16 ou 32 bits, contando com uma variedade enorme de dispositivos acessórios internos, como memórias, interfaces de comunicação e temporizadores. Dependendo dos requisitos do sistema, são utilizados microprocessadores, microcontroladores ou DSPs (*Digital Signal Processors*) em aplicações onde algum processamento dos sinais adquiridos é feito no próprio sistema instrumentado.

As técnicas de microeletrônica também propiciaram o surgimento de novos dispositivos, como por exemplo, os MEMS (*Micro Electrical-Mechanical Systems*) ou micro-sistemas elétricos-mecânicos. Com esta tecnologia foram desenvolvidos acelerômetros, inclinômetros, giroscópios entre outros sensores, todos construídos em escala microscópica.

Na área da engenharia biomédica, sistemas instrumentados portáteis são largamente empregados. Uma interessante aplicação foi feita agregando-se acelerômetros, um microcontrolador e memórias a fim de realizar aquisição de dados biológicos específicos como dados sobre a marcha de um ser humano (AMINIAM *et al.*, 1995). Através de quatro acelerômetros, o dispositivo foi capaz de capturar a velocidade e inclinação de pessoas ao caminhar e os dados obtidos foram utilizados para alimentar um algoritmo baseado em redes neurais. O sistema desenvolvido apresentou uma autonomia de vinte e quatro horas, utilizando memória com capacidade para 16 MBytes de dados. Os dados foram posteriormente analisados utilizando-se redes neurais para arguição de valores. Em um trabalho semelhante, (SEKINE *et al.*, 1998), desenvolveram um *data logger* (coletor de dados), contendo um acelerômetro triaxial com o objetivo de reconhecer distúrbios de marcha em pacientes. O acelerômetro foi conectado a um *data logger* com memória de 2 MB e os sinais dos acelerômetros foram amostrados a uma taxa de 256 Hz. Diferentemente do trabalho anterior, os dados coletados foram analisados posteriormente através de transformadas *Wavelet*. Ambos têm em comum o uso de sistemas instrumentados portáteis em análises biométricas. Em outro trabalho (NEVINS; DURDLE; RASO, 2002) utilizaram-se cartões de memória com capacidade de armazenamento de 32 MB para coleta de dados de acelerômetros. Objetivando a análise da postura de pacientes, os acelerômetros foram

posicionados estrategicamente nas costas dos mesmos de modo a capturar a inclinação da coluna. Utilizaram-se dispositivos de baixo consumo com o objetivo de coletar dados por um longo período de tempo (até 810 horas). Os sinais de seis acelerômetros biaxiais foram adquiridos por seis pequenos microcontroladores que se comunicam com um sistema central onde o cartão de memória foi instalado. Esta abordagem propiciou a diminuição de cabos ao longo do corpo do paciente, pois cada um dos seis módulos necessitou quatro fios para comunicação serial e alimentação.

(BAZZARELLI *et al.*, 2003) utilizaram acelerômetros em conjunto com transmissores e receptores de rádio frequência e estes foram utilizados para avaliação de escoliose (desvio lateral da coluna cervical) em pacientes. Como nos trabalhos anteriormente descritos, utilizaram-se sistemas portáteis compostos por microcontroladores, conversores analógico-digitais entre outros dispositivos, todos alimentados à bateria. Neste caso o sistema é um rastreador posicional de três dimensões capaz de medir o desvio da coluna analisando a intensidade de um sinal de rádio frequência, emitido da cintura do paciente até os receptores localizados nos ombros. Utiliza ainda acelerômetros para medir a rotação da coluna do paciente. Trata-se de um sistema instrumentado portátil, de baixo consumo (580 $\mu$ A/h nos receptores) dotado de vários sensores para uso biométrico.

(LUHARUKA; GAO; KRISHNAMURTY, 2003), apresentaram um sistema portátil para a captura de sinais GSR (*Galvanic Skin Response*) ou resposta galvânica da pele. Estes sinais estão correlacionados a distúrbios comportamentais, tais como autismo e epilepsia. Nestes casos, existe uma grande necessidade de independência do equipamento para que não interfira nas atividades usuais do paciente a fim de não alterar as condições do experimento ou monitoração. O dispositivo desenvolvido é um *data logger* baseado em um microcontrolador da família PIC e foram utilizadas oito memórias E<sup>2</sup>PROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) para o armazenamento dos dados perfazendo um total de 16 MB. Os dados são coletados através de uma interface serial padrão RS-232.

Outro equipamento desenvolvido por (CIPRIANO *et al.*, 1998), é capaz de quantificar variações no volume sanguíneo de um paciente através de cintilografia, adquirindo até trinta e nove horas de dados, coletados por um sistema microcontrolado de baixo custo. Neste trabalho, um microcontrolador da família PIC foi novamente utilizado e uma memória de 132 kB permitiu o armazenamento de mais de 10000 dados com resolução de 12 bits cada.

Ainda na área biomédica, o trabalho realizado por (YAO; SCHMITZ; WARREN, S., 2005), utilizaram diversos módulos eletrônicos independentes para monitoramento contínuo do estado de saúde de pacientes. Neste trabalho, uma rede tipo BAN (*Body Area Network*) foi descrita e diversos dispositivos de rádio frequência foram comparados como prováveis candidatos para o desenvolvimento dos módulos. Utilizando como meio físico a tecnologia *Blue Tooth*, o protocolo padrão IEEE 1073 ou MIB (*Medical Information Bus*) foi aplicado para o desenvolvimento de sistemas instrumentados autônomos como oxímetros de pulso, ECGs (eletrocardiógrafos) entre outros, comunicando-se com um coletor de dados que pode ser vestido como uma roupa (*wearable computer*).

Em alguns casos, necessita-se de alguma capacidade de pré-processamento dos dados adquiridos, como por exemplo, quando se deseja linearizar a função de transferência de um sensor. Este é o caso do trabalho realizado por (MAHMOUD, 1998), um dosímetro portátil (medidor de níveis de radiação), baseado em microcontrolador. Neste instrumento, a

necessidade de realizar a linearização *in loco* deveu-se ao fato do sistema instrumentado não realizar aquisição e coleta de dados, mas aquisição e apresentação destes dados no próprio instrumento sendo, portanto, um instrumento *Stand Alone*. O sensor utilizado, uma válvula Geiger-Müller, apresenta uma saída não-linear cuja curva típica encaixa em um polinômio de terceira ordem. O algoritmo de conversão realiza a linearização do sinal do sensor que é posteriormente apresentado em um display alfanumérico. Quando existe necessidade de processamento de grande volume de dados em tempo real, faz-se necessário o uso de DSPs (*Digital Signal Processors*) que são basicamente microprocessadores que possuem uma unidade interna para realizar operações matemáticas diversas. No sistema proposto por (LOMBARDI, 2003) um conversor analógico-digital de 12 bits e um processador tipo DSP foram utilizados para obter os dados de três giroscópios e três acelerômetros. Os dados são armazenados em um cartão de memória de 16 MB para posterior transferência a um PC.

Na área de monitoramento ambiental, sistemas instrumentados autônomos também são empregados. É o caso do trabalho de (MUKARO; CARLESE, 1999), onde um microcontrolador de baixo consumo foi empregado para monitorar a radiação solar. O microcontrolador utilizado conta com um conversor analógico-digital interno foi empregado e os dados adquiridos, armazenados em 8 kB de memória. O uso de baterias neste caso é essencial, pois o equipamento foi utilizado para monitoramento de radiação solar em locais distantes. Nestes casos, a fim de propiciar grande autonomia ao sistema, alia-se o *design* de baixo consumo da eletrônica a uma bateria de grande capacidade de carga.

Equipamentos portáteis são muito utilizados em análises químicas e físicas, como em análises da qualidade da água, dos níveis de radiação, sensoriamento de gases, entre outros. Um trabalho nesta área foi proposto por (CARDOSO *et al.* 2001), onde um analisador multicanais para espectrometria foi desenvolvido utilizando um microcontrolador de baixo custo (PIC). Um *display* alfanumérico foi utilizado para interação com o usuário além de várias interfaces para coleta de dados (USB, iRDA, Serial). O dispositivo pode utilizar um módulo GPS (*Global Positioning System*) para gerar marcas espaciais nos registros salvos, tornando-o versátil para aplicações em campo, onde a localização do experimento é salva em memória. A alimentação, proveniente de células de Lítio-íon, garante autonomia de muitas horas ao sistema, permitindo a coleta dos dados espectrais.

Outra área de importante, a agricultura de precisão ganha cada vez mais destaque e interesse na pesquisa tanto pela questão do cuidado ambiental como pela busca por produtividade. Maximização de produtividade, minimização de desperdício e monitoramento dos processos agrícolas, são questões exploradas cada vez mais frequentemente. Vários trabalhos desenvolvidos nesta área fizeram uso de sistemas instrumentados portáteis, alguns utilizando dados de geoposicionamento, outros utilizando comunicação celular (GPRS – *General Packet Radio Service*) para coleta remota. O trabalho descrito por (QIU; MAO; HE, 2006), é um *data logger* de parâmetros agrícolas e foi baseado em um microcontrolador tipo 8051. Foi utilizado um módulo GPS para a aquisição de dados de geoposicionamento e sensores de pH, condutividade do solo, temperatura, umidade e luminosidade.

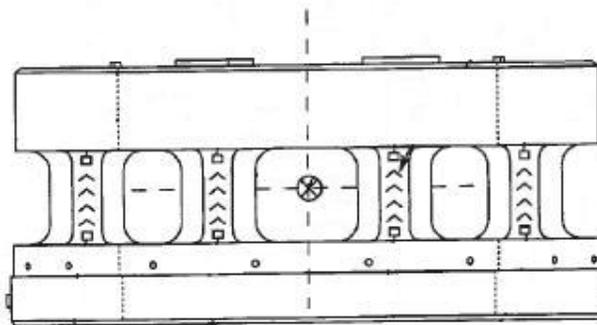
O trabalho realizado por (D'AGOSTINI, 2005), focou no uso de extensômetros para medir o esforço realizado por implementos agrícolas. Foi utilizado um módulo GPS além dos extensômetros e um cartão de memória com capacidade de 128MB para armazenamento dos dados adquiridos.

### 3.2 ESFERAS INSTRUMENTADAS

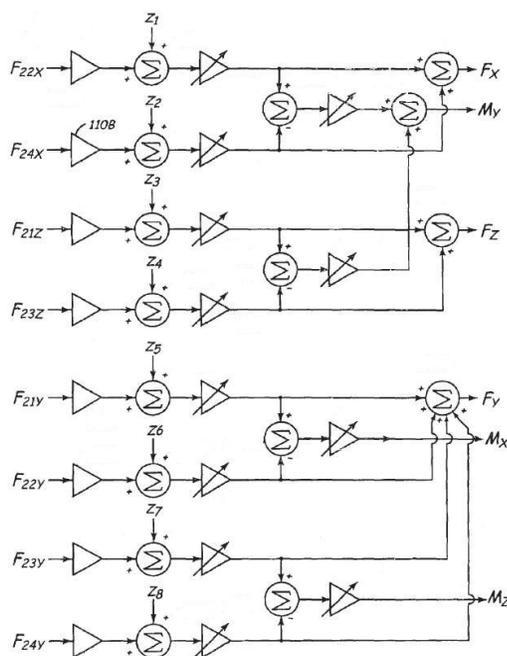
Nesta seção, fez-se uma análise de trabalhos anteriormente realizados e do estado da arte concernente a esferas instrumentadas que realizam análise de forças de compressão e impactos. Uma das aplicações possíveis destes instrumentos é na análise do processo de pós-colheita de frutas, onde impactos e compressões depreciam as mesmas.

Existem diversas formas e tipos de células de carga baseadas em extensômetros (*Strain Gages*), incluindo vigas engastadas, forma de botão e forma de anel para sensoriamento de forças de compressão, torque ou outros esforços mecânicos para diferentes aplicações. Para a análise de forças multidimensionais existem algumas células de carga comerciais que são capazes de capturar forças ao longo de um eixo utilizando um pino central (SOMMERFIELD *et al.*, 1999) que é instrumentado com extensômetros instalados em diferentes posições. Estes transdutores usualmente medem forças ao longo de um eixo e o momento em outros eixos. Outras são capazes de medir três eixos de compressão, porém referenciados somente a um único ponto. Se um único eixo de compressão é necessário, uma simples célula de carga tipo viga engastada realiza a tarefa, mas se dois ou três eixos independentes são necessários, uma combinação de células de carga pode realizar o trabalho. Alguns diferentes projetos de célula de carga foram propostos e todos eles objetivando o sensoriamento de forças referenciadas a um único ponto ou uma composição de forças que atuam em um único ponto.

O trabalho de (MEYER; KEMPAYNEN; OLSON, 2004) é a patente de uma célula de carga multiaxial composta por dois discos separados por seis pinos. Os pinos são instrumentados com extensômetros para medir as diversas forças que ocorrem nos mesmos. Com este sistema, três forças de compressão ou tração e três de momento são obtidas após os sinais dos sensores serem tratados por um condicionador de sinais. O condicionador é composto por diversos amplificadores somadores e subtratores que extraem as informações de compressão e momento para cada eixo cartesiano. A Figura 18 é uma vista lateral desta célula de carga e a Figura 19, o diagrama de blocos simplificado do condicionador de sinais desenvolvido.



**Figura 18: diagrama da célula de carga multiaxial patenteada por (MEYER; KEMPAYNEN; OLSON, 2004).**



**Figura 19:** parte do condicionador de sinais da célula de carga multiaxial patenteada por (MEYER; KEMPAYNEN; OLSON, 2004) onde os sinais dos diversos extensômetros são combinados para gerar as informações de compressão e momento triaxiais.

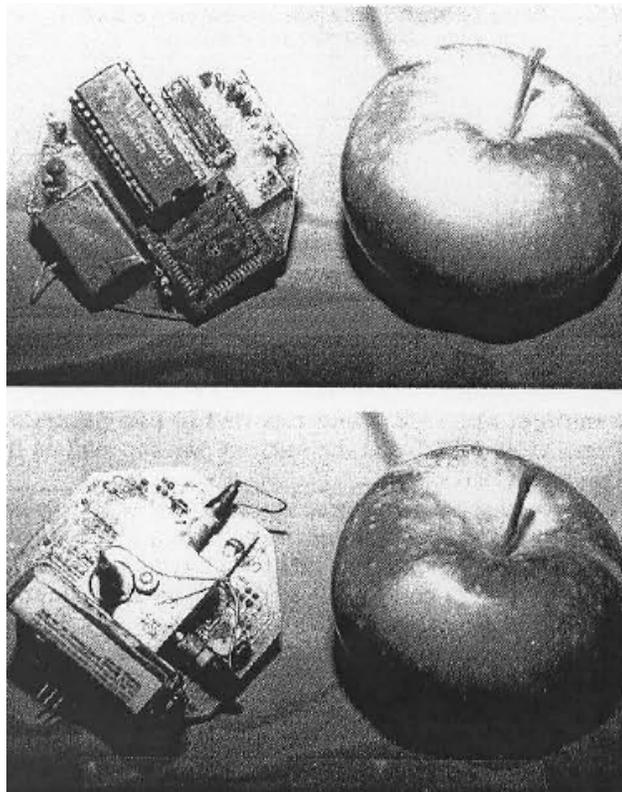
Com relação ao uso de instrumentos portáteis para a detecção de impactos durante o processo de pós-colheita de frutas, pode-se dividir em duas categorias distintas: primeiro, instrumentos capazes de captar acelerações e segundo instrumentos capazes de captar compressões (BOLLEN, 2006). Em aplicações mais genéricas há outras categoriais como os tipos utilizados para coleta de dados durante o transporte e armazenamento onde sensores de temperatura, umidade e pressão são usualmente empregados.

Os instrumentos compostos de sensores de aceleração são utilizados para quantificar os impactos sofridos por frutas durante os processos de seleção e transporte. O equipamento mais amplamente utilizado para sensoriamento de impactos é o *Impact Recording Device* (IRD), desenvolvido pela universidade de Michigan (ZAPP, 1990) e atualmente comercializado pela empresa Techmark, INC (TECHMARK, 2008). A um custo médio de sete mil dólares, este instrumento é capaz de captar acelerações nos três eixos, X, Y e Z, possui um fundo de escala de 500 g (quinhentas vezes a aceleração da gravidade) para cada eixo e é utilizado para a coleta de dados ao longo do processo de seleção de frutas e outras aplicações. O sistema foi desenvolvido com base no microcontrolador Motorola 68HC11 com uma memória externa de 32 kB e alimentado por bateria de NiCd (Níquel-Cádmio) com capacidade de 80 mAh. O acelerômetro marca Columbia Research de três eixos e 500 g de fundo de escala foi instalado em um dos lados da placa de circuito impresso de formato hexagonal, com dimensões semelhantes às de uma maçã. Na Figura 20, pode-se observar o protótipo desenvolvido e na Figura 21, algumas aplicações com o IRD, onde diferentes coberturas podem ser empregadas nos experimentos simulando a superfície de diferentes objetos.

Outro importante equipamento desenvolvido para análise impactos é produzido pela empresa (SENSOR WIRELESS, 2008) que realiza o mesmo trabalho do instrumento anteriormente descrito, porém com a capacidade de transmissão dos dados adquiridos em tempo real a um PDA via rádio frequência (Figuras 22 e 23). O custo médio deste dispositivo é de quatro mil e quinhentos dólares.

O trabalho apresentado por (LACERDA; FERRAZ, 2007) objetivou medir as acelerações a que são submetidos figos durante o transporte em um percurso de 90 km para investigar quais frequências de vibração estão presentes durante o transporte. Foram utilizados acelerômetros triaxiais de 10 g de fundo de escala posicionados em diferentes pontos da carroceria do caminhão transportador. Analisando a densidade espectral de potências dos sinais de vibração, percebeu-se a predominância de frequências de 2 e 13 Hz. Com base nestes dados, repetiu-se o experimento em laboratório, colocando caixas de figos em uma mesa vibratória que foi instrumentada com os mesmos acelerômetros. Estabeleceram a partir dos resultados dos experimentos uma tabela que quantifica os danos que os figos podem sofrer em função da intensidade e da frequência das vibrações às quais são submetidas.

Estes dois equipamentos com acelerômetros são capazes de detectar impactos, funcionando somente de modo dinâmico. A fim de checar forças de compressão estáticas sofridas por frutas, um segundo tipo de equipamentos é necessário. Com alguns destes equipamentos é possível também obter dados de impacto, contanto que a resposta em frequência destes impactos seja igual ou menor que a do transdutor.



**Figura 20: protótipo do IRD, desenvolvido em 1989.**



**Figura 21:** diferentes utilizações do IRD. No alto à esquerda, na triagem de batatas, à direita, durante a seleção de frutas e abaixo a direita, no empacotamento de ovos.



**Figura 22:** uma das variações do instrumento desenvolvido pela *Sensor Wireless*, o *Smart Spud*, é visto na figura acima, captando as acelerações sofridas por batatas durante o processo de triagem.



**Figura 23:** outra variação do instrumento desenvolvido pela empresa *Sensor Wireless*, o *Crackless Egg*, é visto na figura acima, captando as acelerações sofridas por ovos durante o processo de triagem.

Outro instrumento desenvolvido para ser uma pseudofruta capaz de adquirir dados de compressão foi descrito por (BOLLEN; TIMM; DELLA RUE, 2001) e consiste basicamente em uma célula de carga instrumentada capaz de capturar compressões e impactos verticais (Figura 24). O sinal proveniente da célula de carga no interior de um disco de 73 mm de diâmetro é amplificado e enviado a um computador para posterior análise. O disco é coberto com duas superfícies curvas, imitando uma fruta. Somente a compressão vertical é capturada, diferentemente do dispositivo proposto neste trabalho.



**Figura 24:** sensor desenvolvido para capturar a compressão vertical sofrida por frutas.

Uma outra esfera instrumentada com acelerômetros foi desenvolvida para propósitos diferentes dos anteriores. O *Spy-Cobble* (Figura 25) é um dispositivo esférico criado para averiguar a estabilidade do leito de rios com o intuito de mapear a erosão dos mesmos

(MIKOŠ; ESCORZA, 1999). O instrumento foi desenvolvido para investigar a dinâmica de um sedimento esférico em fluxos turbulentos. Este dispositivo é portanto uma pseudopedra, capaz de adquirir e processar forças de impacto e fricção que atuam em uma partícula sedimentar única no leito de um rio ou torrentes de água. O dispositivo tem um diâmetro total de 99 milímetros e uma massa de 994,6 gramas. Cada acelerômetro é montado no interior de uma esfera instrumentada medindo a aceleração dos impactos sofridos pelo instrumento. As forças de contato e fricção são captadas por sensores acústicos incorporados. Durante cada medição, o dispositivo é autônomo não tendo qualquer conexão com o exterior enquanto os sinais são armazenados internamente. Para realizar a coleta dos dados obtidos e configurar o dispositivo, uma interface de comunicação serial para um PC foi incluída.

Após o condicionamento, os três sinais de aceleração são convertidos por um ADC de 12 bits e salvos em uma memória RAM estática de 2 MBytes. Os dados são amostrados a uma taxa de 2665 amostras por canal por segundo o que possibilita a medição de 130 segundos dos três canais antes que a RAM esteja cheia. Há um controle de gatilho (limiar) para que a memória seja preenchida somente com dados relevantes. Os sinais são transferidos depois de cada experimento para um computador pessoal via comunicação serial a uma taxa de 9600 bits por segundo. A faixa de medições de impactos chega a 427 g sem amplificação analógica, e 42,7 g com amplificação de dez vezes.



**Figura 25:** a esfera instrumentada *Spy-Cobble*

## 4 MÉTODOS E MATERIAIS

Neste capítulo descrevem-se os materiais e métodos utilizados para a manufatura das esferas instrumentadas. A seção 4.1 refere-se às esferas instrumentadas desenvolvidas que utilizam cabos para a realização da coleta e na seção 4.2, às esferas sem cabos, que incluem módulo de rádio-frequência.

No que se refere às células de carga, a proposta deste trabalho foi o desenvolvimento de um protótipo com três eixos independentes montado em um volume de formato esférico, capaz de sensoriar as forças de compressão ao longo dos eixos X, Y e Z, independentemente. A célula de carga como um todo foi desenvolvida a partir de três células de carga individuais em forma de anel que foram montadas juntas, mas de modo que a compressão de um eixo não afeta e não é afetada pela compressão dos demais.

A célula de carga foi utilizada para capturar forças de compressão sofridas por frutas ao longo do processo de pós-colheita e os resultados obtidos foram utilizados posteriormente para checar os danos mecânicos sofridos pelas frutas associando estes com danos produzidos artificialmente em laboratório.

### 4.1 ESFERAS INSTRUMENTADAS COM CABO

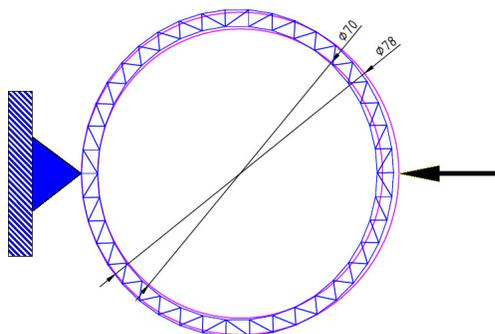
O desenvolvimento das esferas com cabos foi a etapa inicial do trabalho, o ponto de partida para análise de compressão em frutas. Partindo de uma idéia conjunta do departamento de Horticultura e Silvicultura e do Laboratório de Instrumentação Eletroeletrônica (IEE), ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, surgiu a idéia de produzir-se uma esfera instrumentada com o formato de uma fruta. Os experimentos realizados com este tipo de instrumento (pseudofruta), usualmente consistem em substituir uma fruta verdadeira pelo instrumento que normalmente possui formato semelhante. Inicialmente os esforços foram concentrados no desenvolvimento de duas esferas instrumentadas com extensômetros para análise das forças de compressão sofridas por frutas durante o processo de pós-colheita. As esferas construídas possuem diâmetros distintos (55 e 80 milímetros) para a realização de experimentos com frutas de diâmetros semelhantes.

#### 4.1.1 – Projeto mecânico

A primeira esfera construída foi projetada para ter um diâmetro final de aproximadamente 80mm, adequado para experimentos com maçãs e laranjas. Projetou-se um dispositivo composto por três células de carga distintas, cada uma delas em forma de anel. Os anéis foram dispostos de forma que a compressão sofrida por um não afetasse os demais, tornando a medida das forças de compressão individualizada, segundo o seu eixo correspondente, X, Y ou Z. Iniciou-se o desenvolvimento do projeto mecânico a partir de um experimento anterior realizado no laboratório IEE onde um pequeno anel de alumínio foi instrumentado com extensômetros resistivos (*Strain Gages*) e que possibilitou alguns experimentos iniciais. Estes experimentos não foram registrados, apenas utilizados para verificar os graus de sensibilidade e linearidade que uma célula de carga em forma de anel poderia apresentar. Obteve-se a confirmação de que seria viável a construção da esfera composta por três anéis como células de carga individuais, uma para cada eixo.

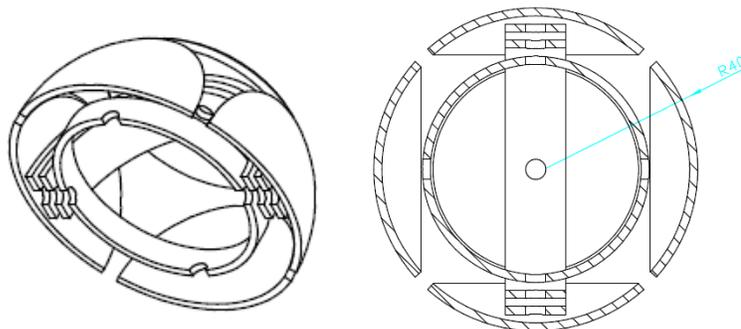
Como os valores de compressão sofridos por frutas não eram conhecidos com exatidão pelo departamento de Horticultura e Silvicultura da UFRGS, arbitrou-se um fundo de escala de 500 N de compressão para a primeira esfera a ser desenvolvida. Verificou-se posteriormente através de experimentos (capítulo 5) que, em alguns casos, os frutos sofreram forças de compressão máximas de aproximadamente 250 N.

O dimensionamento dos anéis foi feito através do software de cálculo de esforços mecânicos (*Mechanical Desktop* – pacote adicional do *Autocad*) e suas espessuras foram escolhidas de modo que suportassem uma carga de até 500 N cada. Este software informa as deformações máximas sofridas por um objeto sob determinada força de compressão ou tração através da decomposição dos esforços em elementos finitos. A Figura 26 mostra o resultado de uma das simulações realizadas com os anéis onde é possível visualizar o ponto de apoio, o sentido de aplicação da força e a rede ou malha criada pelo software. Através da variação dos parâmetros de projeto, obteve-se a espessura e largura necessária de um anel de alumínio para que suportasse uma compressão de até 500 N, deformando-se não mais que três milímetros no total. Este valor foi escolhido tendo-se o cuidado para que os anéis não encostassem uns nos outros o que afetaria a independência entre eles.



**Figura 26:** Desenho da simulação de esforço sofrido por um dos anéis da célula de carga.

A disposição física dos anéis (células de carga) que compõem a esfera pode ser compreendida observando-se a Figura 27. Tratam-se de três anéis, dois concêntricos e um ortogonal aos dois primeiros. Quatro eixos fixam os anéis entre si, sendo estes eixos solidários ao anel maior e, transpassando os demais, restringem movimentos de rotação dos anéis. Há calotas para formar o volume da esfera. Cada par de calotas é solidária com um único anel e o eixo das calotas do anel intermediário atravessa o anel maior, restringindo ainda mais a rotação entre estes dois.



**Figura 27:** desenho da esfera em perspectiva e em corte gerado.

#### 4.1.2 – Fixação dos extensômetros (*Strain Gages*)

Utilizou-se uma configuração tipo meia ponte de *Wheatstone*, onde dois elementos são ativos (*Strain Gages*) e dois são passivos, formados por resistores fixos. Esta configuração é suficiente para a formação de uma célula de carga estável e linear (DOEBELIN, 1990), pois permite a compensação da variação da resistência dos *Strain Gages* em função da temperatura, porém, teve-se a ciência de que esta não é a melhor configuração quando comparada com a configuração tipo ponte completa, pois exige um maior ganho dos amplificadores de instrumentação já que tem metade da sensibilidade. Comparando a Equação 22 (ponte com dois elementos ativos) com a Equação 23 (ponte com quatro elementos ativos), percebe-se a diferença de razão de dois que a configuração meia-ponte impõe, reduzindo a sensibilidade do sistema (DOEBELIN, 1990).

$$V_{out} = V_{exc} \left[ \frac{-\Delta R}{2RG_0} \right] \quad (22)$$

$$V_{out} = V_{exc} \left[ \frac{-\Delta R}{RG_0} \right] \quad (23)$$

A escolha pela configuração de meia ponte deveu-se ao custo dos extensômetros além do fato de tratar-se de um protótipo. A Tabela 5 mostra as características dos extensômetros, *Kyowa*, modelo KFG-1-120-C1-11, utilizados em todos os protótipos construídos.

**Tabela 5: parâmetros do transdutor de esforço utilizado, marca *Kyowa***

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Compensação de temp. para	Aço
Comprimento	1 mm
Resistência	119,8 +/- 0,2Ω
Fator <i>Gage</i>	2,11 +/- 1,0%
Coefficiente de temperatura	0,8 +/- 0,5%/100°C
Tolerância	+/- 0,85 μm/m/°C

A escolha por células de carga em forma de anel foi devido a sua simplicidade, baixo custo e robustez (BECK, 1987), além do fato de que elas podem ser dispostas de modo a formar uma esfera. A simplicidade vem do fato de que estes anéis são apenas tarugos de alumínio usinados (uma peça para cada anel). São células de carga robustas, fáceis de serem contruídas e leves.

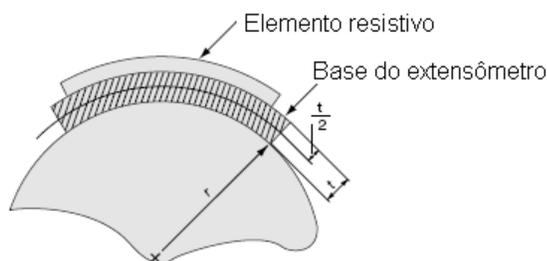
Segundo (BECK, 1987), a localização correta para os extensômetros em uma célula de carga em forma de anel é formando um ângulo de noventa graus em relação ao ponto de compressão ou tração do anel, justamente onde ocorre a maior deformação destes. Devido a algumas restrições mecânicas (furos de passagem de eixos) não foi possível afixar os extensômetros exatamente noventa graus em relação ao ponto de compressão o que acarretou em diminuição de sensibilidade.

Considerando-se a fixação de extensômetros em um elemento mola do tipo anel, dois problemas poderão ocorrer: alteração de *offset* da ponte de *Wheatstone* devido à curvatura das superfícies interna e externa (Figura 28) e desalinhamento angular (KYOWA, 2006). O erro

devido ao posicionamento angular incorreto pode ser evitado, mas, no caso de células de carga em forma de anel, o *offset* (ou desbalanço da ponte) devido à superfície curva, sempre ocorrerá. A curvatura altera a resistência inicial do extensômetro e esta alteração pode ser expressa como:

$$\varepsilon_0 = \frac{t}{2r + t} \quad (24)$$

onde,  $\varepsilon_0$  é o esforço (*strain*) inicial,  $t$  é a espessura do extensômetro mais a camada de cola e  $r$  é o raio da superfície onde o extensômetro está afixado. Se a superfície onde está colado o extensômetro é curva,  $r$  será não nulo acarretando em  $\varepsilon_0$ . A Tabela 6, apresenta os valores de resistência iniciais dos extensômetros colados internamente e externamente para o caso da esfera de 80 mm. Em função do formato circular das células de carga, todos os protótipos desenvolvidos apresentaram desbalanço inicial positivo.



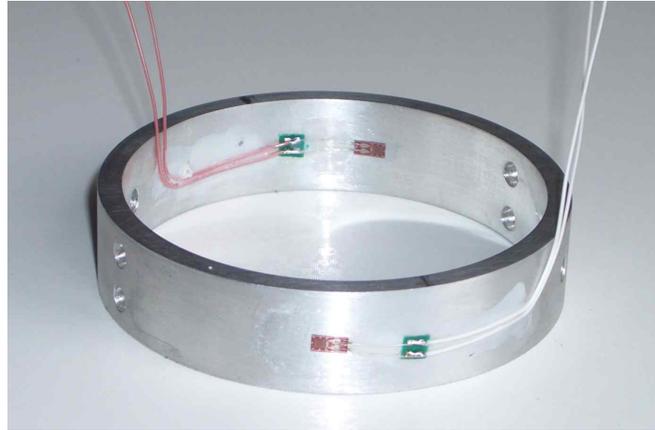
**Figura 28: efeito da variação do valor inicial do extensômetro em função da curvatura do elemento mola.**

**Tabela 6: valores de resistência dos extensômetros obtidos após fixação (valor nominal 120Ω)**

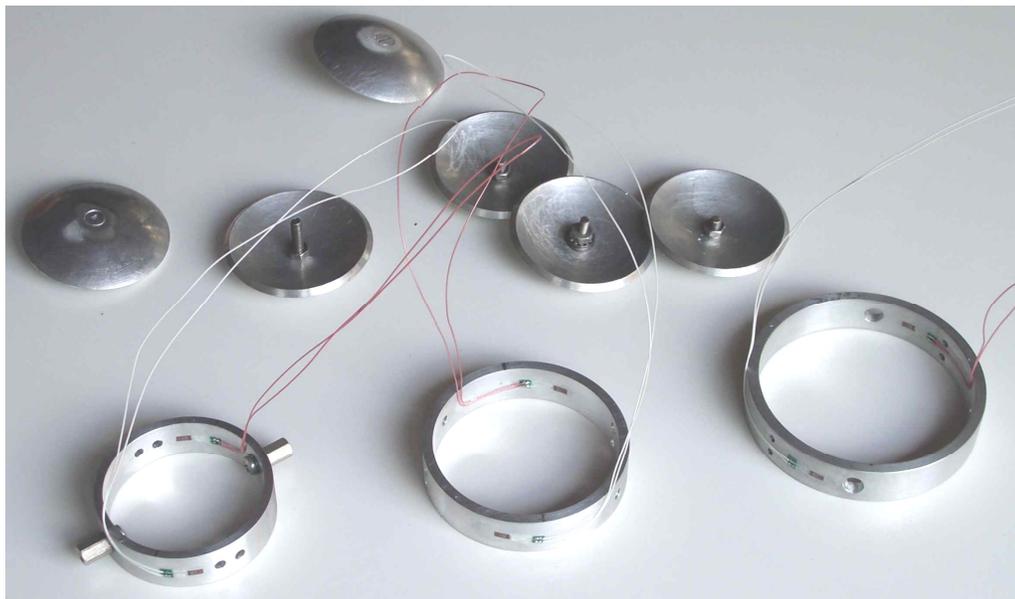
<i>Anel</i>	<i>Extensômetro Interno</i>	<i>Extensômetro Externo</i>
Pequeno	119,93	120,06
Intermediário	119,93	120,00
Grande	119,93	120,07

Observação: medição realizada com ponte LCR de 20000 contagens.

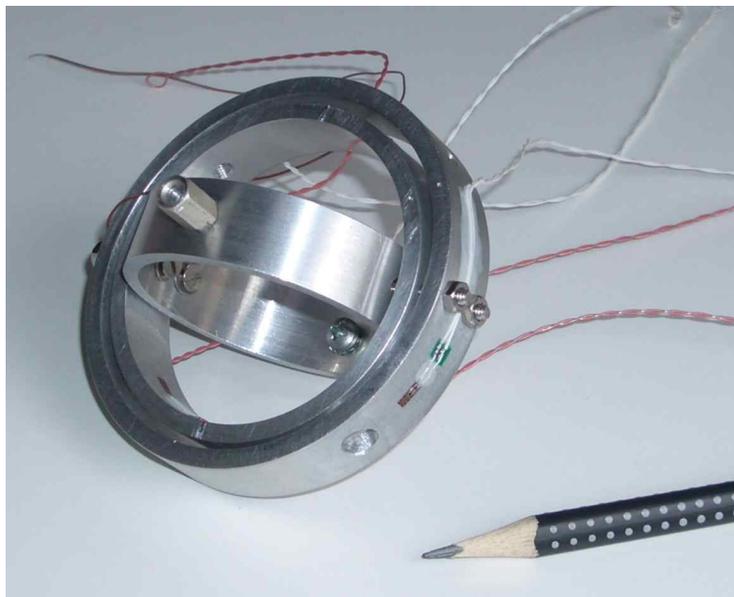
Na Figura 29, pode-se ver um dos anéis instrumentados com os dois *Strain Gages* e seus furos para fixação. A Figura 30 apresenta uma visão de todos os componentes principais, anéis e calotas, que compõem uma esfera. A Figura 31 apresenta a esfera montada sem as calotas e na Figura 32, os dois protótipos (80 e 55 mm) construídos. Foram adicionadas superfícies coloridas de EVA (Etil-Vinil-Acetato) para amortecer eventuais impactos além de correlacionar por cores os eixos correspondente a cada par de calotas com o gráfico gerado no software.



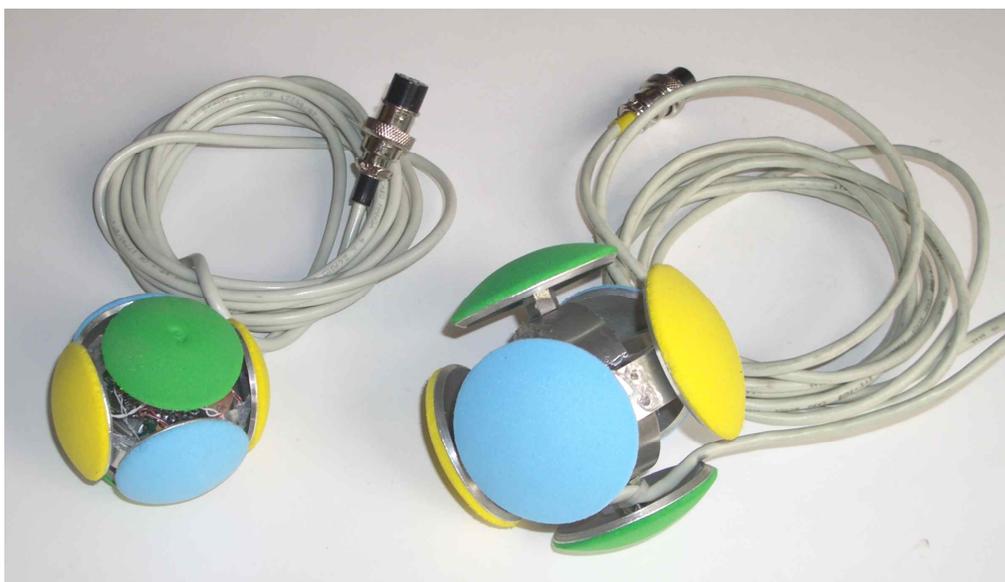
**Figura 29:** um dos anéis instrumentados que compõem a esfera. Os dois extensômetros em lados opostos são visíveis assim como os furos de passagem e fixação.



**Figura 30:** componentes da esfera de 80 mm.



**Figura 31: esfera de 80 mm montada sem as calotas.**



**Figura 32: protótipos de 80 e 55 mm com cabos.**

#### **4.1.3 – Condicionamento de sinais**

Os sinais da meia ponte de *Wheatstone* de cada célula de carga foram amplificados cerca de 620 vezes através de um amplificador de instrumentação. O valor do ganho de amplificação foi estimado inicialmente em função da máxima compressão pretendida para cada eixo da esfera, cerca de 500 N. A estimativa foi feita durante um ensaio onde foram comprimidos os anéis em série com uma célula de carga calibrada através de uma prensa. Com a amplificação, o sinal de tensão elétrica correspondente a cada anel da esfera foi suficientemente grande para ser

amostrado pelo sistema de conversão analógico-digital utilizado, com o intuito de não desperdiçar a gama dinâmica do mesmo. O protótipo maior, de 80 mm de diâmetro, recebeu em seu interior uma placa de circuito impresso contendo três amplificadores de instrumentação tipo INA118, encapsulados no padrão convencional DIP-8 (*dual in-line package*) fabricados pela *Texas Instruments*. Estes amplificadores são adequados para o uso em extensometria, conforme o fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2003), pois possui boas características para este fim como uma elevada taxa de rejeição a ruídos de modo comum. As características relevantes deste amplificador estão listadas na Tabela 7. Para a esfera de 55 milímetros foi utilizado o amplificador de instrumentação tipo MAX4460, do fabricante *Maxim*, e a placa de circuito impresso foi feita com a tecnologia SMT (*Surface Mounting Technology*) para que fosse compacta o suficiente para que coubesse no interior da esfera. As características deste amplificador estão enumeradas na Tabela 8.

**Tabela 7: características do amplificador de instrumentação INA118**

<i>Corrente de polarização</i>	1,5nA
<i>CMRR</i>	120dB
<i>Drift</i>	0,5 $\mu$ V/°C
<i>Corrente quiescente</i>	350 $\mu$ A

**Tabela 8: características do amplificador de instrumentação MAX4460**

<i>Corrente de polarização</i>	1pA
<i>CMRR</i>	120dB
<i>Drift</i>	1,5 $\mu$ V/°C
<i>Corrente quiescente</i>	700 $\mu$ A

Apesar da utilização de resistores de precisão para formar o braço fixo da ponte de *Wheatstone*, ocorreu o desbalanço da ponte, acarretando diferentes valores de *offset* (nível CC) nas saídas correspondentes a cada eixo da célula de carga. Optou-se por corrigir estes desbalanços com a inserção de um *trimpot* de alto valor em paralelo com um dos elementos do ramo passivo da ponte. Ajustou-se o *trimpot* para que o *offset* chegasse a um valor baixo, mas não nulo, de modo a ser compensado posteriormente pelo software de aquisição de dados. Esta abordagem propiciou a correção de pequenas variações ocorridas no *offset* durante o uso das esferas. Na realidade o ajuste de zero (ou tara) deve ser feito toda vez que a esfera é reposicionada, pois sempre que se rotaciona a mesma, o *offset* muda em função do peso da esfera sobre si mesma.

A Figura 33 apresenta o diagrama esquemático do sistema para um dos eixos. Pode-se observar a presença de um resistor em série, abaixo da ponte que garante que a tensão de saída da ponte de *Wheatstone* estará dentro da faixa de modo comum de entrada do amplificador de instrumentação quando operando com tensão de alimentação simples. Na Figura 34, a fotografia da placa de circuito impresso da esfera de 55 mm.

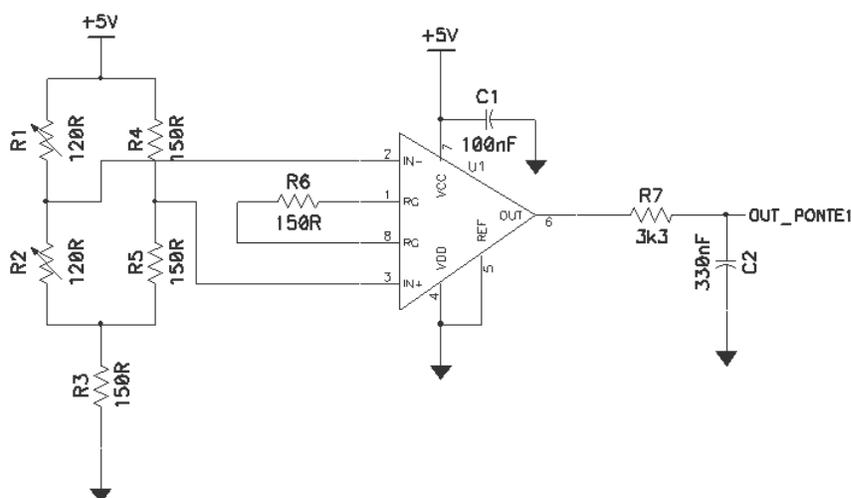


Figura 33: diagrama esquemático de um dos três amplificadores para a ponte de *Wheatstone*.

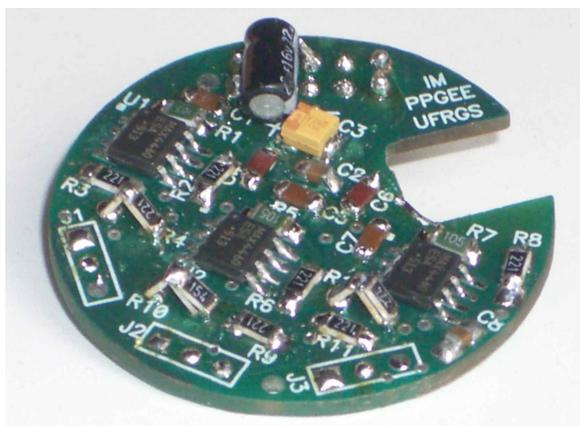


Figura 34: placa de circuito impresso desenvolvida para a esfera de 55 mm.

A excitação da ponte foi feita pela própria alimentação do condicionador, simplificando o projeto. Um cabo blindado tipo manga, com quatro vias e malha, foi utilizado para conduzir os sinais e alimentação. Para a conexão, um conector rosqueado tipo DIN (*Deutche Industrie Norm*) de seis pinos foi utilizado. O comprimento total do cabo utilizado foi de dois metros. O diagrama esquemático do condicionador de sinais completo é apresentado no apêndice A.

#### 4.1.4 – Sistema de aquisição de dados

Para tornar o instrumento portátil, optou-se pelo desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados, colocado no interior de uma caixa (152 x 109 x 70 milímetros) e alimentado por uma bateria recarregável. O sistema de conversão analógico-digital promove a digitalização dos níveis de tensão da célula de carga (esfera), possibilitando a comunicação com o PC que

salva os dados obtidos para posterior análise. Um sistema de avaliação da *Texas Instruments* (EVM1211 – *Evaluation Module* do MSC1211) foi utilizado para tal fim (TEXAS INSTRUMENTS, 2003). As razões para a escolha deste sistema foram disponibilidade, fácil programabilidade e boa resolução. Trata-se de um microcontrolador com núcleo de 8051 e com um conversor analógico-digital de alta resolução incorporado (Sigma-Delta de até 24 bits), além de interface serial (padrão RS-232) para comunicação com o PC. O sistema pode ser programado em ambiente de desenvolvimento em linguagem C ( $\mu$ V3 - *Keil Software*) onde puderam ser aproveitados trechos de código anteriormente desenvolvidos.

O EVM em si é um módulo de avaliação do microcontrolador tipo MSC1211 da *Texas Instruments* composto por uma placa, cabo e fonte de alimentação. A Tabela 9 apresenta as características principais deste sistema de desenvolvimento. O requisito mais importante para a aquisição dos dados da esfera é a resolução do conversor analógico-digital, pois a taxa de aquisição do sinal de compressão pode ser baixa e o consumo não era uma preocupação importante nesta fase do projeto.

**Tabela 9: principais características do EVM MSC1211.**

<i>Microcontrolador</i>	MSC1211Y5
<i>I/O digitais</i>	16 bits
<i>Entradas analógicas</i>	8 x ADC 24 bits
<i>Saídas analógicas</i>	4 x DAC 16 bits
<i>Memória</i>	32k ROM, 1280b RAM, 128k XRAM
<i>Comunicação</i>	2 x UART, I <sup>2</sup> C, SPI
<i>Outros</i>	Leds, Buzzer, Reguladores de tensão

Sistemas de aquisição de dados compostos por ADCs (*Analog to Digital Converter*) tipo Sigma-Delta apresentam características como baixa taxa de amostragem (até 1 kSPS), alta resolução (até 24 bits), boa linearidade entre outros requisitos importantes para o desenvolvimento de balanças com células de carga (KESTER, 2004). O dispositivo utilizado (MSC1211) inclui ainda amplificador de ganho programável, filtros digitais e DAC (*Digital to Analog Converter*) utilizado para ajuste de *Offset* interno. Foram utilizadas quatro das oito entradas analógicas disponíveis, três para a conversão do sinal de compressão relativo a cada eixo e um para a monitoração da tensão da bateria.

O EVM foi acondicionado em uma caixa plástica contendo Leds para monitoração, conectores de dados e sinais, chave liga-desliga e uma bateria de 12 Volts, 2,3 Ah no seu interior. A bateria utilizada é do tipo chumbo-ácido selada, de ciclo profundo, e é recarregada através de um adaptador externo que efetua uma carga do tipo flutuante, onde uma corrente pré-ajustada é mantida ao longo do processo de carga. Este tipo de carregador possui internamente um circuito integrado regulador de tensão configurado como fonte de corrente constante, monitorando a queda de tensão em um resistor em série com a carga. As baterias de ciclo profundo apresentam boas características de ciclagem de carga / descarga, porém ao custo de não propiciarem grandes picos de corrente. Como o consumo total do sistema de aquisição de dados é uma corrente constante de aproximadamente 170 mA, a bateria é adequada para um ciclo de uso de cerca de treze horas, tempo suficiente para a realização dos experimentos. Nas Figuras 35 e 36 são apresentados os gráficos dos processos de carga e descarga do EVM amostradas a uma taxa de trinta minutos de intervalo. O tempo de descarga ficou bastante abaixo das esperadas

treze horas (cerca de quatro horas apenas). Verificou-se que o carregador flutuante não proporcionava a carga plena da bateria (entre 12,7 e 12,9 Volts), pois a tensão a vazio não superava em muito este valor. Os fabricantes recomendam uma tensão em torno de 13,8 Volts para cargas lentas. Substituindo-se o carregador por outro adequado, verificou-se a carga plena da bateria. A corrente final ou corrente de manutenção é de cerca de 50 mA. A Figura 37 mostra o protótipo do sistema de aquisição de dados externo desenvolvido.

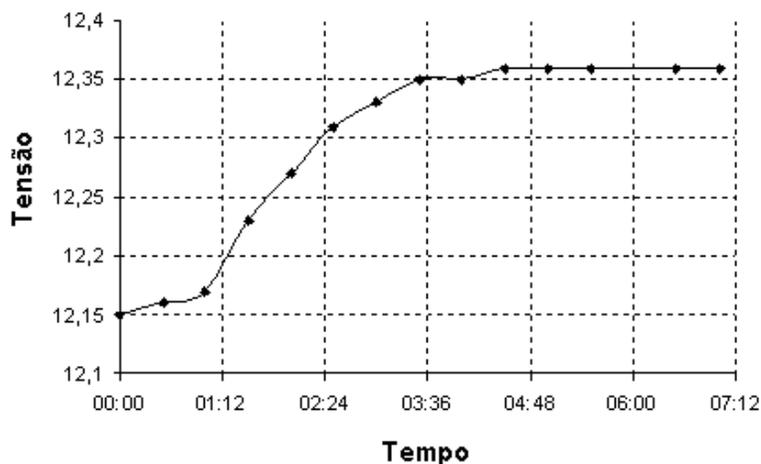


Figura 35: gráfico da carga da bateria utilizada no sistema de aquisição de dados.

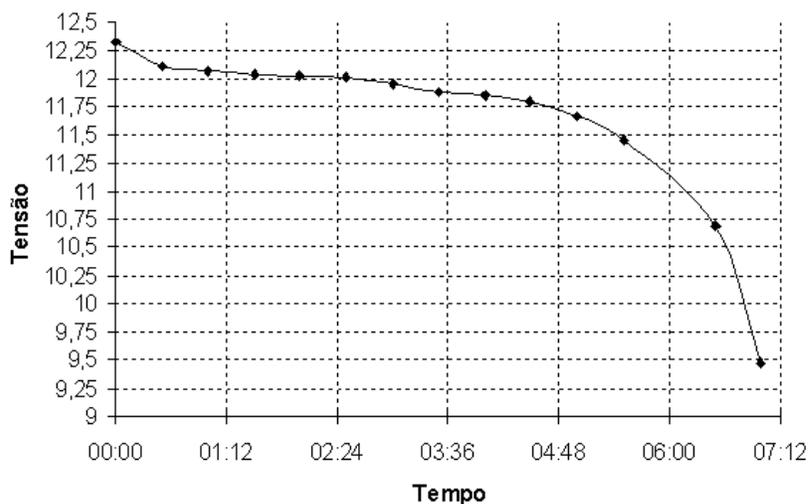


Figura 36: gráfico da descarga da bateria utilizada no sistema de aquisição de dados.



**Figura 37: sistema de aquisição de dados com o EVM MSC1211.**

#### 4.1.5 - Softwares desenvolvidos

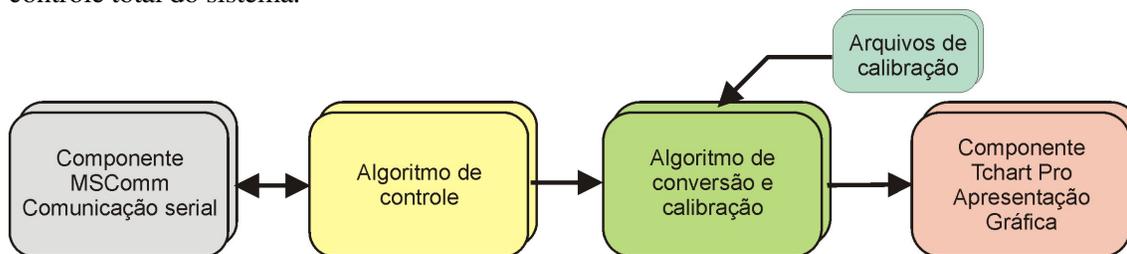
O *firmware* residente na memória *flash* interna do microcontrolador realiza as seguintes tarefas: aquisição e conversão de quatro canais analógicos, decimação e filtragem digital do sinal proveniente do conversor tipo Sigma-delta e comunicação com o PC através de uma interface padrão RS-232, com um protocolo próprio orientado por caracteres e com *handshake* tipo pára-espera.

O microcontrolador MSC1211 possui uma ROM (*Read Only Memory*) interna contendo algumas rotinas úteis que facilitaram o desenvolvimento do *firmware*. Foram utilizadas as rotinas de comunicação serial e ajuste automático da taxa de comunicação (*auto baud rate*). A comunicação serial é realizada a uma taxa de 19200 bps em uma rede tipo RS-232C. Os sinais auxiliares RTS (*Request To Send*) e DTR (*Data Terminal Ready*) são utilizados para reinicializar e recarregar o *firmware* pelo PC via software, proporcionando maior controle sobre o sistema de aquisição de dados. O controle do fluxo de dados é feito pelo software residente no PC caracterizando uma configuração simples do tipo mestre-escravo. Após receber o comando de aquisição de dados, o microcontrolador adquire as três informações relativas a cada eixo de compressão da esfera em seqüência a uma taxa de amostragem de 100 Hz. Quatro amostras são descartadas para filtragem por cada canal o que reduz a uma taxa efetiva de 8,3 amostras por segundo por canal. O apêndice D traz a listagem do *firmware* desenvolvido para o EVM MSC1211.

Uma vez que os sinais das três células de carga estão digitalizados, o software residente no PC realiza as seguintes tarefas básicas: conversão do valor de tensão digitalizado no valor correspondente ao esforço sofrido por cada um dos três eixos (em Newtons), ajuste do zero inicial (*offset*) do valor do peso e visualização do peso de três formas: gráfico registrador, instrumento tipo relógio e valor numérico absoluto. O software foi desenvolvido no ambiente integrado C++ Builder 6.0.

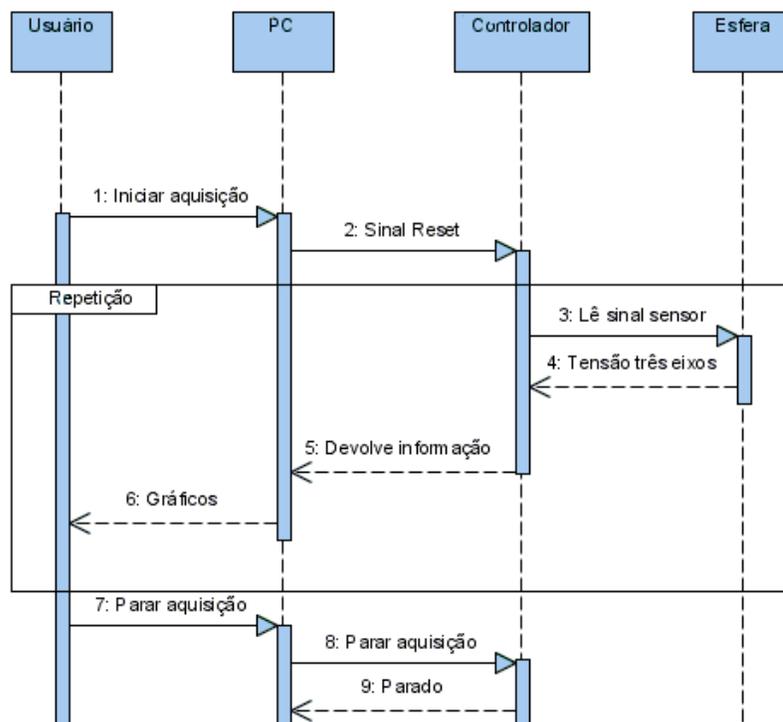
O funcionamento básico do software pode ser compreendido observando-se o diagrama de blocos da Figura 38. O sinal digitalizado pelo conversor AD é obtido pelo PC através do canal serial RS232. O componente tipo OCX (*Ole Control Extended*) MSComm da Microsoft foi utilizado para realizar esta tarefa. O formato dos dados seriais é do tipo 8-n-1 (oito bits, sem paridade, um stop bit) e a taxa de transmissão de 19200 bps é ajustada automaticamente através

da rotina de *auto baud rate* interna do microcontrolador. O sinal de *handshake* DTR da interface RS232 é utilizado pelo software para efetuar o *reset* do microcontrolador, obtendo assim o controle total do sistema.

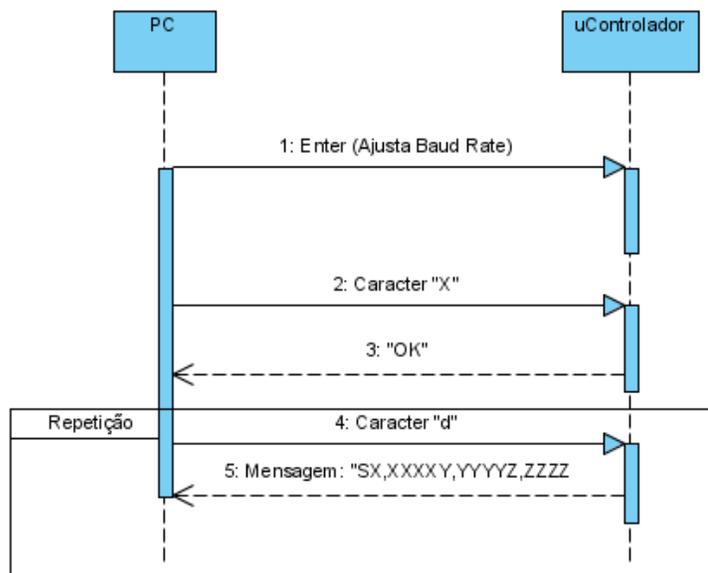


**Figura 38: diagrama de blocos simplificado do software.**

A inicialização do sistema é feita da seguinte forma: um caracter ‘Enter’ é enviado para realizar o auto-ajuste da taxa de comunicação. A seguir, é enviado o caracter ‘X’ para testar o canal de comunicação. Se o microcontrolador responder ‘OK’, a comunicação foi estabelecida, caso contrário, o software comunica o usuário a falha ocorrida. A seguir, caracteres ‘B’ são enviados a cada segundo para que o sistema de aquisição de dados retorne o valor da tensão da bateria. Se este valor estiver abaixo de dez Volts, o software sinaliza o usuário para que efetue a recarga da mesma. Após a inicialização, o protocolo de comunicação para a obtenção dos dados entre o software do PC e o microcontrolador segue o seguinte formato: o software residente no PC envia o caracter “d” e o *firmware* do microcontrolador responde com uma mensagem, por exemplo, igual a ‘S1,03452,09450,9234’ sendo neste caso, o dado do canal 1 igual a 1,0345 Volts, do canal 2, 2,0945 Volts e do canal 3, 0,9234 Volts. Um diagrama de seqüências do sistema é apresentado na Figura 39 e na Figura 40, o detalhamento da comunicação realizada entre o software e o *firmware*.



**Figura 39: diagrama de seqüência básico do funcionamento do sistema de aquisição.**



**Figura 40: diagrama de seqüência da comunicação realizada entre o software e o *firmware*.**

Uma vez que os dados foram obtidos pelo canal serial, os valores de tensão são convertidos em Newtons de compressão através dos parâmetros de calibração. Estes parâmetros foram obtidos através da calibração da célula de carga de três eixos em um procedimento de comparação com uma célula de carga comercial previamente calibrada. O ajuste de zero (*offset*) é feito através de um algoritmo de auto-ajuste que anula o erro (Figura 41). Este valor é necessário para compensar o zero (tara), pois a esfera é capaz de medir o seu próprio peso além de apresentar um residual de *offset* da ponte de *Wheatstone*. Os dados de tensão provenientes de cada eixo da esfera, convertidos em Newtons, são impressos em um gráfico e em um instrumento tipo relógio (componente VCL Tchart para o C++Builder) além de ser apresentado numericamente. Os dados podem ser adquiridos e impressos no gráfico de cinco formas diferentes; aquisição contínua, aquisição única, aquisição passo a passo, aquisição tipo sobre-escreve e janelas. Os dados visualizáveis no gráfico são; valor instantâneo, valor de pico e valor médio, atualizados em tempo de execução.

Os dados adquiridos podem ser exportados, na forma de figura do gráfico (bitmap ou jpeg) ou de vetores de dados (xls, txt ou xml). Para simplificar os experimentos um botão 'Salvar' foi adicionado à interface gráfica de modo a realizar o salvamento rápido dos dados adquiridos. Desta forma, sete arquivos são gerados, três do tipo bitmap, três tipo XML (*eXtensible Markup Language*) e um arquivo texto que descreve o experimento realizado. Desta forma tem-se o controle dos dados adquiridos e a possibilidade de exportação via WEB através dos arquivos XML, convenientes para isto devido ao seu tamanho e facilidade de descrição de tipos de dados (W3C, 2008). Os parâmetros de configuração do software permitem a escolha da porta serial utilizada, os valores de ajuste de escala (ganho) e *Offset* para um total de quatro diferentes esferas. Na Figura 42, pode-se observar a tela gráfica do software.

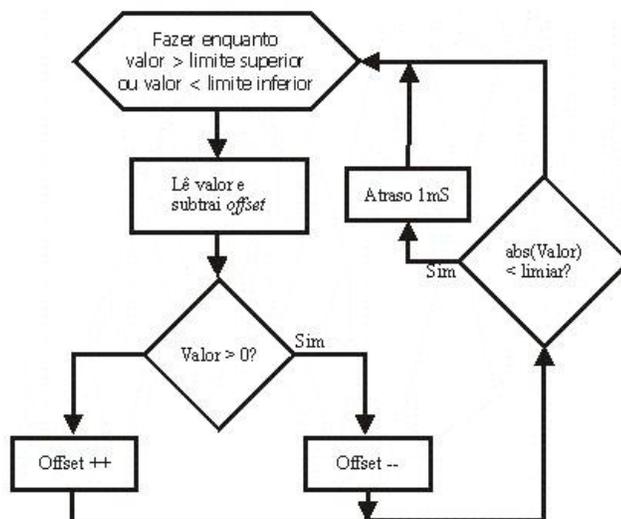


Figura 41: fluxograma do algoritmo de compensação de *offset*.



Figura 42: imagem da interface gráfica do software desenvolvido para análise de compressão.

Um software adicional para restauração e processamento dos dados salvos foi desenvolvido. Os dados salvos no formato XML, um arquivo para cada eixo, são recuperados para posterior análise. Com a restauração dos dados em um novo gráfico, é possível realizar operações matemáticas com as três componentes de compressão, como soma, média, valor máximo, suavização (*spline*) entre outras. Após o processamento dos gráficos, estes podem ser salvos como imagem (JPEG e BMP) ou XML, para reprocessamento.

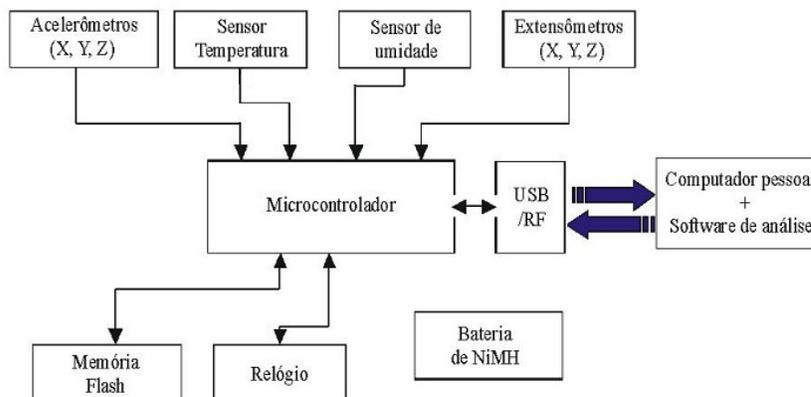
## 4.2 - ESFERAS INSTRUMENTADAS SEM CABOS

Com o intuito de desenvolver esferas autônomas, livres de cabos e componentes externos, projetou-se um sistema de aquisição de dados para ser inserido no interior de duas outras esferas. Uma delas foi concebida de modo a adquirir dados de compressão e aceleração e a outra, somente dados da aceleração. Além destas grandezas, incluiu-se a aquisição da temperatura e umidade para a realização de experimentos de transporte e armazenagem.

O sistema de aquisição de dados foi feito com um microcontrolador que possui conversor analógico-digital interno. Este sistema é capaz de armazenar dados pelo período de alguns dias sendo alimentado por baterias. Ao final do período de aquisição, os dados podem ser transferidos para um computador onde a análise dos dados de impactos, compressões, temperatura e umidade é realizada. O conversor analógico-digital de várias entradas é utilizado para a conversão dos sinais oriundos dos acelerômetros (X, Y e Z), dos extensômetros (X, Y e Z) e dos sensores de temperatura e umidade além da tensão da bateria. O envio dos dados adquiridos pode ser feito em tempo real, através de um módulo transmissor de RF (rádio-freqüência) incorporado, ou ao final de um período pré-determinado pelo mesmo módulo de RF ou através de um cabo padrão USB.

### 4.2.1 Hardware

O hardware foi desenvolvido tendo como principais compromissos o baixo consumo, possibilidade de coleta de dados via RF ou cabo e boa capacidade de memória interna. No apêndice B encontram-se os diagramas esquemáticos do hardware desenvolvido para as esferas instrumentadas sem cabos. Almejando a modularidade do sistema, foram projetadas e construídas duas placas de circuito impresso (Apêndice C), uma contendo os sensores e a outra o microcontrolador, memória, radio e os demais dispositivos. Objetivou-se também o possível desenvolvimento de futuros instrumentos de medição portáteis utilizando a mesma placa digital, trocando apenas a placa de sensores. As placas de circuito impresso foram desenhadas com o software Accel PCAD 99 de captura esquemática e roteamento. Nas subseções seguintes descreve-se cada item escolhido para o projeto do hardware. O diagrama de blocos básico contendo os dispositivos utilizados no hardware das esferas instrumentadas sem cabos é apresentado na Figura 43. Além dos dois protótipos, um adaptador USB-RF utilizando a mesma placa foi desenvolvido para a comunicação do PC com as esferas.



**Figura 43: diagrama de blocos da eletrônica da esfera instrumentada sem cabos.**

### a) Microcontrolador

O modelo escolhido foi o Microchip PIC18F4550. Os critérios para escolha foram o seu baixo consumo, bom para aplicações alimentadas à bateria, grande número de portas analógicas e digitais, memória *flash* interna, transceptor USB incorporado além de outras características importantes, como barramento I<sup>2</sup>C e SPI. A Tabela 10 enumera as principais características deste microcontrolador.

**Tabela 10: principais características do microcontrolador utilizado**

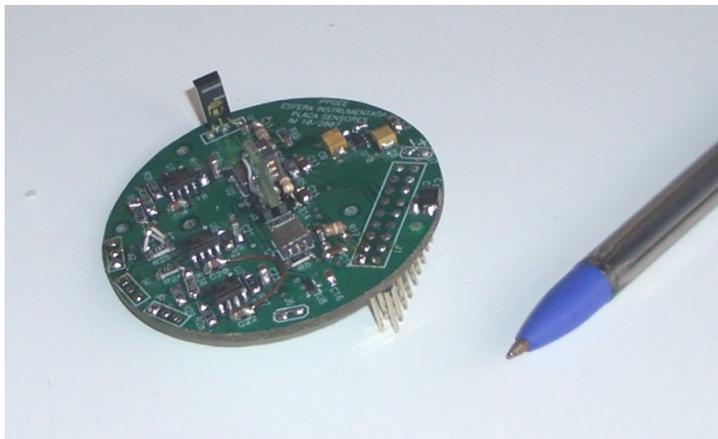
<i>Microcontrolador</i>	PIC18LF4550
<i>I/O digitais</i>	32 bits
<i>Entradas analógicas</i>	13 x ADC 10 bits
<i>Memória</i>	32 kB ROM, 2048 Bytes RAM, 256 Bytes E <sup>2</sup> PROM
<i>Comunicação</i>	USB, UART, I <sup>2</sup> C, SPI
<i>Outros</i>	PLL interno, baixo consumo, Watchdog

Para programar o microcontrolador foi adquirido um programador / depurador (Mikroelektronika, Pic Flash2) que, em conjunto com um sistema de desenvolvimento baseado em linguagem C (MikroC), facilitou e reduziu o tempo de depuração do *firmware*. O programador / depurador é do tipo em circuito (*in circuit*) ou seja, pode executar as instruções do *firmware* passo a passo além de permitir pontos de parada em hardware (*hardware break points*). O hardware é emulado e parte da memória *flash* do microcontrolador é utilizada para a depuração. O software utilizado para a programação é um IDE (*Integrated Development Environment* – ambiente de desenvolvimento integrado) e possui uma vasta gama de funções incorporadas, reduzindo o tempo de desenvolvimento.

### b) Acelerômetros

Os acelerômetros utilizados são produzidos através da tecnologia chamada MEMS (*Micro Electrical-Mechanical System*) que são dispositivos mistos, mecânicos e elétricos, feitos em processos microeletrônicos. O modelo de acelerômetro utilizado, ADXL 193 da Analog Devices, apresenta fundo de escala de 250 g (250 vezes a aceleração da gravidade, positiva e negativa) e este fundo de escala é necessário visto que frutas podem sofrer impactos desta magnitude quando sofrem quedas de mais de um metro de altura (BOLLEN; TIMM; DELLA RUE, 2001). O critério de escolha, comparando-se com modelos concorrentes, foi o menor consumo (1,5 mA). Estes dispositivos são muito compactos (5x5mm), possuem eixo de medição simples e condicionamento de sinais completo em seu interior que inclui excitação, amplificação, demodulação e filtro passa-baixas. São adequados para medições estáticas (gravidade) ou dinâmicas (vibrações) e sua indicação primária é para o uso em sensoriamento de impacto em automóveis (disparo de *Air Bags*). O dispositivo dispõe de um pino de entrada para auto-teste e, com o intuito de facilitar a etapa de testes de hardware, deixou-se uma espera na placa de circuito impresso para a realização de ensaios virtuais (sem impactos reais) onde sinais provenientes de um gerador de funções simulam impactos. A resposta em frequência destes sensores é de até 400 Hz e sua tensão de saída é centrada na metade da escala (2,5 Volts para a aceleração estática igual a zero g). Existem duas versões, uma de 125 g de fundo de escala e outra de 250 g, compatíveis pino a pino, o que propicia possíveis alterações no hardware.

Os acelerômetros foram dispostos no centro da placa de circuito impresso, orientados segundo o seu eixo cartesiano, X, Y e Z sendo que o correspondente ao eixo Z necessitou de uma pequena placa de circuito impresso adicional posicionada verticalmente (Figura 44).



**Figura 44: placa de sensores.**

### c) Extensômetros

O sensoriamento de compressões sofridas pela esfera foi realizado através de células de carga em forma de anel, já descritas na seção 4.1. A única diferença com relação às anteriormente desenvolvidas foi no condicionamento de sinais onde se objetivou a minimização do consumo da ponte, com a intenção de utilizar-se um sistema alimentado a baterias. Para tanto, a tensão de excitação foi reduzida a 1,2 Volts, a resistência do braço auxiliar da ponte de *Wheatstone* foi aumentada além do resistor série com a ponte que também foi aumentado. Como conseqüência, diminui-se a sensibilidade da ponte o que exigiu maior ganho dos amplificadores de instrumentação. O consumo calculado ficou em torno de 7 mA e o medido em 7,8 mA. A calibração dos anéis foi feita individualmente, a fim de obter os ganhos e correções do desbalanço da ponte antes da montagem do protótipo final. O sistema de fixação dos anéis entre si foi melhorado em comparação aos protótipos anteriores (com cabos) com substituição dos eixos lisos por parafusos.

### d) Sensor de temperatura

O sensor de temperatura utilizado, marca National LM61, é do tipo integrado linearizado, necessitando somente a alimentação, digitalização do sinal de saída e adequação de escala (*slope*). A escolha deste dispositivo foi devida a seu baixo consumo, simplicidade de uso em função de suas características lineares e dimensões pequenas (encapsulamento SOT 23 – *Small Outline Transistor*). A saída deste sensor tem um *Offset* de 600mV o que permite medições de temperaturas negativas sem a necessidade de alimentações simétricas, embora o restante do instrumento não seja capaz de operar em temperaturas negativas, como no caso da bateria empregada. Em experimentos em câmaras frigoríficas a bateria poderia ser substituída ou até mesmo cabos poderiam ser utilizados entre as placas de sensores e digital, levando também a alimentação. De acordo com os dados do fabricante este sensor apresenta uma não-linearidade de +/- 0,8 °C e uma exatidão de +/- 3 °C em toda a faixa operacional.

### e) Sensor de umidade

O sensor de umidade escolhido também é do tipo integrado, linearizado, necessitando somente a alimentação e digitalização do sinal de saída do sensor (*Honeywell*, da série HIH). Estes sensores de umidade relativa utilizam um polímero isolador poroso posicionado acima de um capacitor de três camadas com placas de platina. Quando em operação, o vapor da água modifica a capacitância do sensor pois pode atravessar uma placa de platina porosa que forma o capacitor. A poeira que incidir sobre o sensor não afeta substancialmente seu funcionamento pois o polímero isolador externo não permite que a poeira atinja o dielétrico. No caso de excesso de contaminante, o sensor tem seu tempo de resposta reduzido. O modelo HIH-4000 da *Honeywell* é um sensor de umidade relativa (UR) de baixo consumo (máx. 500  $\mu$ A) adequado para aplicações alimentadas à bateria. Como desvantagem, não pode operar no ponto de orvalho (100 % de umidade) quando passa a indicar 0 % de UR. A correção do ganho pode ser feita por uma aproximação de primeira ordem fornecida pelo fabricante e a exatidão obtida é de  $\pm 3,5$  % UR. A faixa de temperatura de operação vai de 0 a 50 °C em ambiente de até 99 % de UR ou de -40 a 85 °C em ambiente de até 50 % de UR.

### f) Armazenamento dos dados adquiridos

Foi utilizada uma memória tipo *Flash* com capacidade de 128 MB (1 Gb) para o armazenamento dos dados. O tipo de memória escolhido (NAND) não necessita de tensão elevada para gravação e é largamente utilizada hoje em dia em *Pendrives* e *MP3 Players*. O dispositivo de memória empregado (*Hynix HY27UF08*), tem barramento de oito bits compartilhando endereço com dados e *latches* internos para salvar os respectivos bytes. Apresentam baixo consumo que pode ser controlado através do *firmware* utilizando-se uma área de *cache* interna de 2kB. A gravação é feita por blocos de 2kB e deve-se apagar o bloco antes de efetuar uma nova gravação já que o processo de gravação das *Nands* é na verdade um apagamento de bits. Há modelos com capacidades maiores, mas com compatibilidade de pinagem, facilitando futuras alterações. O encapsulamento SMD do dispositivo utilizado propiciou o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso pequena. A Tabela 11 apresenta os consumos e tempos das operações de escrita, leitura e apagamento de blocos da memória empregada.

**Tabela 11: tempos e consumo típicos da memória *Flash***

<i>Operação</i>	<i>Tempo típico</i>	<i>Consumo típico</i>
Leitura seqüencial	50 nS	10 mA
Programação	300 nS	10 mA
Apagamento (Bloco)	2 mS	10 mA

O tamanho dos blocos de dados a serem gravados na memória é variável, podendo atingir um máximo de 2019 bytes. Neste caso, considerando o maior tamanho possível dos dados adquiridos é possível gravar até 63397 registros. Estes registros são compostos por  $n$  vezes os dados aceleração e compressão para os três canais, temperatura, umidade e dados de relógio, sendo  $n$ , o número de amostras independentes pré-determinadas.

### g) Coleta dos dados adquiridos via transceptor de RF

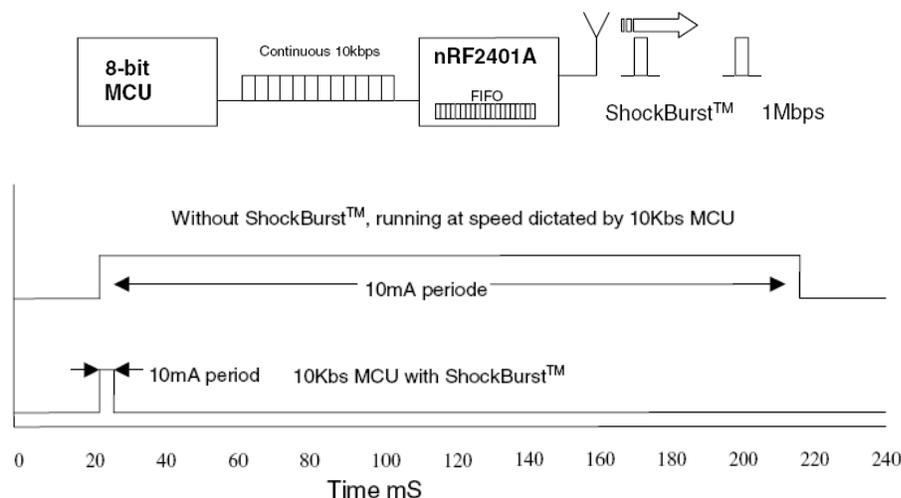
O envio dos dados adquiridos pode ser realizado através de um sistema transceptor de rádio frequências que opera na faixa de 2,4 GHz. O módulo transceptor de dados digitais da *Wenshing Electronics*, modelo TRW24G, utiliza um circuito integrado nRF2401 do fabricante *Nordic Semiconductor*. Emprega a técnica de modulação digital GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) que reduz o espalhamento espectral devido à modulação de frequências e opera na faixa de 2,4 GHz, dentro do espectro de radiação restrita da Anatel, a faixa ISM (*Instrumentation, Medical and Scientific*), não necessitando de homologação. É dito pela empresa produtora que este é o menor módulo de comunicação sem fios deste gênero no mundo. Pode operar a taxas de 1 Mbps ou 250 kbps, onde a distância máxima para operação é de até 280m em linha de visada para a taxa de 250 kbps. Possui antena do tipo planar incorporada e encontra aplicação em vários produtos como fones de ouvido, alto-falantes, celulares, teclados, intercomunicadores, mouses, entre outros. Pode operar tanto com sinais digitais como sinais analógicos, cobrindo neste último caso, a faixa de áudio. As características principais deste módulo estão listadas na Tabela 12.

**Tabela 12: principais características do transceptor de RF.**

<i>Faixa de frequências</i>	2.4~2.524 GHz
<i>Modo de modulação</i>	GFSK
<i>Faixa operacional de alimentação</i>	1,9 a 3,6 Volts
<i>Faixa operacional de temperatura</i>	-40 a +85 °C
<i>Número de canais</i>	83
<i>Taxas de transmissão</i>	250 a 1000 kbps
<i>Espaçamento entre canais</i>	1MHz
<i>Sensibilidade 0,1%BER @ 1Mbps</i>	-80dB
<i>Máxima potência de saída</i>	0 dBm

A técnica de transmissão de dados *ShockBurst*, de propriedade do fabricante e incorporada neste módulo de RF, utiliza uma memória FIFO (*first in, first out*) interna para receber os dados a uma baixa taxa de comunicação e transmitir estes dados em uma alta taxa, propiciando a redução do consumo de operação (Figura 45). Quando se utiliza o nRF2401 neste modo, consegue-se acesso a taxas de até 1 Mbps através do canal de RF de 2,4 GHz sem a necessidade de implementação de memória circular no microcontrolador utilizado para o processamento dos dados. Operando no modo *ShockBurst*, o nRF2401 tem o seu consumo médio de corrente e o risco de colisões de dados ‘no ar’ reduzidos, devido ao tempo de transmissão menor.

O nRF2401 é programado utilizando uma interface simples de três fios (SPI) onde a taxa de dados pode ser decidida pela velocidade de acesso do microcontrolador. Quando alimentado por 3,3 Volts, pode atingir potências de até 0 dBm de saída consumindo cerca de 13 mA. O consumo cai para cerca de 1 mA no modo *ShockBurst* e 12  $\mu$ A no modo de espera. A sensibilidade de entrada é de -80 dBm a uma taxa de 1 Mbps.



fonte: [www.laipac.com.tw](http://www.laipac.com.tw)

**Figura 45: método *ShockBurst* para redução de consumo e colisões de dados no ar.**

## h) Coleta dos dados adquiridos via cabo USB

Como método alternativo de coleta, incluiu-se uma interface USB (*Universal Serial Bus*). O uso da interface USB como padrão é vantajoso quando comparado com outras interfaces por sua simplicidade do ponto de vista do usuário, aliado ao fato de que, atualmente, já não são muitos os computadores pessoais portáteis equipados com interface serial padrão RS232 (ENGELBERG; KAMINSK; HORESH, 2007). Utilizou-se a interface no modo HID (*Human Interface Device*) por ser de mais fácil implementação já que no sistema operacional Windows, o modo HID tem *driver* nativo, não necessitando o desenvolvimento de *driver* específico. Como desvantagem, o modo HID é o mais lento, com taxa de comunicação de 64 kB/s.

A interface USB utiliza quatro fios para a comunicação entre dispositivos e um PC. É na realidade um sistema de comunicação *Half-duplex* ou seja, um só canal de comunicação com transmissão e recepção não simultâneas de dados. Dois dos fios de um cabo USB são de alimentação de 5 Volts CC, disponível para alimentar o dispositivo conectado à porta USB. Inicialmente, a corrente disponível é de 100 mA mas pode ser negociada, após a identificação do dispositivo conectado a USB, em até 500 mA. No protótipo desenvolvido, limitou-se em 200mA a corrente disponível pela interface USB, que foi utilizada para realizar a recarga das baterias de NiMH (Níquel-Hidreto metálico) utilizadas. Os dois fios restantes carregam os sinais de dados na forma diferencial, característica que aumenta imunidade a ruídos e é propícia para transmissão em altas velocidades. As taxas de comunicação disponíveis são 1,5 Mb/s e 12 Mb/s para os modos baixa e alta velocidade na especificação USB 1.1. Com a especificação USB 2.0 é possível obter-se taxas de até 480 Mb/s (USB\_ORG, 2008).

A implementação da interface USB exige a criação de um arquivo chamado descritor que inicializa a comunicação com o PC. Neste arquivo estão informações como tamanho do pacote de transmissão, tamanho do pacote de recepção, identificação do dispositivo, identificação do fabricante, corrente máxima desejada, entre outras. O microcontrolador utilizado nas esferas instrumentadas sem cabos foi o PIC18F4550, que possui um módulo

USB 2.0 incorporado além do transceptor, bastando conectar dois pinos, D+ e D-, ao conector padrão. O desenvolvimento do software e do *firmware* de comunicação USB está descrito na subsecção 4.2.2.

### i) Relógio de tempo real

O sistema de aquisição de dados desenvolvido produz uma marca temporal (*Time Stamp*) a cada amostra gravada na memória ou enviada em tempo real a fim de correlacionar os dados gravados com o evento ocorrido (impacto ou compressão). Estas marcas temporais são produzidas por um relógio de tempo real ou RTC (*Real Time Clock*) do fabricante Dallas Semiconductor, tipo DS1388 que, além de ser um RTC, possui funções acessórias como supervisor para sistemas microcontrolados e E<sup>2</sup>PROM. O RTC comunica-se com o microcontrolador através de uma interface SPI a uma taxa de 400 kHz e disponibiliza os dados de tempo (centésimos de segundo, segundos, minutos e horas), data (dia da semana, dia do mês, mês e ano) além de possuir 512 B de E<sup>2</sup>PROM para a gravação de configurações pelo usuário. O bloco supervisor possui monitor de tensão de alimentação e reinicializa o microcontrolador se esta estiver abaixo de um limiar pré-estabelecido. Além desta função, o supervisor monitora o sinal de *Reset* e detecta quando este for acionado através de uma chave e elimina eventuais ruídos de acionamento da chave de *Reset* (*bouncing*), mantendo o sinal em nível lógico baixo por alguns instantes. Por tratar-se de um dispositivo de baixo consumo sua aplicação é recomendada para equipamentos portáteis. A corrente de repouso é 100  $\mu$ A, e 250  $\mu$ A são consumidos a cada leitura dos dados de relógio.

### j) Fonte de alimentação

Excetuando os acelerômetros e o sensor de umidade, todos os outros componentes escolhidos para o sistema operam a partir de uma tensão de alimentação de 3,3 Volts. Com base nisto, escolheu-se alimentar o sistema a partir de duas células de NiMH (Níquel-Hidreto Metálico) ligadas em série fornecendo 2,4 Volts. Um regulador de tensão chaveado tipo *Step-up, Boost* não isolado, eleva a tensão a 3,3 Volts. A partir dos 3,3 Volts disponíveis, eleva-se para 5 Volts, tensão necessária para alimentar os acelerômetros e o sensor de umidade. Este último conversor é um *Charge Pump*, pois a corrente consumida pelos sensores é baixa (aproximadamente 5 mA). A escolha dos conversores (MAX1388 e REG710) deveu-se aos aspectos eficiência e nível de ruído produzido (EREN; AI-SHOAILI; MILARSKI, 2004) além da simplicidade de uso, pois ambos incorporam o transistor chaveador em seu interior necessitando somente o elemento reativo externo. A escolha da bateria de tipo NiMH deveu-se à simplicidade para recarregá-las e a sua grande capacidade de carga (MICROCHIP, 2007). Foram utilizadas baterias de tamanho AA, 2500 mAh (Sony, modelo HR). A recarga é feita via cabo USB, em um processo de carga lenta. Na Tabela 13 estão os consumos previstos e medidos dos dispositivos escolhidos. Na Tabela 14, os consumos totais medidos. A coluna *consumo A* refere-se ao pior caso e na *coluna B* estão os consumos em operação normal.

**Tabela 13: consumo por dispositivo (teórico).**

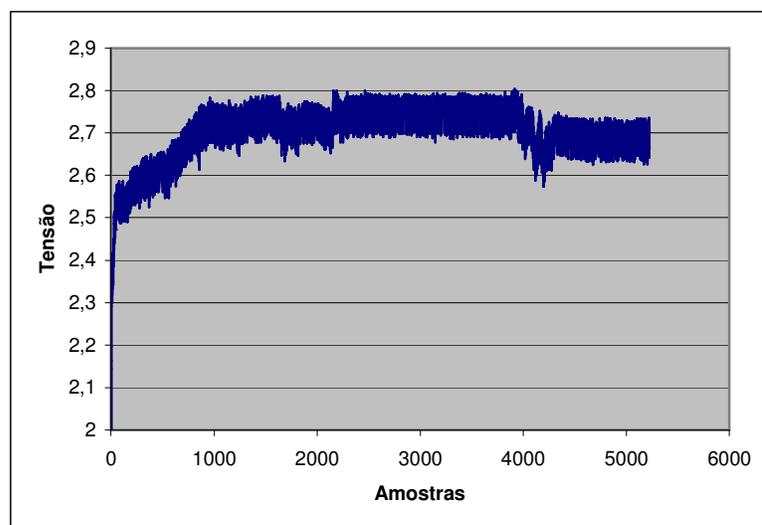
<i>Componente</i>	<i>Descrição</i>	<i>Tip(mA)</i>	<i>Max(mA)</i>	<i>Observações</i>
PIC18LF4550	Microcontrolador	1,3	3	Operando em 3V, 4MHz
nRF24G	Módulo RF	0,8	19	Típico = corrente média
DS1388	RTC	0,25	0,7	

HY27UF81	Memória Flash	10	20	Em operação
MAX4460	OpAmp	2,1	2,7	Três dispositivos
REG710	Step-up 5V	0,065	0,1	
ADXL193	Acelerômetro	4,5	6	Três dispositivos
HIH4000	Higrosensor	0,2	0,5	
Extensômetros	Ponte <i>Wheatstone</i>	8	8	Três dispositivos
LM35	Termosensor	0,06	0,1	Dependente da temperatura
<i>Total (mA)</i>		<i>28,275</i>	<i>60,1</i>	

**Tabela 14: consumo por placa (medido).**

<i>Descrição</i>	<i>Consumo A (mA)</i>	<i>Consumo B (mA)</i>	<i>Observações</i>
Protótipo Completo	72,3	33,9	Sem extensômetros
Protótipo Completo	99,5	52,7	Com extensômetros
Placa sensores	9,09	X	Sem extensômetros
Placa sensores	20,9	X	Com extensômetros
Placa microcontrolador	58,2	19,4	

Com base nos dados da Tabela 14 e tomando-se como referência uma bateria de NiMH de capacidade de carga de 2500mA, a autonomia do sistema aproximada é de 25 horas para a esfera com extensômetros e 36 horas para a esfera sem extensômetros. As medições foram feitas no pior caso (*coluna A*), quando o rádio está permanentemente ligado e a memória *flash* sendo utilizada. A autonomia no modo normal (*coluna B*) é de 47 horas para a esfera com extensômetros e 74 horas para a esfera sem extensômetros. Os gráficos de carga e descarga obtidos são apresentados nas Figuras 46 e 47 respectivamente. O tempo de carga observado foi em torno de 20 horas e o de descarga, 28, aproximadamente.



**Figura 46: gráfico do processo de carga das baterias de NiMH.**

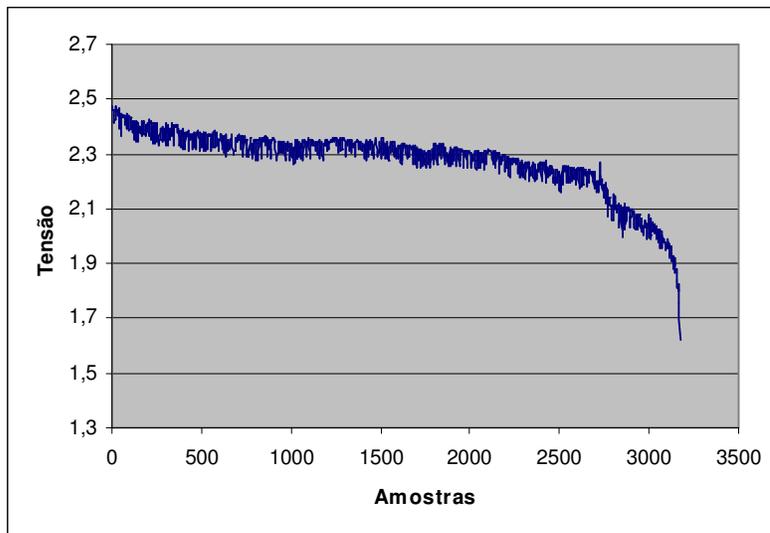


Figura 47: gráfico do processo de descarga das baterias de NiMH.

Os reguladores de tensão chaveados produziram *ripples* dentro dos níveis esperados, conforme especificação do fabricante. O *Charge Pump* apresentou tensão de saída de 5,05 Volts em média e *ripple* de 78 mVpp (Figura 48) e o conversor *Buck*, tensão de saída de 3,2 Volts e *ripple* de 42 mVpp (Figura 49).

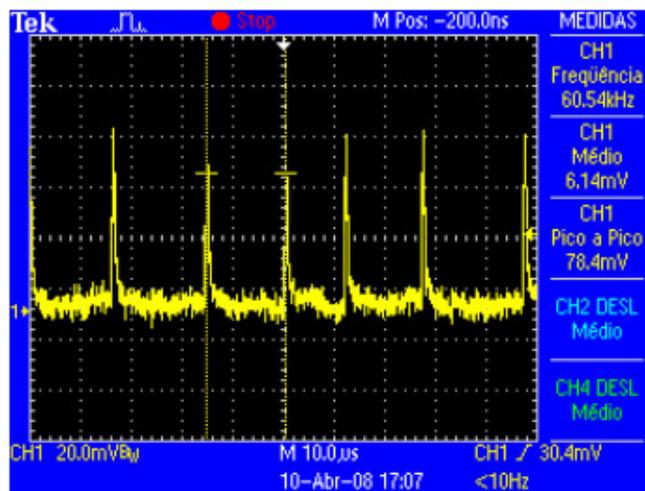


Figura 48: imagem do *ripple* produzido pelo conversor CC/CC charge pump.

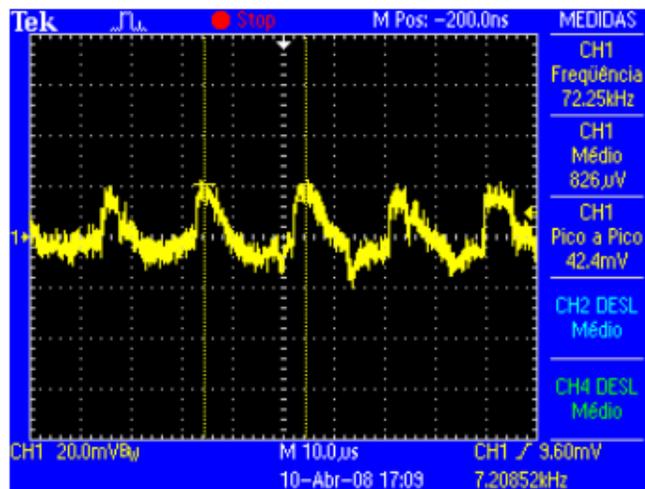


Figura 49: imagem do *ripple* produzido pelo conversor CC/CC Buck.

#### 4.2.2 Firmware e Software

Um PC faz a conexão com o sistema instrumentado e os dados obtidos são analisados via software. O software disponibiliza os dados em forma de gráficos com escala temporal, onde os eventos de impacto e compressão e a temperatura e umidade adquiridos podem ser analisados. O sistema é composto por três partes: a esfera instrumentada, um adaptador RF-USB e o PC. O método escolhido para comunicação entre a esfera e o módulo RF foi tipo mestre-escravo com janela temporal de comunicação a fim de diminuir o consumo de bateria.

O adaptador USB-RF opera de forma quase transparente, apenas informando eventuais *time-outs* (fim de tempo) de comunicação de forma autônoma. O *firmware* foi desenvolvido em linguagem ANSI C no IDE MikroC da empresa Mikroelektronika, versão 7.0 e o software, no IDE C++ Builder, versão 6.0.

##### a) Firmware da esfera instrumentada

O *firmware* residente na esfera instrumentada opera a partir da memória *flash* interna do microcontrolador PIC18F4550 ocupando cerca de 22 % da capacidade total da ROM (32 kB) e 68 % da RAM (2,2 kB). Seu funcionamento obedece a uma lógica tipo mestre-escravo onde a esfera é o escravo, esperando comandos de gerência e operação enviados pelo PC. O *firmware* aguarda algum comando do mestre em um laço infinito piscando um *led* que denota o seu funcionamento. Os comandos recebidos poderão ser de gerência ou operação e o ID do dispositivo é o caracter inicializador da comunicação. Quando um comando 'O' é recebido, a esfera passa a adquirir os dados de temperatura, umidade e tensão da bateria em intervalos pré-estabelecidos. A ocorrência de um gatilho de impacto ou de um diferencial de compressão, acarreta o envio (ou salvamento na *flash*) de um número pré-determinado de amostras que foram denominadas amostras independentes. O *Host* conta o número de amostras independentes recebidas e pode, no caso de perda de comunicação, requisitar o reenvio das amostras perdidas. Os limiares de gatilho e diferencial de compressão são parametrizados e salvos na memória E<sup>2</sup>PROM do microcontrolador. A descrição da comunicação entre o *firmware* e o software está na subseção *c*, abaixo. No apêndice E encontra-se a listagem do *firmware* das esferas.

### b) Firmware do adaptador USB-RF

O *firmware* residente no adaptador USB-RF opera a partir da memória *flash* interna do microcontrolador PIC18F4550 ocupando 17 % da capacidade total da ROM (32 kB) e 15 % da RAM (2,2 kB). Funcionando de forma semitransparente, ele apenas retransmite os comandos recebidos pela interface USB e aguarda por um determinado tempo alguma resposta do escravo pelo canal de RF. Quando recebe uma resposta válida, retransmite pela porta USB a informação para o PC. Caso contrário, envia sinalização de *time-out*. Alguns comandos de gerência implicam em mudanças no hardware tanto do adaptador quanto da esfera como, por exemplo, mudança da potência ou do canal do módulo RF. O número de bytes enviados e recebidos pela interface USB (*report size*) é 24 bytes, coincidindo com o número de bytes enviados e recebidos pelo módulo RF, tornando desnecessária a utilização de memória temporária intermediária.

### c) Software no PC

O software no PC realiza todo o controle do processo de gerenciamento e aquisição de dados das esferas instrumentadas. Sua interface gráfica possui três páginas distintas; registro, configuração e calibração. O processo é iniciado pelo usuário na página configuração onde o adaptador USB-RF conectado é reconhecido através dos parâmetros *vendor-id* e *product-id*. Se estes parâmetros coincidem com os pré-estabelecidos, tem-se um dispositivo USB válido conectado no PC e só então é liberada para uso a próxima função do software. Esta função é a de busca por dispositivos válidos que funciona pelo envio de um comando tipo *broadcast* (para todos) por rádio. Cada escravo que estiver presente responderá depois de um tempo pré-determinado de acordo com o seu número de identificação (*ID*) para evitar possíveis colisões. Para tanto, insere-se de um atraso de tempo  $x*ID$ , o que acarreta em um atraso diferente para cada escravo. Foram realizados testes com duas esferas, uma de ID igual a 6 e outra, 16.

Uma vez que o *ID* desejado é escolhido pelo usuário, as demais funções do software são habilitadas. O próximo passo é o envio de um comando de sincronização de relógio, pois o RTC da esfera instrumentada não possui bateria de *back-up*, zerando seus registradores a cada inicialização. Na Tabela 15, estão os comandos de gerência do ADC implementados e na Tabela 16, os comandos de gerência do rádio. Os comandos de operação estão listados na Tabela 17. O diagrama de seqüências de comunicação simplificado entre o PC e o dispositivo está representado na Figura 50.

**Tabela 15: comandos de gerência do ADC implementados**

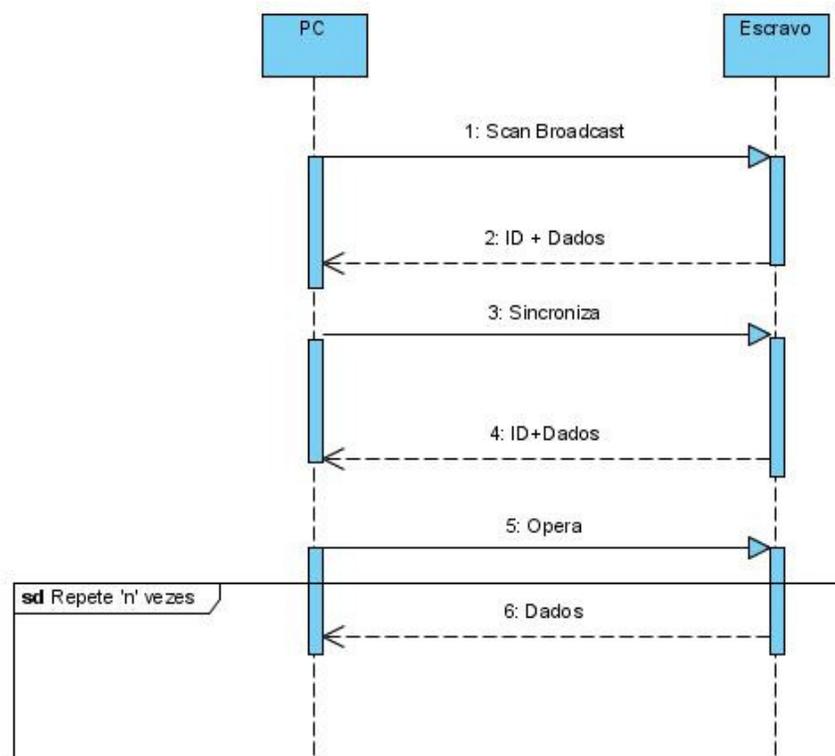
<i>Comando</i>	<i>Nome</i>	<i>Função</i>
G0	Scan 1	Busca por escravos disponíveis
G1	Scan 2	Busca por escravos disponíveis no canal padrão (6)
G2	Troca de ID	Comando de troca de identificação do escravo
G3	Amostragem	Modifica parâmetros de amostragem do ADC do escravo
G6	Sincroniza	Sincroniza RTC do escravo com relógio do PC
G7	Dados	Lê dados gerais do escravo
G8	Loopback	Testa o link de RF enviando números em seqüência

**Tabela 16: comandos de gerência do link de rádio implementados**

<i>Comando</i>	<i>Nome</i>	<i>Função</i>
R0	Canal	Troca canal de RF do escravo e do adaptador USB-RF
R1	Potência	Ajuste de potência dos módulos de RF
R2	Taxa	Escolhe a taxa de comunicação do escravo e do adaptador USB-RF

**Tabela 17: comandos de operação implementados**

<i>Comando</i>	<i>Nome</i>	<i>Função</i>
O0	Adquire	Inicia aquisição em tempo real via rádio
O1	Adquire	Inicia aquisição e salvamento na <i>flash</i> (data logger)
A	Dados	Pacote de 'n' dados de aceleração
C	Dados	Pacote de 'n' dados de compressão
F	Dados	Pacote com dados de temperatura, umidade, bateria e RTC

**Figura 50: diagrama simplificado de seqüências da comunicação entre PC e a esfera.**

Na página de calibração do software, os valores de ganho e *offset* dos sensores podem ser ajustados. Alguns destes valores (compressão e temperatura) foram calibrados por comparação com padrões secundários e outros (aceleração e umidade), de acordo com os dados fornecidos pelos manuais dos fabricantes. Uma vez inseridos os valores de calibração, estes podem ser salvos para quatro diferentes esferas sendo que os parâmetros são indexados

pelos seus respectivos *IDs*. Nas Figuras 51 e 52 estão imagens da tela gráfica das páginas de registro e configuração do software.

Na página de registro, três gráficos apresentam a aceleração (X, Y, Z), as forças de compressão (X, Y, Z) a temperatura e umidade adquiridas. Dois instrumentos tipo relógio mostram os valores da temperatura e umidade instantâneos atualizados a cada final de aquisição independente. Os componentes *Tchart* utilizados permitem *zoom* e *panning* e os dados podem ser apagados ou salvos nos padrões *bmp* e *xml* para posterior utilização. Nesta página pode-se optar por aquisição direta (tempo real) ou registrada, como em um *data logger*.

Para a comunicação USB foi utilizado o componente *VCL JvHidDeviceController*, responsável pela comunicação tipo HID (JVCL, 2008). Com este componente detecta-se um dispositivo HID conectando, desconectando ou comunicando. No apêndice F está a listagem do software desenvolvido. Os comandos do protocolo de comunicação desenvolvido estão no apêndice G.



Figura 51: tela de registro de aceleração, compressão, temperatura e umidade do software.

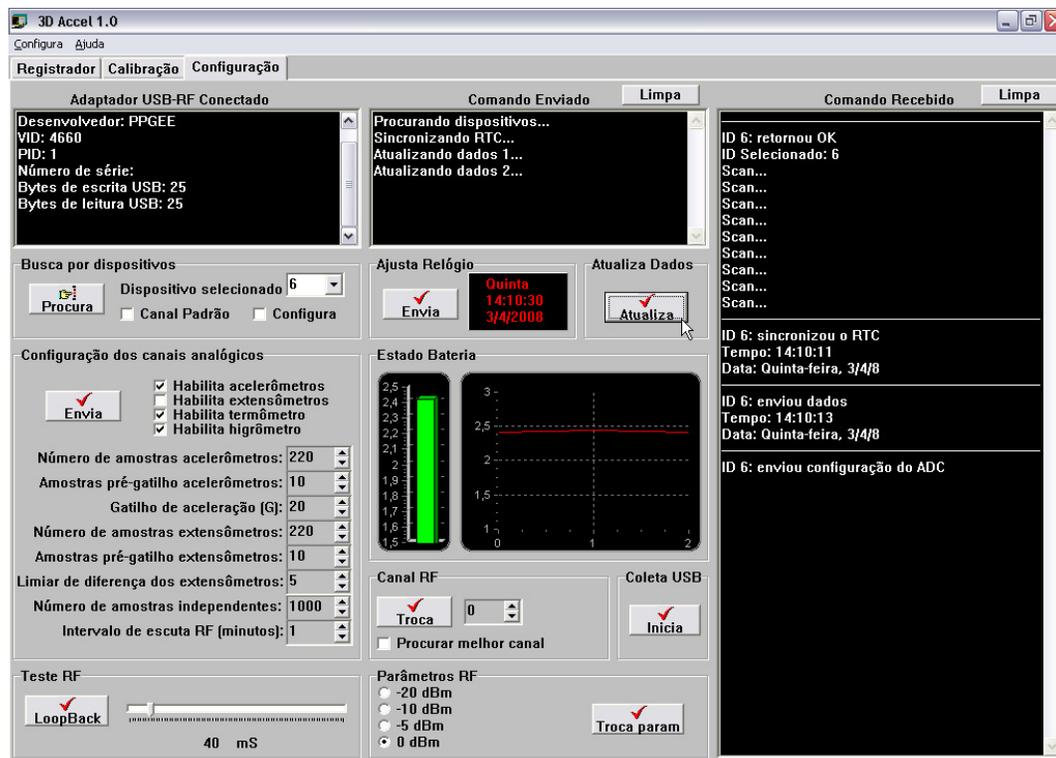


Figura 52: tela de configuração do software desenvolvido para as esferas sem fios.

#### 4.2.3 Protótipos desenvolvidos

O projeto mecânico das esferas sem cabos envolveu a célula de carga de forma esférica de 80mm previamente descrita na subseção 4.1.1, e o desenvolvimento de uma esfera feita de Nylon. A esfera com extensômetros recebeu em seu interior as duas placas de circuito impresso, de sensores e microcontrolador, além de duas baterias de NiMH. A esfera de Nylon foi usinada a partir de um bloco maciço que resultou em duas peças como cascas que podem ser rosqueadas. Foi inserido um anel de vedação para a utilização em sistemas de triagem de frutas com água. A Figura 53 à direita mostra a esfera aberta com o sistema de aquisição de dados no seu interior e à esquerda, fechada. A Figura 54 mostra a esfera com extensômetros sem fios. Na Figura 55, o adaptador USB-RF e na Figura 56, o sistema de aquisição completo em detalhe.

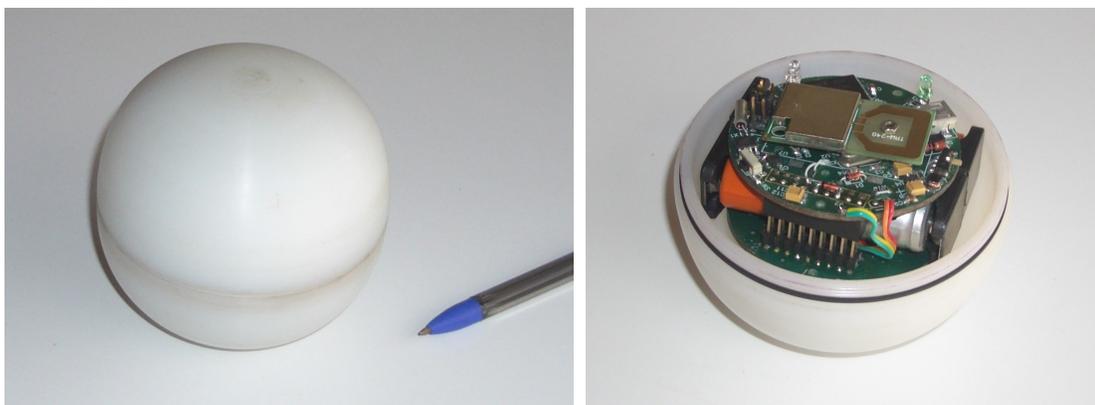


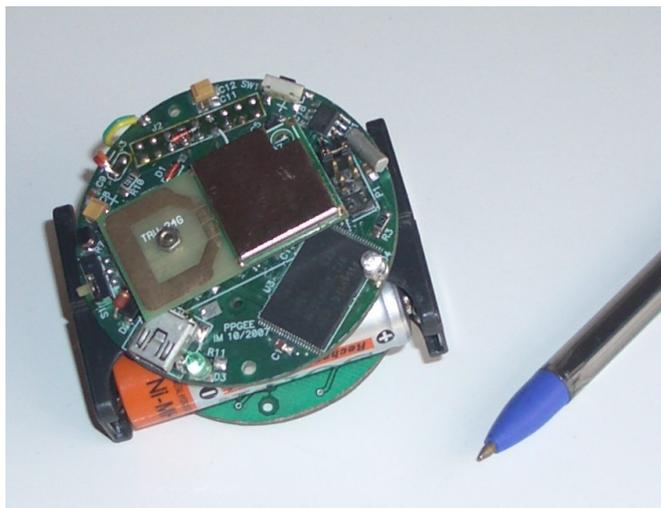
Figura 53: À direita o protótipo da esfera aberta e à esquerda, fechada.



**Figura 54: esfera instrumentada com extensômetros sem fios.**



**Figura 55: adaptador USB-RF.**



**Figura 56: protótipo do sistema de aquisição de dados sem fios em detalhe.**

### 4.3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Os sensores de compressão das esferas foram calibrados através de um padrão secundário, uma célula de carga uniaxial marca HBM. O procedimento de calibração consistiu em comprimir cada um dos eixos da esfera posicionando-a em série com a célula de carga padrão. A compressão foi produzida por uma prensa hidráulica e o valor da compressão foi obtido de um sistema de aquisição de dados previamente desenvolvido no laboratório IEE. Na Figura 57 pode-se ver o procedimento de calibração das células de carga.

Para relacionar Volts com quilograma-força, fez-se o levantamento da curva de calibração com cinquenta pontos para cada anel. A característica obtida mostrou-se bastante linear, com  $R^2$  superior a 99% para uma aproximação linear. Na apêndice H, estão os gráficos da calibração realizada para cada anel. A equação da reta calculada para cada anel é apresentada no mesmo gráfico.



**Figura 57: procedimento de calibração das células de carga.**

O procedimento de calibração foi refeito após um período de seis meses a fim de avaliar a estabilidade dos protótipos ao longo do tempo. Os ganhos (*slopes*) foram recalculados para todas as células de carga (anéis) incluindo a amplificação dos seus sinais. O pior caso foi um erro total de aproximadamente 5% para um dos anéis e o melhor, cerca de 0,2% para outro anel. No apêndice H estão listados os dados obtidos ao longo dos procedimentos de calibração, o levantamento das curvas de calibração e os cálculos das não linearidades. A Tabela 18 apresenta os valores de não linearidade encontrados para as esferas de 55 e 80 mm com cabos.

**Tabela 18: não linearidades obtidas.**

<i>Esfera</i>	<i>Eixo</i>	<i>Valor</i>
80mm	X	-1,73%
80mm	Y	-0,86%
80mm	Z	0,68%
55mm	X	0,79%
55mm	Y	0,86%
55mm	Z	0,95%

Os acelerômetros, sensor de temperatura e umidade foram calibrados segundo informações do fabricante. Os parâmetros de calibração de todos os sensores foram inseridos na página de calibração do software onde poderão ser alterados em procedimentos de calibração futuros.

## 5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos dos experimentos realizados com as esferas instrumentadas. O resultados estão divididos em duas subseções, uma para as esferas instrumentadas com cabos e outra, para as sem cabos.

### 5.1 ESFERAS INSTRUMENTADAS COM CABOS

O primeiro experimento realizado com a esfera instrumentada de 80 mm de diâmetro foi em novembro de 2006 e o último em setembro de 2007. Ao todo foram realizados sete experimentos em estabelecimentos de triagem e embalagem de frutas (*packing houses*) de maçãs e laranjas sendo cada um destes experimentos compostos por uma série de provas distintas. Os métodos experimentais consistiram basicamente em posicionar a esfera instrumentada substituindo uma fruta durante o processo de seleção. Alguns experimentos foram realizados com um só tipo de fruta, pois não se aplicava à outra, como no caso do preenchimento de silos que não é utilizado na seleção de maçãs mas sim com laranjas. Nas subseções a seguir, são apresentados alguns dos experimentos realizados e seus resultados mais significativos.

#### a) Preenchimento de caixas de maçãs e laranjas e formação de *pallet*

Neste experimento, substitui-se uma das frutas da caixa padrão utilizada para embalagem pela esfera instrumentada (Figura 58) e fez-se a formação do *pallet*, conjunto de caixas empilhadas para transporte (Figura 59). O tamanho das caixas e o número delas utilizadas para a formação do *pallet* seguem padrões da indústria alimentícia. Foram realizados 11 experimentos de preenchimento de caixas e 40 de formação de *pallet* em diferentes *packing houses*, e alguns dos resultados obtidos indicaram forte compressão nas frutas, especialmente com as posicionadas na borda da caixa e na primeira camada do *pallet*. Em alguns casos, compressões de até 19 quilogramas-força foram encontradas. Um dos problemas mais graves encontrados no preenchimento das caixas é o chamado sobre-enchimento, onde uma camada extra de frutas é sobreposta à última para que o peso padrão da caixa seja atingido. Outro problema, porém menos freqüente, é a formação de um *pallet* com caixas “desencontradas” onde a borda de uma das caixas não fica corretamente encaixada com a posterior (ou anterior) e comprime diretamente os frutos da outra caixa (no caso de caixas de madeira). A Figura 56 apresenta os gráficos gerados durante um experimento de preenchimento e empilhamento de caixas. Neste gráfico vê-se o aumento das forças de compressão provocadas por cada nova caixa empilhada no *pallet*.

Verificou-se em todos os experimentos deste tipo, uma força de compressão maior no eixo vertical em relação aos horizontais, como esperado. Em um dos casos registrou-se fortes compressões em laranjas que recebiam sobre si o peso de uma caixa durante a seleção, em um procedimento de seleção e embalagem errôneo de simples correção. Outros erros verificados somente poderão ser corrigidos com mudanças nas máquinas de seleção e nas caixas utilizadas para transporte.

Observando-se novamente a Figura 58 verifica-se que a esfera recebe compressão em um dos eixos laterais e no vertical. Quando colocada no meio da caixa (como foi feito em outros experimentos), a esfera recebe a compressão nos três eixos, ou seja, a compressão total sofrida pela fruta.



Figura 58: esfera colocada no interior de uma caixa a ser preenchida.



Figura 59: formação de *pallet* com a esfera no interior de uma das caixas na segunda camada.

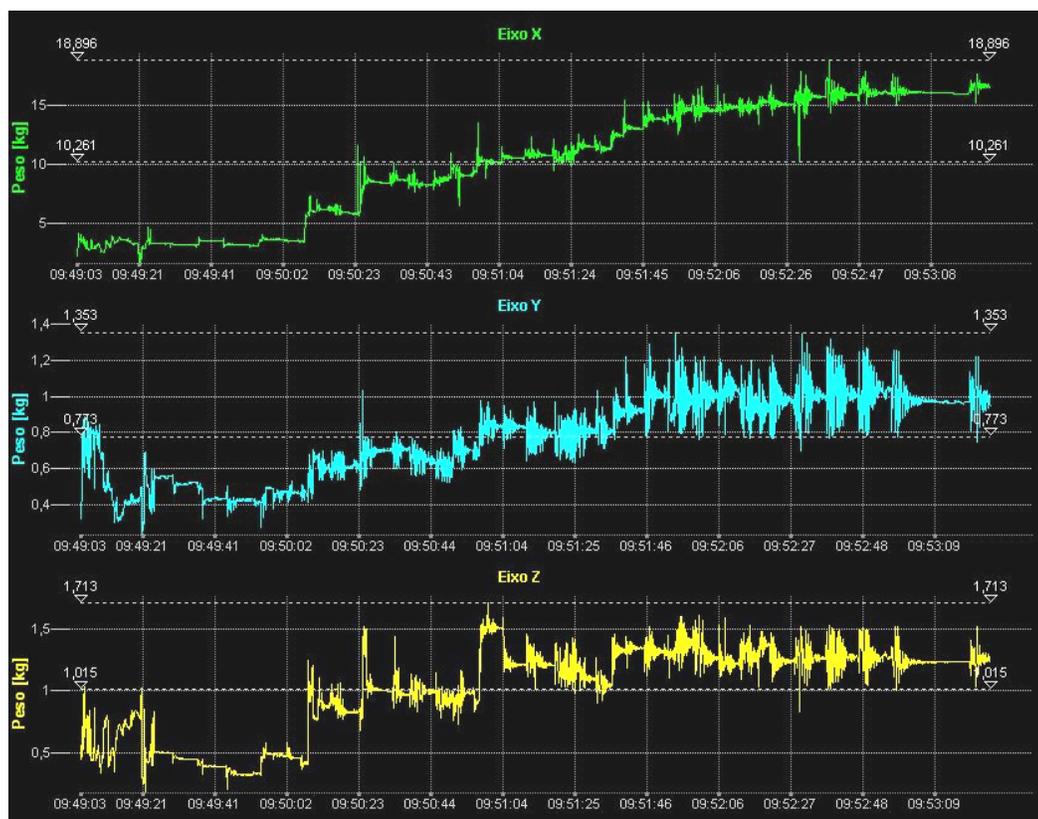


Figura 60: gráficos das compressões sofridas pela esfera no interior de uma caixa de frutas.

### b) Preenchimento de sacos de laranjas

Neste experimento, colocou-se a esfera no fundo de um saco de 20,5 kg utilizado para embalagem de laranjas. Foram realizadas sete provas onde foram verificadas forças de compressão equivalentes a mais de 10 kg e picos de impacto causados pelo funcionário durante tentativas de acomodar mais laranjas no interior do saco.

### c) Seleção de frutas

Durante o processo mais usual de seleção de laranjas, estas são transportadas por uma esteira e selecionadas por tamanho através de aberturas previamente calibradas, caindo em caixas denominadas “cochos”. Dois problemas ocorrem nestes casos: o primeiro é a queda que o fruto sofre e conseqüente impacto no fundo do cocho (que em alguns casos é revestido com espuma para amortecer esta queda) e o segundo é o impacto que ocorre entre as frutas que estão caindo com as que já caíram. Colocou-se então a esfera instrumentada substituindo uma das frutas como ilustrado na Figura 61. Foram realizadas 29 provas diferentes onde impactos máximos equivalentes a seis quilogramas-força foram observados.



**Figura 61: experimento realizado no “cocho” de seleção de laranjas.**

Este experimento foi feito também na esteira onde caem as frutas diretamente do caminhão graneleiro, no início do processo de seleção de laranjas. Neste caso, foram registrados impactos máximos equivalentes a cinco quilos.

#### **d) Transporte de *pallet***

O transporte dos *pallets* até os caminhões ou câmaras frias é feito através de empilhadeiras motorizadas ou manuais (*palleteira*, Figura 62). As experiências realizadas durante o transporte dos *pallets* revelaram que a base de madeira utilizada para a formação dos mesmos tende a fletir provocando uma acomodação das frutas no interior das caixas. Em alguns casos estas mudanças provocaram forças de compressão laterais grandes (até 7kgf) e picos de grande intensidade, quando o *pallet* é novamente deixado no solo. No ímpeto de realizar tarefas mais rapidamente, os operadores de empilhadeira soltam o *pallet* no solo de modo abrupto o que em um dos experimentos gerou um pico de impacto equivalente a mais de 20 kgf. A Figura 63 mostra o gráfico relativo a um experimento realizado com o *pallet* sendo erguido e baixado. Foram realizadas 33 provas deste tipo, em *packing houses* de maçãs e laranjas.



Figura 62: *pallet* sendo transportado com o auxílio de uma *palleteira*.

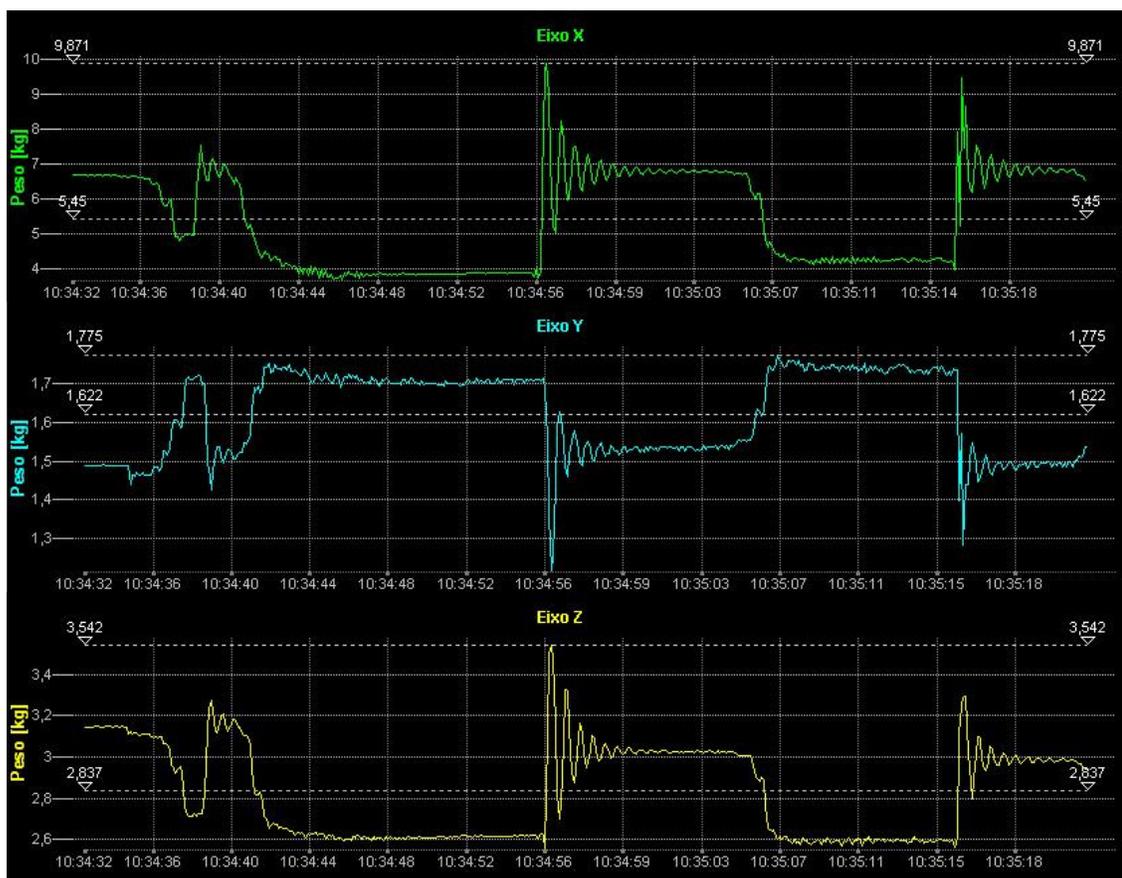
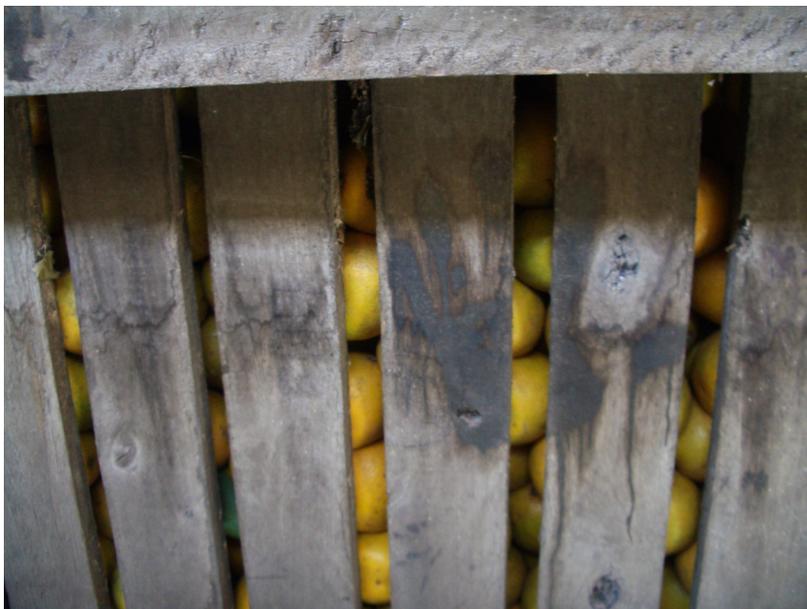


Figura 63: mudança dos valores de compressão durante o transporte do *pallet*.

### e) Preenchimento de silo

No beneficiamento de laranjas a granel, utiliza-se um silo intermediário para permitir a liberação dos caminhões graneleiros para que os próximos descarreguem. Colocou-se a esfera instrumentada no interior de um destes silos e foram verificadas forças de compressão de até 4kgf. Este é um experimento de difícil realização, pois os silos são preenchidos poucas vezes ao dia. Sabe-se que forças de compressão muito maiores ocorrem, pois em algumas posições do silo, os frutos ficam extremamente deformados conforme demonstra a Figura 64.



**Figura 64: deformações devido ao excesso de compressão sofrida por laranjas em um silo.**

Diferentes conclusões sobre o efeito das forças de compressão sofridas pelas frutas foram obtidas pelo departamento de horticultura e fruticultura da Ufrgs e serviram para a geração de estudos e artigos científicos (ver capítulo 7). As compressões sofridas por frutas durante a seleção foram reproduzidas em laboratórios com o auxílio da esfera instrumentada e análises biológicas posteriores foram realizadas. Verificaram-se compressões severas em vários dos experimentos realizados e com o auxílio da esfera instrumentada com três eixos pôde-se verificar mudanças no sentido da compressão sofrida pelas frutas ao erguer-se e transportar-se os *pallets*. Os instrumentos desenvolvidos anteriormente não são capazes de quantificar compressões transversais, somente a vertical. A compressão total sofrida pelas frutas pôde ser computada pela soma dos valores máximos ocorridos (X, Y e Z) ao longo do processo de seleção.

### 5.2 ESFERAS INSTRUMENTADAS SEM CABOS

Até o presente momento não foram realizados experimentos de campo com as esferas instrumentadas sem cabos. Em laboratório, foram feitos experimentos para validar o funcionamento das esferas. Em um deles, a esfera com a casca de Nylon sofreu quedas sucessivas desde um metro de altura, onde impactos de aproximadamente 250 g foram observados. Em outra prova, colocou-se o sistema de aquisição de dados no interior de uma

maçã cujo miolo foi retirado em parte para dar lugar a ele (Figura 65). Registraram-se impactos de aproximadamente 200 g. A esfera instrumentada com extensômetros e sem cabos foi calibrada, quando então pode-se constatar o funcionamento esperado.

Com relação ao desempenho das esferas sem fios, os dispositivos escolhidos comportaram-se dentro do esperado à exceção do módulo de rádio frequência. O alcance obtido foi inferior aos testes realizados anteriormente com os módulos separadamente. Uma das possíveis razões está no lay-out da placa de circuito impresso, pois o módulo de RF está posicionado paralelo ao plano terra da placa. O módulo também não informa a intensidade do sinal de rádio frequência recebido o que dificulta a escolha de um canal mais 'limpo', livre de interferências.



**Figura 65: experimento realizado com o sistema de aquisição de dados**

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento das esferas sem fios, experimentos de longa duração, como o monitoramento do transporte de frutas poderá ser realizado.

O desenho mecânico da esfera com extensômetros poderá ser modificado para que o diâmetro da mesma possa ser variável, adequando-se melhor ao experimento realizado. Outros formatos também seriam possíveis.

Com relação às esferas instrumentadas sem cabos, melhorias e experimentos poderão ser feitos como a minimização do consumo pela modificação do *firmware*, o uso de técnicas de espalhamento espectral (FHSS) para diminuição de interferências no módulo de rádio frequência e o desenvolvimento de um *driver* para que a interface USB possa operar no modo *full-speed*.

Outra melhoria diz respeito à ocupação dos canais de comunicação e da *flash*. Como os sinais analógicos são digitalizados a uma resolução de dez bits, atualmente dois bytes estão sendo utilizados para o armazenamento e envio. Uma redução de 32% poderá ser obtida se um algoritmo simples de compactação for implementado conforme ilustra a Figura 66.

Dados ADC = 10																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X	X	X	X	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X	X	X	X	X	1	2	3	4	5	6	7	...		
Bytes utilizados = 8 para cada 4 amostras																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	...

Dados ADC = 10																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bytes utilizados = 5 para cada 4 amostras																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8

**Figura 66:** possível redução do tamanho ocupado pelos dados adquiridos.

## 7 CONCLUSÕES

Objetivou-se neste trabalho, o desenvolvimento de sensores portáteis de formato esférico para a análise de impactos e forças de compressão sofridas por frutas durante o processo de pós-colheita. Foi proposto ainda que o sistema instrumentado portátil pudesse servir como uma plataforma modular para o desenvolvimento de outros instrumentos e para tanto, deveria dispor de recursos tecnológicos atuais como interface USB, RF e memória *Flash*. A Tabela 19 apresenta as principais características dos protótipos realizados. Para nomear os diferentes modelos, designaram-se as letras *C* para definir os protótipos com cabos, *WAE*, para os protótipos sem cabos, com acelerômetros e extensômetros e *WA*, para a sem cabos e com acelerômetros. Boa parte dos objetivos iniciais foram alcançados, restando refinamentos no *firmware* e no software das esferas sem cabo. Resta ainda a utilização das esferas sem cabos em experimentos de campo.

**Tabela 19: resumo dos protótipos construídos**

<i>Características</i>	<i>Esfera C 80mm</i>	<i>Esfera C 55mm</i>	<i>Esfera WAE 80 mm</i>	<i>Esfera WA 80 mm</i>
Tipo	Esfera com cabo	Esfera com cabo	Esfera sem cabo	Esfera sem cabo
Comunicação	RS-232	RS-232	RF, USB	RF, USB
Host	Sistema MSC-1211 + PC	Sistema MSC-1211 + PC	Abaptador USB-RF + PC	Abaptador USB-RF + PC
Alcance	Cabo de 1,5m até o Host. Cabo serial até o PC. Total ~3m	Cabo de 1,5m até o Host. Cabo serial até o PC. Total ~3m	Aproximadamente 10 m (RF) ou cabo USB	Aproximadamente 10 m (RF) ou cabo USB
Bateria / Autonomia	Bateria chumbo-ácida, 2,3Ah, ~ 7 horas	Bateria chumbo-ácida, 2,3Ah, ~ 7 horas	Bateria NiMH, 2700mAh, ~ 28 horas	Bateria NiMH, 2700mAh, ~ 39 horas
Número máximo de registros	Limitado pela memória do PC	Limitado pela memória do PC	63397	102000
Sensores	Extensômetros X, Y e Z	Extensômetros X, Y e Z	Extensômetros X, Y e Z, acelerômetros X, Y e Z, temperatura, umidade	Acelerômetros X, Y e Z, temperatura, umidade
Fundo de escala dos extensômetros	> 300 N	> 100 N	> 300 N	Não se aplica
Resolução extensômetros	10g	3,3g	10g	Não se aplica
Fundo de escala dos acelerômetros	Não se aplica	Não se aplica	+ / - 250 g	+ / - 250 g
Resolução e não-linearidade	Não se aplica	Não se aplica	0,7 g, +/- 2%	0,7 g, +/- 2%

acelerômetros				
Fundo de escala termômetro	Não se aplica	Não se aplica	-30 / 100 °C	-30 / 100 °C
Resolução e acuidade termômetro	Não se aplica	Não se aplica	0,13 °C, +/- 2 °C	0,13 °C, +/- 2 °C
Fundo de escala higrômetro	Não se aplica	Não se aplica	0 / 100% UR	0 / 100% UR
Resolução e acuidade higrômetro	Não se aplica	Não se aplica	~1% UR, +/- 3,4 % UR	~1% UR, +/- 3,4 % UR

O método proposto para a análise de forças de compressão em frutas mostrou-se bastante proveitoso, pois possibilitou uma série de pesquisas na área agrícola pós-colheita. A versatilidade do sistema como um todo permite a obtenção de dados de diferentes formas e ainda há muito a ser explorado.

Os experimentos realizados até o momento serviram para quantificar inicialmente as compressões e impactos sofridos por frutas durante o processo de seleção. A esfera de três eixos provê mais dados de compressão que os sistemas anteriormente desenvolvidos, capazes de quantificar somente a força de compressão em um eixo. O sistema proposto produz mais informações sobre a compressão total sofrida pelas frutas. Os impactos sofridos por frutas que já foram selecionadas (já sofreram o impacto da queda) podem ser quantificados pela esfera com extensômetros mas não com as esferas equipadas somente com acelerômetros.

A esfera com extensômetros, acelerômetros, sensor de temperatura e umidade é um *data logger* que fornece muitos dados e diferentes experimentos poderão ser realizados com ela. O sistema de aquisição de dados portátil ficou compacto e poderá ser utilizado em futuras aplicações de instrumentação. Uma comparação entre as esferas instrumentadas analisadas e a desenvolvida (WAE80) é apresentada na Tabela 20.

**Tabela 20: comparação entre as diferentes esferas instrumentadas**

<i>Dispositivo</i>	<i>Sensores</i>	<i>Fundo de escala</i>	<i>Bateria</i>	<i>Transmissão/ Coleta</i>	<i>Memória</i>	<i>Preço /Custo</i>
IRD	Impacto	+/-500g	NiMH	Serial	32k SRAM	US\$7000,00
Sensor Wireless	Impacto ou compressão ou temperatura	?	LI-íon primária	RF(~15m), Serial	Externa PDA	US\$3000,00 US\$4000,00
Bollen et al.	Compressão	?	N/C	Serial	PC	?
Spy Cobble	Compressão Fricção	+50/500g	Alcalina	Serial	2MB E2PROM	?
WAE 80	Impacto, compressão, temperatura e umidade	+250g, 300N -30+100 °C 0-99% UR	NiMH	RF (~10m), USB	128MB Flash	R\$1500,00 (custo aprox.)

Até o momento da conclusão desta dissertação, as seguintes apresentações científicas foram realizadas:

- Inova, Junho de 2007: “Esfera Instrumentada para Análise de Compressão em Frutas”, mostra de produção científica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CAIP, Julho de 2007: “Esfera Instrumentada para el Analisis de Compresión en Frutas”, congresso interamericano de computação aplicada à indústria de processos.
- IEEE I2MTC, Maio de 2008: “Instrumented Sphere for Compression Analysis”, *International Instrumentation Measurement Technology conference*.
- XIX Salão de Iniciação Científica, UFRGS – 2008: “Determinação de impactos e compressão no beneficiamento de laranjas em casas de embalagem”.
- III Workshop Internacional de Pós-colheita de Citros. Campinas, Abril de 2007. “Determinação de impactos em laranjas no manuseio em casas de embalagem com uso de esfera instrumentada”.
- Revista da Maçã – edição de Maio/Junho de 2008: “Danos de compressão de maçãs em *packing houses*”.
- Jornal da Fruta - edição Maio de 2008: “Identificação de pontos críticos no manuseio de frutos cítricos no sul do Brasil”

## REFERÊNCIAS

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Prentice Hall, 1999. p. 308. ISBN 85-87918-03-6.

AMINIAN, K.; ROBERT, P.; JÉQUIER, E.; SCHUTZ, Y. Estimation of Speed and Incline of Walking Using Neural Network. **IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement**, New York, v.44, n. 3, June 1995.

BAZZARELLI, M.; DURDLE, N.G.; LOU, E.; RASO, V.J. A Wearable Computer for Physiotherapeutic Scoliosis Treatment, **IEEE Transactions on instrumentation and Measurement**, New York, v. 52, n. 1, Feb. 2003.

BECK, J.C.P. **Projeto, Construção e Análise de Células de Carga de Placa e de Anel**. 1987. Dissertação (Mestrado) - PPGEMM, UFRGS, Porto Alegre, RS.

BOLLEN, A.F.; TIMM, E.J.; DELLA RUE, B.T. Relation of individual forces on apples and bruising during orchard transport of bulk bins. **Applied Engineering in Agriculture**, New Zealand, v. 17, n. 2, p.193–200, 2001.

BOLLEN, A.F. Technological innovations in sensors for assessment of postharvest mechanical handling systems. **International Journal of Postharvest Technology and Innovation**, New Zealand, v. 1, n. 1, 2006.

BORCHARDT, I.G., ZARO, M.A. **Extensômetros de resistência elétrica**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1981, p. 11-15.

CARDOSO, J.M.; AMORIM, V.; BASTOS, R.; MADEIRA, R. A Very Low-Cost Portable Multichannel Analyzer. **IEEE Press**, New York, 2001.

CIPRIANO, D.; FAZZI, A.; PIROVANO, C.; VAROLI, V. A portable instrument for scintigraphic recording of blood volume shifts. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, New York, v. 45, n. 3, June 1998.

D'AGOSTINI, R.R. **Sistema de Aquisição de Dados Geoposicionado Aplicado à Medição da Resistência ao Corte do Solo**. 2005. Dissertação (Mestrado) – PPGEE, UFRGS, Porto Alegre, RS.

DALLY, J.W.; RILEY, W.F.; MCCONNELL, K.G. **Instrumentation for Engineering Measurements**, New York: John Wiley, 1984.

DESMET, M. et al. Instrumented sphere prediction of tomato stem-puncture injury. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 34, p. 81-92, 2004.

- DOEBELIN, E.O. **Measurement Systems Application and Design**, McGraw-Hill, New York, 1990.
- ENGELBERG, S.; KAMINSKI, T.; HOESH, M. A USB-Enabled, FLASH-Disk-Based Data Logger. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, New York, v.10, p.63-69, Apr. 2007.
- EREN, H.; AI-SHOAILI, S.; MILARSKI, W. Power Awareness and Energy Efficiency in Portable Instrument Networks. **Sensor for Industry Conference New Orleans**. IEEE Computer Society, New Orleans, Jan. 2004.
- FONSECA, F. M. **Sistema de Monitoração para Avaliação de Bancos de Baterias para UPS (“No-Break”)**. 2002. Dissertação (Mestrado) - PPGEE, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- JVCL. **Jedi visual component library**. 2008. Disponível em: <<http://www.delphi-jedi.org/>>. Acesso em: dez. 2007.
- KESTER, W. **Analog-Digital Conversion**, USA: Analog Devices, 20 04. p. 3.109. ISBN 0-916550-27-3
- KYOWA. **How Strain Gages Work**. 2006. Disponível em <[www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/howsgw.pdf](http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/pdf/howsgw.pdf)>. Acesso: out. 2007.
- LACERDA, F.C.; FERRAZ, A.C. Efeito Das Acelerações e das Frequências Durante o Transporte, na Qualidade do Figo ‘Roxo de Valinhos’. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 32, n.1, p.44-50, 2007.
- LEE, S. K.; KADER, A. A. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 20, p. 207-220, 2000.
- LOMBARDI, R. et al. Data Acquisition System for Measurements in Free Moving Subjects and its Applications. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 52, n. 3, June 2003.
- LÄUGER, A. **Grokking the MCS-48 System**. Disponível em: <<http://home.mnet-online.de/al/mcs-48/mcs-48.pdf>>. Acesso em: fev. 2008.
- LUHARUKA, R.; GAO, R.X.; KRISHNAMURTY, S. Design and Realization of a Portable Data Logger for Physiological Sensing, **IEEE Transactions on instrumentation and Measurement**, New York, v. n. 4, Aug. 2003.
- MAHMOUD, I. Wide-range Portable Dosimeter Based on Microcontroller. In: NATIONAL RADIO SCIENCE CONFERENCE, 15<sup>th</sup>, 1998, Cairo, Egypt. **Proceedings...** New York: IEEE, Feb. 26.
- MEMS. **What is MEMS technology?**. 2008. Disponível em: <<http://www.memsnet.org/mems/what-is.html>>. Acesso em: mar. 2008.
- MEYER, R.A.; KEMPAYNEN, A.J.; OLSON, D.J. **Multi-axis load cell body**. U.S Patent Number 6,769,312,B2, Aug. 2004.

MICROCHIP. **Selecting the Right Battery System For Cost-Sensitive Portable Applications While Maintaining Excellent Quality.** 2007. Disponível em: [http://www.eetasia.com/ART\\_8800477230\\_765245\\_AN\\_42b31fc0.HTM](http://www.eetasia.com/ART_8800477230_765245_AN_42b31fc0.HTM). Acessado em: dez. 2007.

MIKOŠ, M.; ESCORZA, M.Z. **Development of the Spy-Cobble - An Instrumented Tracer for Measuring Dynamics of Sediment Transport In Turbulent Flows.** 1999. Disponível em: [http://www.ksh.fgg.uni-lj.si/KSH\\_ANG/spy\\_cobble/index.htm](http://www.ksh.fgg.uni-lj.si/KSH_ANG/spy_cobble/index.htm)>. Acesso em nov. 2007.

MUKARO, R.; CARELSE, X.F. A Microcontroller-Based Data Acquisition System for Solar Radiation and Environmental Monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement**, v. 48, n. 6, Dec. 1999.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Application Note 078: Strain Gage Measurement – A tutorial.** 1998. Disponível em: <[http://www.eidactics.com/Downloads/Refs-Methods/NI\\_Strain\\_Gauge\\_tutorial.pdf](http://www.eidactics.com/Downloads/Refs-Methods/NI_Strain_Gauge_tutorial.pdf)>. Acesso em: fev. 2008.

NATIONAL SEMICONDUCTOR. **Temperature Sensor Handbook.** Disponível em: <<http://www.national.com/appinfo/tempsensors/files/temp hb.pdf>>. Acesso em: dez. 2007.

NEVINS, R.J.; DURDLE, N.G.; RASO, V.J. A Posture Monitoring System Using Accelerometers. In: IEEE CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL & COMPUTER ENGINEERING, 2002, Manitoba, Canada. **Proceedings...** New York, 2002, p. 1087-1092.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time Signal Processing.** Porto Alegre: Prentice-Hall, 1989.

OSTER, A. H. et al. Heat treatments to control white rot (*Botryosphaeria dothidea*) on 'Fuji' apples. **Acta Horticulturae**, Amsterdam, v. 712, p. 799-804, 2006.

QIU, Z.; MAO, J.; HE, Y. The Design of Field Information Detection System Based on Microcomputer. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, 2006, Shanghai, China. **Proceedings...** New York IEEE Press, Oct. 2006.

ROHS. **What is RoHS?**. Disponível em: <<http://www.rohs.gov.uk/>>. Acesso em: fev. 2008.

SANHUEZA, R. M. V. Podridões de maçãs frigorificadas. **Frutas do Brasil**, 39, Maçã: pós-colheita. Girardi, C. L. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho. 2004. p.35-44.

SEKINE, M. et al. Classification of acceleration waveform in a continuous walking record. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY, 20<sup>th</sup>, 1998, Ohio, USA. **Proceedings...** New York, IEEE Press, v. 20, n. 3, 1998.

SENSOR WIRELESS. **Smart Spud.** Disponível em: <<http://www.sensorwireless.com/smarts pud.php>>. Acesso em: fev. 2008.

SENSORLAND. **How they work.** Disponível em: <<http://www.sensorland.com>>. Acesso em: mar. 2008.

SILVA JR., V. P. **Microcontrolador 8051, Hardware & Software**. Editora Érica 1990. ISBN 85-7194-194-7

SOMMERFIELD, J.L.; MEYER, R.A.; LARSON, B.A.; OLSON, D.J. **Multi-axis load cell**. U.S Patent Number 5,969,268, Oct. 1999.

TEXAS INSTRUMENTS. **Precision Analog-to-Digital Converter (ADC) and Digital-to-Analog Converters (DACs) with 8051 Microcontroller and Flash Memory**. Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msc1210y5.pdf>>. Acesso em: fev. 2006.

TOBEY, G.E.; GRAEME, J.G.; HUELSMAN, L.P. **Operational Amplifiers, Design and Applications**. New York: McGraw-Hill - Burr-Brown, 1971.

TECHMARK. **Impact Recording Device**. Disponível em: <<http://www.techmark-inc.com>>. Acesso em: mar. 2008.

TOSHIBA. **NAND vs. NOR Flash Memory, Technology Overview**. Disponível em: <[http://www.toshiba.com/taec/components/Generic/Memory\\_Resources/NANDvsNOR.pdf](http://www.toshiba.com/taec/components/Generic/Memory_Resources/NANDvsNOR.pdf)>. Acesso em: dez. 2007.

TSE, F.F; MORSE, I.E. **Measurement and Instrumentation in Engineering**. New York: Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-8086-8, 1989.

USB\_ORG. **USB 2.0 specification**. Disponível em: <<http://www.usb.org/developers/docs/>>. Acesso em: dez. 2007

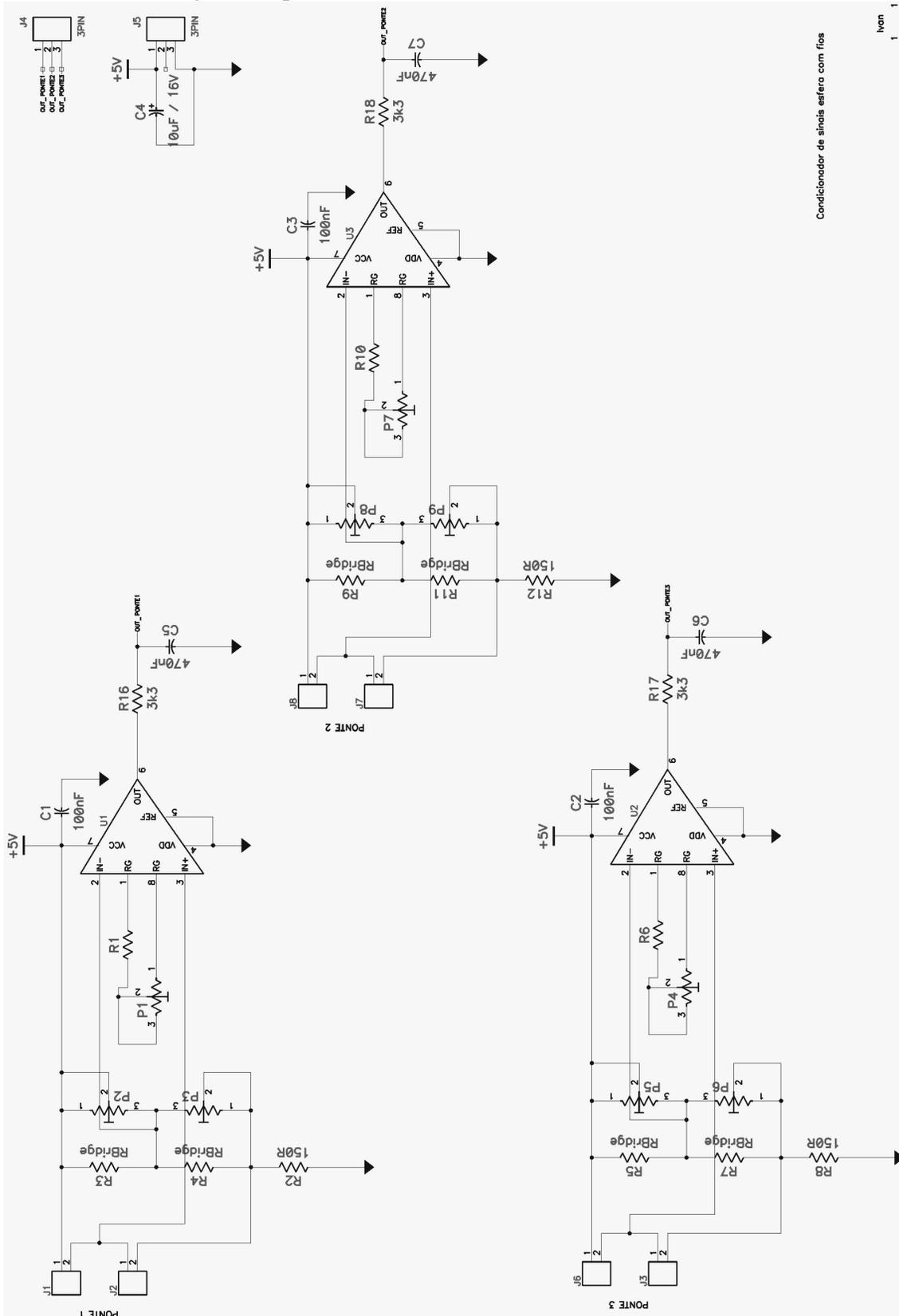
VILAS BOAS ,A.; OLMOS, M.E. **Smart NiCd/NiMH Battery Charger Using MC68HC908QY**. Disponível em: <[http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app\\_note/AN2679.pdf](http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN2679.pdf)>. Acesso em: abr. 2007.

W3C. **Extensible Markup Language (XML)**. Disponível em <http://www.w3.org/XML/>. Acesso em: jan. 2008.

YAO, J.; SCHMITZ, R.; WARREN, S. A Wearable Point-of-Care System for Home Use That Incorporates Plug-and-Play and Wireless Standards. **IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine**, New York, v. 9, n. 3, Sept. 2005.

ZAPP, H.R. et al. Advanced Instrumented Sphere (IS) for impact measurements. **ASAE Paper**, St. Joseph, Michigan, 89-6046, May 1990.

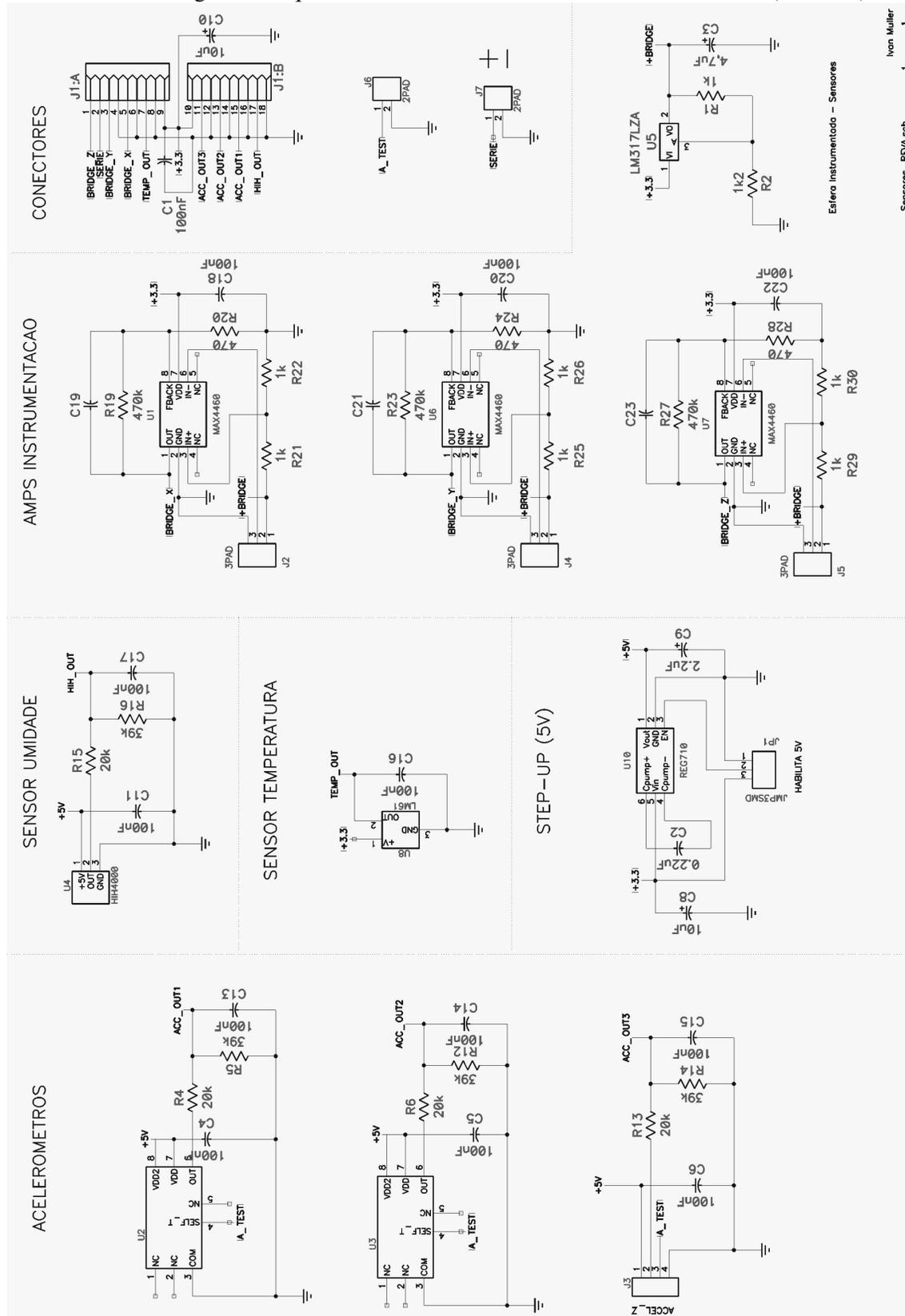
APÊNDICE A: Diagrama esquemático do condicionador de sinais da esfera com cabo.



Condicionador de sinais esfera com fios



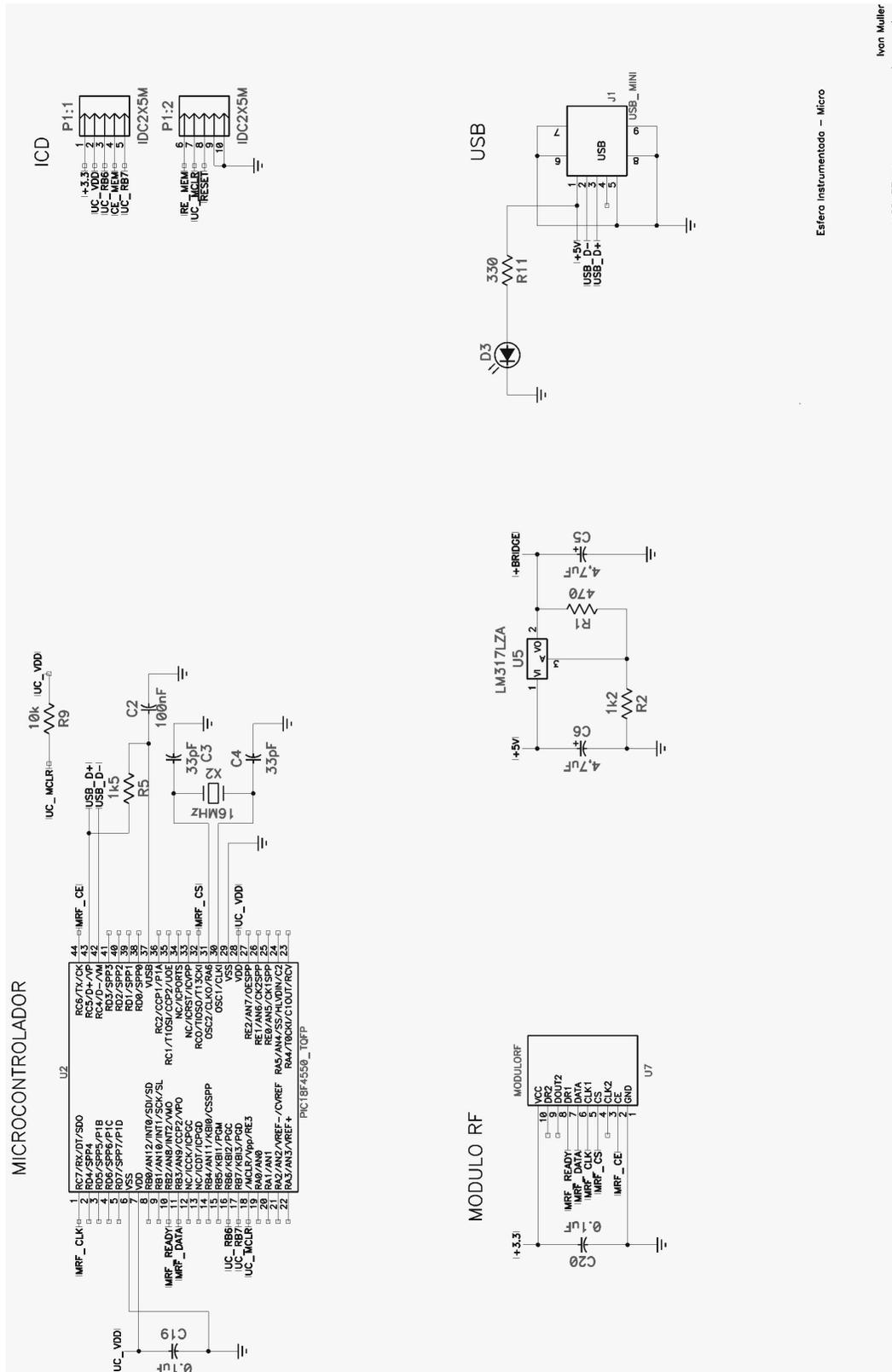
APÊNDICE B: Diagramas esquemáticos das esferas instrumentadas sem cabos (sensores).



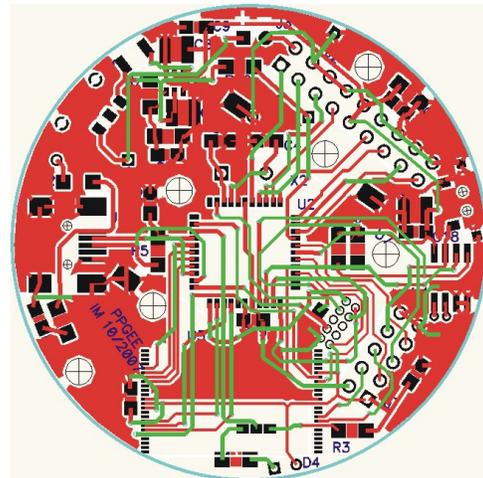
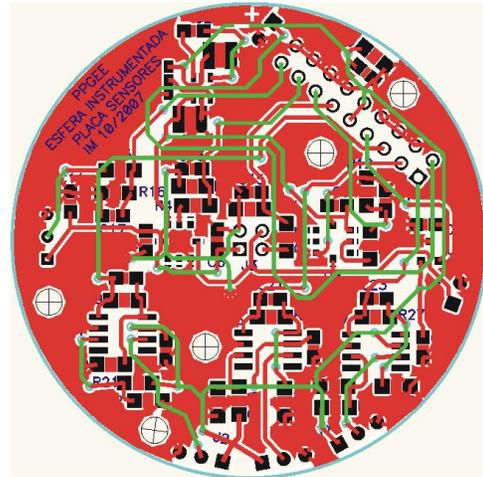
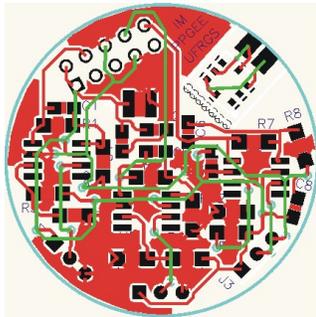
Esfera Instrumentada - Sensores

Sensores\_REVA.sch 1 1 1  
Ivan Muller

APÊNDICE B: Diagramas esquemáticos das esferas instrumentadas sem cabos (USB-RF).



APÊNDICE C: placas de circuito impresso.



**APÊNDICE D:** *Firmware* para o MSC 1211

**APÊNDICE E:** *Firmware* para as esferas sem fios

**APÊNDICE F:** Software para as esferas com e sem fios

**APÊNDICE G:** Protocolo de comunicação

**APÊNDICE H:** Dados de calibração das esferas com extensômetros

Estes apêndices estão no CD em anexo.