



UNICAMP

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica

**ESFERA INSTRUMENTADA DE BAIXO CUSTO PARA  
MONITORAMENTO DE IMPACTOS E TEMPERATURA  
DURANTE PROCESSOS PÓS-COLHEITA**

Candidato: Murilo Nicolau

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Fruett

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Fabiano Fruett

DSIF — Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Prof. Dr. Marcos David Ferreira

Centro Nacional de Pesquisa em Instrumentação Agropecuária

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Prof. Dr. Peter Jürgen Tatsch

DSIF — Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Campinas, SP

2009

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação/Tese  
defendida por MURILO NICOLAU  
e aprovada através da comissão julgada em 02.10.2009

Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

N543e Nicolau, Murilo  
Esfera instrumentada de baixo custo para monitoramento de impactos e temperatura durante processos pós-colheita / Murilo Nicolau. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Fabiano Fruett.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Frutas artificiais. 2. Agricultura de precisão. 3. Ferimentos e lesões. 4. Acelerômetros. 5. Sensores. I. Fruett, Fabiano. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Low cost instrumented sphere for impact and temperature monitoring during postharvest processes

Palavras-chave em Inglês: Artificial fruit, Precision agriculture, Injuries, Accelerometer, Sensors

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Marcos David Ferreira, Peter Jürgen Tatsch

Data da defesa: 02/06/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Murilo Nicolau

**Data da Defesa:** 2 de junho de 2009

**Título da Tese:** "Esfera Instrumentada de Baixo Custo para Monitoramento de Impactos e Temperatura durante Processos Pós-colheita"

Prof. Dr. Fabiano Fruett (Presidente): \_\_\_\_\_

Dr. Marcos David Ferreira: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Peter Jürgen Tatsch: \_\_\_\_\_

# Resumo

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de frutas e hortaliças. No entanto as perdas de produtos hortícolas, devido a danos físicos e estresse térmico, são estimadas em cerca de 30 % a 40 %, podendo chegar a 50 % para certos produtos. As perdas pós-colheita de hortícolas tem início na sua colheita e pode culminar em seu descarte antes mesmo deste chegar ao consumidor final. O conhecimento das variáveis geradoras deste desperdício, suas influências e inter-relações pode colaborar para minimizar o problema. Apresentamos neste trabalho um instrumento capaz de monitorar os impactos e a temperatura durante a colheita e pós-colheita. Este instrumento, denominado Fruta Eletrônica, foi projetado para ser uma ferramenta acessível ao produtor rural. A esfera instrumentada mede e armazena impactos triaxiais na faixa de 0,5  $g_n$  até 250  $g_n$  e temperatura na faixa de 0 °C até 80 °C. Testes em campo realizados em uma linha de beneficiamento de laranjas na cidade de Eng. Coelho, SP, mostram que esse instrumento pode fornecer informações úteis que colaboram na identificação dos pontos de estresse mecânico e térmico, os quais os frutos são submetidos.

**Palavras-chave:** Frutas artificiais, Agricultura de precisão, Ferimentos e lesões, Acelerômetros, Sensores.

# Abstract

Brazil is one of the largest worldwide producers of fruit and vegetables. However, the loss of horticultural products due to physical damage and thermal stress is estimated at about 30 % to 40 %, even 50 % for certain products. The process that degrades the quality of vegetables starts during its harvest and can culminate in its disposal even before reaching the final consumer. The knowledge of the variables that act in this waste generating process, their influences and inter-relationships can help to minimize the problem. In this work, we present a tool capable of monitoring the impacts and temperature during the postharvest. This instrument, called Fruta Eletrônica, was designed to be an accessible tool for the farmers. This instrument measures and stores triaxial impacts from 0.5  $g_n$  to 250  $g_n$  and temperatures between 0 °C and 80 °C. Field tests, carried out in an orange packing line treatment in Eng. Coelho city, show that this instrument can provide useful information to assist identifying the points of mechanical and thermal stress in which fruits are submitted.

**Keywords:** Artificial fruit, Precision agriculture, Injuries, Accelerometer, Sensors.

# Agradecimentos

A meu orientador, Prof. Fabiano Fruett, pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Marcos David Ferreira pela contribuição durante a especificação da FE e com os testes na FEAGRI e em campo.

A Poliana Spricigo pela ajuda com os testes e análise dos dados.

A João Paulo do SATE/FEEC, pela soldagem dos componentes SMD.

A todos os meus colegas de laboratório, Vitor, Paulo, Guilherme, Rafael e Heilordt que contribuíram com idéias e sugestões.

Ao pessoal da FEAGRI que nos auxiliou durante os testes.

À empresa Ouro do Brasil que nos permitiu realizar os testes em sua linha de beneficiamento de laranjas.

À CAPES e ao projeto Namitec, pelo apoio financeiro.

*A meus pais e minha esposa, que me apoiaram e me incentivaram.*

# Sumário

|                                                                |             |
|----------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                        | <b>xi</b>   |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                        | <b>xv</b>   |
| <b>Lista de Símbolos</b>                                       | <b>xvii</b> |
| <b>Glossário</b>                                               | <b>xix</b>  |
| <b>Trabalhos Publicados Pelo Autor</b>                         | <b>xxi</b>  |
| <b>1 Introdução</b>                                            | <b>1</b>    |
| 1.1 Objetivos e motivação . . . . .                            | 1           |
| 1.2 Organização da dissertação . . . . .                       | 2           |
| <b>2 Revisão bibliográfica</b>                                 | <b>5</b>    |
| 2.1 Desperdício . . . . .                                      | 6           |
| 2.1.1 Perdas pós-colheita . . . . .                            | 7           |
| 2.1.2 Causas das perdas . . . . .                              | 9           |
| 2.2 Esfera instrumentada . . . . .                             | 11          |
| 2.2.1 PMS . . . . .                                            | 12          |
| 2.2.2 IRD . . . . .                                            | 14          |
| 2.3 Aplicações da esfera instrumentada . . . . .               | 15          |
| <b>3 Estudo, desenvolvimento e projeto da Fruta Eletrônica</b> | <b>17</b>   |
| 3.1 Requisitos de projeto . . . . .                            | 17          |
| 3.2 Variáveis de interesse . . . . .                           | 19          |
| 3.3 Projeto do hardware . . . . .                              | 20          |
| 3.3.1 Acelerômetros . . . . .                                  | 20          |
| 3.3.2 Sensor de temperatura . . . . .                          | 25          |
| 3.3.3 Sensor de umidade . . . . .                              | 26          |
| 3.3.4 Microcontrolador . . . . .                               | 28          |
| 3.3.5 Chip USB . . . . .                                       | 29          |
| 3.3.6 Protótipo de desenvolvimento . . . . .                   | 30          |
| 3.3.7 Primeiro protótipo . . . . .                             | 30          |
| 3.4 Projeto mecânico do encapsulamento externo . . . . .       | 34          |

|          |                                                      |            |
|----------|------------------------------------------------------|------------|
| 3.5      | Projeto do <i>firmware</i> . . . . .                 | 36         |
| 3.6      | Projeto do software . . . . .                        | 40         |
| <b>4</b> | <b>Estruturas de testes</b>                          | <b>47</b>  |
| 4.1      | Concepção do aparato de testes de vibração . . . . . | 47         |
| 4.1.1    | Projeto do <i>shaker</i> . . . . .                   | 48         |
| 4.1.2    | <i>Driver</i> do motor . . . . .                     | 51         |
| 4.1.3    | Instrumentos . . . . .                               | 53         |
| 4.2      | Controle da estrutura . . . . .                      | 54         |
| 4.2.1    | Variáveis de E/S . . . . .                           | 54         |
| 4.2.2    | Projeto do software . . . . .                        | 54         |
| 4.3      | Aparato para testes em queda livre . . . . .         | 58         |
| 4.3.1    | Princípio de funcionamento . . . . .                 | 58         |
| 4.3.2    | Descrição do aparato . . . . .                       | 58         |
| <b>5</b> | <b>Resultados experimentais</b>                      | <b>61</b>  |
| 5.1      | Testes dos acelerômetros . . . . .                   | 61         |
| 5.2      | Caracterização do sensor de temperatura . . . . .    | 65         |
| 5.3      | Testes da FE . . . . .                               | 67         |
| 5.3.1    | Teste de aceleração estática . . . . .               | 67         |
| 5.3.2    | Teste em queda livre . . . . .                       | 68         |
| 5.3.3    | Teste em beneficiadora comercial . . . . .           | 70         |
| 5.3.4    | Testes em campo . . . . .                            | 72         |
| <b>6</b> | <b>Conclusões</b>                                    | <b>85</b>  |
|          | <b>Referências bibliográficas</b>                    | <b>87</b>  |
| <b>A</b> | <b>Segundo protótipo da Fruta Eletrônica</b>         | <b>93</b>  |
| <b>B</b> | <b>Análise Estatística</b>                           | <b>95</b>  |
| B.1      | Análise dos dados experimentais . . . . .            | 95         |
| B.1.1    | Média . . . . .                                      | 96         |
| B.1.2    | Variância . . . . .                                  | 96         |
| B.2      | Estimadores . . . . .                                | 97         |
| B.2.1    | Estimador da média . . . . .                         | 97         |
| B.2.2    | Estimador da variância . . . . .                     | 98         |
| B.2.3    | Estimador do desvio padrão . . . . .                 | 98         |
| B.2.4    | Resumo . . . . .                                     | 98         |
| B.3      | Intervalo de confiança . . . . .                     | 99         |
| B.4      | Análise dos dados de queda livre . . . . .           | 100        |
| <b>C</b> | <b>Fotos dos testes em campo</b>                     | <b>105</b> |



# Lista de Figuras

|      |                                                                                         |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Principais países produtores de frutas do ano de 2004. . . . .                          | 6  |
| 2.2  | Fotos retiradas de sites comerciais. . . . .                                            | 12 |
| 2.3  | Esquema mecânico da PMS. . . . .                                                        | 13 |
| 2.4  | Detalhe do circuito eletrônico da PMS. . . . .                                          | 13 |
| 2.5  | Fotos da IRD. . . . .                                                                   | 15 |
| 3.1  | Esquema de funcionamento da FE. . . . .                                                 | 20 |
| 3.2  | Princípio de funcionamento dos acelerômetros piezelétricos. . . . .                     | 21 |
| 3.3  | Representação de um acelerômetro piezoresistivo feito em Si. . . . .                    | 22 |
| 3.4  | Acelerômetro capacitivo diferencial feito em Si. . . . .                                | 23 |
| 3.5  | Representação de um sensor de umidade microeletrônico. . . . .                          | 27 |
| 3.6  | Protótipo de desenvolvimento da FE. . . . .                                             | 30 |
| 3.7  | Diagrama esquemático do primeiro protótipo. . . . .                                     | 32 |
| 3.8  | <i>Layout</i> da PCB do primeiro protótipo da FE. . . . .                               | 33 |
| 3.9  | Fotos da placa do primeiro protótipo da FE. . . . .                                     | 34 |
| 3.10 | Detalhe das partes separadas. . . . .                                                   | 35 |
| 3.11 | Foto da FE aberta com a PCB exposta. . . . .                                            | 35 |
| 3.12 | Foto da FE fechada. . . . .                                                             | 36 |
| 3.13 | Fluxograma do Firmware da FE. . . . .                                                   | 37 |
| 3.14 | Fluxograma do algoritmo “Módulo G”. . . . .                                             | 39 |
| 3.15 | Ciclo de medida dos valores de aceleração. . . . .                                      | 40 |
| 3.16 | Diagrama de estados do software. . . . .                                                | 41 |
| 3.17 | Exemplo dos gráficos mostrados no software. . . . .                                     | 43 |
| 3.18 | Exemplo de arquivo .txt salvo pelo software. . . . .                                    | 44 |
| 3.19 | Exemplo de arquivo .xls salvo pelo software. . . . .                                    | 44 |
| 3.20 | Interface gráfica do software. . . . .                                                  | 45 |
| 4.1  | Esquema de ligação da estrutura de testes para acelerômetros. . . . .                   | 48 |
| 4.2  | <i>Shaker</i> . . . . .                                                                 | 48 |
| 4.3  | Gráfico da amplitude da aceleração $\times$ frequência parametrizado pelo raio. . . . . | 50 |
| 4.4  | <i>Shaker</i> em funcionamento. . . . .                                                 | 50 |
| 4.5  | Circuito conta-giros . . . . .                                                          | 51 |
| 4.6  | Formas de onda do circuito conta-giros. . . . .                                         | 52 |
| 4.7  | Esquemático do <i>driver</i> . . . . .                                                  | 52 |

|      |                                                                                       |     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.8  | Fotos do <i>driver</i> do motor. . . . .                                              | 53  |
| 4.9  | Estados do software de controle. . . . .                                              | 55  |
| 4.10 | Interface de controle para a estrutura de testes. . . . .                             | 56  |
| 4.11 | Exemplo de arquivo salvo. . . . .                                                     | 57  |
| 4.12 | Foto do aparato de testes para queda livre. . . . .                                   | 60  |
| 5.1  | Teste com o acelerômetro sem filtro. . . . .                                          | 62  |
| 5.2  | Filtro passa-baixas de segunda ordem. . . . .                                         | 62  |
| 5.3  | Saída do acelerômetro medida pelo osciloscópio. . . . .                               | 63  |
| 5.4  | Saída do acelerômetro medida pelo microcontrolador. . . . .                           | 64  |
| 5.5  | Circuito sensor de temperatura. . . . .                                               | 66  |
| 5.6  | Montagem para calibração do sensor de temperatura da FE. . . . .                      | 66  |
| 5.7  | Relação tensão $\times$ temperatura obtida após calibração. . . . .                   | 67  |
| 5.8  | Testes de <i>offset</i> . . . . .                                                     | 68  |
| 5.9  | Teste de queda livre realizado com a FE. . . . .                                      | 69  |
| 5.10 | Testes de queda livre. . . . .                                                        | 69  |
| 5.11 | Beneficiadora utilizada nos testes. . . . .                                           | 70  |
| 5.12 | Esquema das linhas de beneficiamento utilizadas nos testes. . . . .                   | 72  |
| 5.13 | Testes na linha 1 com a FE, a partir da lavagem. . . . .                              | 76  |
| 5.14 | Testes na linha 1 com a IRD, a partir da lavagem. . . . .                             | 77  |
| 5.15 | Teste com a FE na linha 1 completa. . . . .                                           | 78  |
| 5.16 | Testes com a IRD na linha 1 completa. . . . .                                         | 79  |
| 5.17 | Testes na linha 2 com a FE. . . . .                                                   | 80  |
| 5.18 | Teste na linha 2 com a IRD. . . . .                                                   | 81  |
| 5.19 | Testes de queda com a FE. . . . .                                                     | 82  |
| 5.20 | Testes de queda com a IRD. . . . .                                                    | 83  |
| A.1  | Comparação entre as PCB's do primeiro e segundo protótipos da FE. . . . .             | 93  |
| A.2  | Foto da PCB do segundo protótipo da FE com os componentes eletrônicos. . . . .        | 94  |
| B.1  | Histograma do teste de quedas com $h = 11$ cm e fdp da distribuição t de Student. . . | 102 |
| B.2  | Histograma do teste de quedas com $h = 13$ cm e fdp da distribuição t de Student. . . | 103 |
| C.1  | Etapa de recebimento das laranjas na linha 1. . . . .                                 | 105 |
| C.2  | Etapa de recebimento das laranjas na linha 2. . . . .                                 | 106 |
| C.3  | Etapa de pré-classificação na linha 1. . . . .                                        | 106 |
| C.4  | Etapa de lavagem na linha 1. . . . .                                                  | 107 |
| C.5  | Etapa de lavagem na linha 2. . . . .                                                  | 107 |
| C.6  | Esteira entre a lavagem da linha 2 e a linha 1. . . . .                               | 108 |
| C.7  | Esteira antes do primeiro secador. . . . .                                            | 108 |
| C.8  | Entrada do primeiro secador. . . . .                                                  | 109 |
| C.9  | Saída do primeiro secador. . . . .                                                    | 109 |
| C.10 | Enceramento. . . . .                                                                  | 110 |
| C.11 | Entrada do segundo secador. . . . .                                                   | 111 |
| C.12 | Saída do segundo secador. . . . .                                                     | 112 |

---

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| C.13 Classificação automática. . . . . | 112 |
| C.14 Classificação manual. . . . .     | 113 |



# Lista de Tabelas

|     |                                                                                    |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | Maiores exportadores mundiais de frutas. . . . .                                   | 6   |
| 2.2 | Estimativa das perdas no pós-colheita de frutas e hortaliças. . . . .              | 7   |
| 2.3 | Perdas aferidas no estado de Minas Gerais. . . . .                                 | 8   |
| 3.1 | Comparativo das principais características dos acelerômetros comerciais. . . . .   | 24  |
| 3.2 | Massa de cada componente da FE. . . . .                                            | 36  |
| 3.3 | Exemplo de funcionamento do algoritmo “Módulo G”. . . . .                          | 39  |
| 5.1 | Valores obtidos com o teste dos acelerômetros. . . . .                             | 65  |
| 5.2 | Análise estatística dos dados de queda livre. . . . .                              | 69  |
| 5.3 | Análise dos dados para os testes na beneficiadora. . . . .                         | 71  |
| 5.4 | Pontos de transferência para os testes na linha 1, a partir da lavagem. . . . .    | 73  |
| 5.5 | Pontos de transferência para os testes na linha 1 completa. . . . .                | 74  |
| 5.6 | Pontos de transferência para os testes na linha 2. . . . .                         | 74  |
| 5.7 | Pontos de impacto para os testes de queda. . . . .                                 | 75  |
| B.1 | Resumo dos estimadores utilizados no tratamento dos dados dos testes de queda. . . | 99  |
| B.2 | Valores de $z$ para cálculo de intervalos de confiança. . . . .                    | 100 |
| B.3 | Valores de $z_{n-1}$ para cálculo de intervalos de confiança. . . . .              | 100 |
| B.4 | Valores medidos para quedas de 11 cm. . . . .                                      | 101 |
| B.5 | Parâmetros estimados a partir dos dados medidos pela FE para quedas de 11 cm. . .  | 101 |
| B.6 | Parâmetros estimados a partir dos dados medidos pela FE para quedas de 13 cm. . .  | 102 |



# Lista de Símbolos

|                  |                                                                |
|------------------|----------------------------------------------------------------|
| $A$              | - Área                                                         |
| $a$              | - Norma do vetor aceleração                                    |
| $a(t)$           | - Valor instantâneo da aceleração                              |
| $\vec{a}$        | - Vetor aceleração                                             |
| $a_{\text{ADC}}$ | - Valor de aceleração aquiritado pelo ADC do microcontrolador  |
| $a_{\text{m}}$   | - Valor máximo de $a(t)$                                       |
| $a_{\text{osc}}$ | - Valor de $a(t)$ medido pelo osciloscópio                     |
| $C$              | - Capacitância                                                 |
| $d$              | - Distância                                                    |
| $\Delta d$       | - Variação da distância                                        |
| $\epsilon$       | - Permissividade elétrica                                      |
| $\mu$            | - Média de uma variável aleatória                              |
| $\omega$         | - Frequência angular                                           |
| $\phi$           | - Fase inicial ou ângulo de fase                               |
| $\pi$            | - Razão entre o comprimento e o diâmetro de uma circunferência |
| $\sigma^2$       | - Variância de uma variável aleatória                          |
| $\sigma$         | - Desvio padrão de uma variável aleatória                      |
| $\tau$           | - Constante de tempo                                           |
| $E_c$            | - Energia cinética                                             |
| $e_i$            | - Erro aleatório                                               |
| $E[\cdot]$       | - Valor médio de uma variável aleatória                        |
| $F$              | - Força                                                        |
| $f$              | - Frequência                                                   |
| $f_Y(y)$         | - Função densidade de probabilidade da variável aleatória $Y$  |
| $F_Y(y)$         | - Função cumulativa de probabilidade da variável aleatória $Y$ |
| $g$              | - Aceleração da gravidade local                                |
| $h$              | - Altura                                                       |
| $I$              | - Corrente elétrica                                            |
| $I_S$            | - Corrente de saturação reversa                                |
| $j$              | - Unidade imaginária                                           |
| $k_H$            | - Constante da mola                                            |
| $k$              | - Constante de Boltzman                                        |

---

|              |                                                                                                   |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $m$          | - Massa                                                                                           |
| $M_n$        | - Média amostral                                                                                  |
| $n$          | - Número de repetições/experimentos                                                               |
| $p$          | - Valor numérico para a probabilidade de um evento                                                |
| $P[\cdot]$   | - Probabilidade de um evento                                                                      |
| $q$          | - Carga do elétron                                                                                |
| $R$          | - Resistência elétrica                                                                            |
| $r$          | - Raio da circunferência                                                                          |
| $r_I$        | - Relação entre densidades de corrente elétrica                                                   |
| $s_{ac}$     | - Sensibilidade do acelerômetro                                                                   |
| $STD[\cdot]$ | - Desvio padrão de uma variável aleatória                                                         |
| $T$          | - Temperatura absoluta                                                                            |
| $t$          | - Temperatura                                                                                     |
| $t$          | - Tempo                                                                                           |
| $t_{ADC}$    | - Valor de temperatura adquirido pelo ADC do microcontrolador                                     |
| $t_{SP}$     | - Temperatura <i>set point</i>                                                                    |
| $V$          | - Tensão elétrica                                                                                 |
| $v$          | - Velocidade                                                                                      |
| $V_{BE}$     | - Tensão base-emissor do transistor bipolar de junção                                             |
| $V_e$        | - Valor esperado                                                                                  |
| $V_m$        | - Valor medido                                                                                    |
| $V_{PTAT}$   | - Tensão proporcional à temperatura absoluta                                                      |
| $V_{temp}$   | - Tensão de saída do sensor de temperatura                                                        |
| $VAR[\cdot]$ | - Variância de uma variável aleatória                                                             |
| $S$          | - Desvio padrão de cada medida                                                                    |
| $S^2$        | - Variância amostral                                                                              |
| $x$          | - Deslocamento linear                                                                             |
| $x_m$        | - Deslocamento máximo                                                                             |
| $Y$          | - Variável aleatória                                                                              |
| $y$          | - Resultado de um evento                                                                          |
| $z$          | - Parâmetro utilizado para estimar o intervalo de confiança baseando-se na distribuição Gaussiana |
| $z_{n-1}$    | - Parâmetro utilizado para estimar o intervalo de confiança baseando-se na distribuição t-Student |



# Glossário

A/D - Analógico-digital

AC - *Alternating Current*

Bit - *Binary digit*

Byte - *Binary term*

CI - Circuito Integrado

CSV - *Comma Separated Values*

D/A - Digital-analógico

DC - *Direct Current*

FIFO - *Fist In First Out*

GND - *Ground*

GPIO - *General-Purpose Interface Bus*

HPIB - *Hewlett-Packard Interface Bus*

IDE - *Integrated Development Environment*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

LED - *Ligth-Emitting Diode*

PCB - *Printed Circuit Board*

PVC - Poli(cloreto de vinila)

SMD - *Surface Mount Device*

SMT - *Surface Mount Type*

TTL - *Transistor-Transistor Logic*

USB - *Universal Serial Bus*

# Trabalhos Publicados Pelo Autor

1. M. Nicolau and F. Fruett. “Development of an instrument to monitor conditions in fruit and vegetable postharvest processes”. *IV Seminatec: Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology*, São Paulo, São Paulo, Brasil, pg. 49, Abril 2008.
2. M. Nicoalu, F. Fruett, M.D. Ferreira and P.C. Spricigo. “An Instrumented Sphere for Impact and Temperature Measurements at Orange Packinghouses”. *6<sup>th</sup> International Postharvest Symposium*, Antalya, Turquia, Abril de 2009.

# Capítulo 1

## Introdução

O agronegócio é um setor muito importante para o Brasil, pois sozinha é responsável por 42 % das exportações brasileiras [1]. Dentro da agricultura a produção de frutas e hortaliças está entre as atividades mais rentáveis [2].

O Brasil está entre os maiores produtores mundiais de frutas e hortaliças, mas essa produção não tem qualidade suficiente para atender o mercado consumidor, principalmente o mercado externo. Além disso, grande parte do que é produzido não é aproveitado devido às grandes perdas que ocorrem nesse setor, podendo chegar a 50 % para certos produtos.

Embora a produção de frutas e hortaliças tenha uma reconhecida importância para a economia nacional, são poucos os instrumentos disponíveis a pesquisadores e agricultores que auxiliem no aumento do aproveitamento da produção brasileira. Há pouca literatura em língua portuguesa sobre o assunto e pesquisas sistemáticas que forneçam dados precisos sobre as perdas, pois conduzir pesquisas a fim de identificar os agentes causadores de perdas é uma tarefa difícil dado o caráter multidisciplinar desse tipo de pesquisa e a falta de ou grande dificuldade em utilizar instrumentos que auxiliem nessas pesquisas.

As perdas pós-colheita no Brasil são mensuráveis, porém sendo necessária uma identificação dos fatores e contribuição desses.

### 1.1 Objetivos e motivação

O cenário do agronegócio brasileiro tem se transformado bastante nos últimos anos. O interesse de pesquisadores e produtores em melhorar o aproveitamento da produção é cada vez maior [3]. Devido a esse aumento da demanda por produtos e serviços que auxiliem no aumento do aproveitamento da produção agrícola brasileira, nos propomos a desenvolver um instrumento capaz de atender essa necessidade crescente.

O instrumento proposto neste trabalho deve ser uma ferramenta que possa quantificar sistematicamente a causa e origem do desperdício, possibilitando assim a redução dos prejuízos associados a este problema.

Existem alguns instrumentos que se propõem a auxiliar os pesquisadores nessas pesquisas, mas esses instrumentos são importados e o custo desse tipo de equipamento é alto e de baixa acessibilidade.

O instrumento que propomos, denominado Fruta Eletrônica (FE), deve ser capaz de monitorar as condições de temperatura, impacto e umidade a que frutas e hortaliças estão sujeitas, desde o momento da colheita até sua comercialização. A FE deve ser submetida às mesmas condições que as frutas e as hortaliças. Portanto, deve ser um instrumento sem fios e com tamanho e peso compatíveis com as mais variadas frutas e hortaliças existentes no mercado nacional. Além disso deve ter baixo custo e ser de fácil manuseio.

## 1.2 Organização da dissertação

Esse trabalho, que descreve o projeto e desenvolvimento da FE e os testes feitos com ele, está organizado em seis capítulos e três apêndices, sendo:

**Capítulo 1** Breve introdução ao tema, as motivações e objetivos deste trabalho.

**Capítulo 2** Condições atuais do mercado brasileiro de frutas e hortaliças, bem como sua situação em comparação a outros mercados. Exploramos alguns dos problemas enfrentados pelo mercado brasileiro de frutas e hortaliças. Analisamos alguns instrumentos utilizados para identificar os problemas relacionados ao desperdício e suas principais aplicações.

**Capítulo 3** Projeto e confecção do instrumento proposto por esse trabalho, a FE.

**Capítulo 4** Principais aparatos de testes utilizados para caracterizar o instrumento proposto. Também mostramos os detalhes de projeto de um desses aparatos, que foi construído especialmente para a realização dos testes com a FE.

**Capítulo 5** Testes feitos com a Fruta Eletrônica, desde a etapa de projeto até sua validação e testes em campo. Alguns dos resultados obtidos para a FE são comparados com um instrumento comercial bastante utilizado e conhecido.

**Capítulo 6** Conclusões e resultados obtidos com esse trabalho.

**Apêndice A** Apresentação dos detalhes construtivos do segundo protótipo da FE.

**Apêndice B** Tratamento estatístico dos dados dos testes da FE, com cálculos e os métodos utilizados.

**Apêndice C** Fotos dos testes em campo realizado com a FE.



## Capítulo 2

### Revisão bibliográfica

A questão alimentar é um assunto bastante discutido e pesquisado no mundo todo. Órgãos internacionais como a *Food and Agricultural Organization of the United Nations* (FAO) estão constantemente monitorando a disponibilidade de alimentos, principalmente em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento [4]. Isso porque uma das grandes preocupações mundiais é a erradicação da fome [5].

Além da preocupação com a redução da fome, o agronegócio tem importância destacada na economia nacional. O Brasil tem investido bastante no setor agrícola nos últimos anos. Isso porque a grande aposta da política econômica tem sido equilibrar a balança comercial gerando um superávit primário. Para isso é necessário que a exportação de produtos agrícolas supere a importação de produtos industrializados. Conseqüentemente a produção agrícola brasileira bate novo recorde a cada ano. Além disso, o agronegócio é responsável por 42 % das exportações brasileiras [1].

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de frutas (Fig. 2.1), com um total de 44 milhões de toneladas por ano [6]. No entanto, com um mercado internacional que movimenta mais de US\$ 16 bilhões, as exportações brasileiras representam apenas US\$ 724 milhões (888 mil toneladas) [7], aproximadamente 2 % da sua produção total. Isso significa que mesmo sendo um dos maiores produtores mundiais o Brasil não se encontra no ranking dos maiores exportadores, vide Tab. 2.1. Como se não bastasse essa performance negativa nas vendas externas, o desperdício na fruticultura é um dos mais altos entre as várias atividades do país. A perda gerada pelo desperdício de frutas e hortaliças fica entre 30 % e 40 % do total produzido. Isto é equivalente a um prejuízo de US\$ 1 bilhão por ano [8].

Aumentar a disponibilidade de alimentos apresenta uma série de benefícios. O principal deles diz respeito à questão nutricional. Se há uma maior disponibilidade de alimentos, haverá mais nutrientes disponíveis para a população, especialmente para a população mais carente. Outro benefício importante é de caráter econômico, pois possibilita uma maior exportação de produtos hortícolas (frutas + hortaliças) beneficiando a balança de pagamentos do país. Também há a possibilidade de diminuição



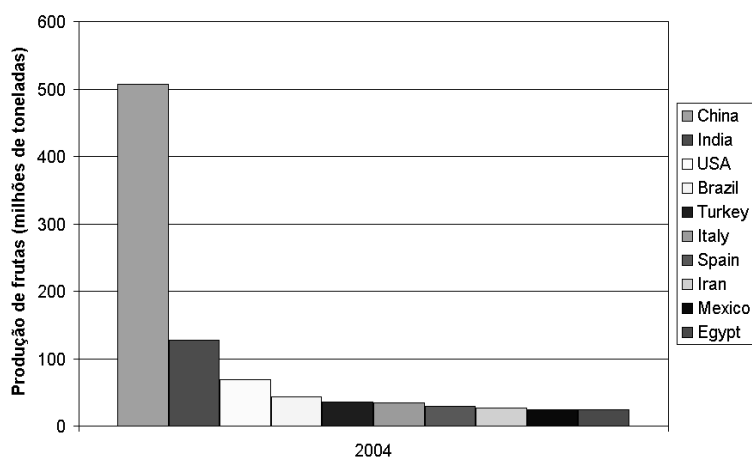


Fig. 2.1: Principais países produtores de frutas do ano de 2004.

Tab. 2.1: Maiores exportadores mundiais de frutas [2].

| Países  | Exportação (bi US\$) |
|---------|----------------------|
| Espanha | 2,4                  |
| EUA     | 2,3                  |
| Itália  | 1,6                  |
| Bélgica | 1,2                  |
| Chile   | 1,0                  |

dos preços dos alimentos que têm subido tanto nos últimos anos [9].

Para aumentar a produção de alimentos existem três caminhos distintos que podem ser percorridos [10]:

- aumento da área plantada
- aumento da produtividade
- aumento do número de safras durante o ano agrícola

Aumentar a produção aumentando a área plantada e/ou o número de safras durante o ano não é a melhor solução visto que em alguns casos até 50 % de que é produzido vai para o lixo. Portanto uma maneira de aumentar a oferta de alimentos é diminuir o desperdício de frutas e hortaliças.

## 2.1 Desperdício

Desperdício ou perda é qualquer redução na disponibilidade do alimento para o consumo. Portanto, corresponde à redução na quantidade física do produto alimentício de origem animal ou vegetal

disponível para consumo. A perda é usualmente expressa como percentual sobre a produção agropecuária, sendo especificada para o produto ou para a região. Perdas alimentares podem ser diretas ou indiretas. Uma perda direta pode ser decorrente do ataque de roedores ou aves. Já uma perda indireta pode vir a ocorrer quando a qualidade do alimento é deteriorada de tal maneira que proporcione menor satisfação ao consumidor. Essas perdas indiretas podem ser causadas por ataques de insetos, condições climáticas desfavoráveis ao transporte e ao armazenamento, manuseio inadequado, etc [11].

Obter dados precisos sobre as perdas para dado produto não é uma tarefa fácil, pois muitos são os fatores que as determinam. Além disso, a avaliação das perdas fica bastante prejudicada visto que tem sido muito comum o que muitos autores chamam de *guess-estimates* sobre perdas em atividades pós-colheita, pois poucas foram as pesquisas conduzidas com uma sistemática clara de coleta e avaliação dos dados [11].

Esse desperdício se dá, principalmente, nas várias etapas da pós-colheita. O percentual de contribuição de cada etapa do pós-colheita para as perdas em frutas e hortaliças está expresso na Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Estimativa das perdas no pós-colheita de frutas e hortaliças [12].

| Campo | Transporte | Centrais de abastecimento | Comércio | Total |
|-------|------------|---------------------------|----------|-------|
| 10 %  | 50 %       | 30 %                      | 10 %     | 100 % |

### 2.1.1 Perdas pós-colheita

A pós-colheita inicia-se imediatamente após a colheita a partir da sua fonte de produção. O processo se encerra quando o alimento é consumido pelo indivíduo. Portanto as eventuais perdas na pós-colheita estão relacionadas às atividades que constituem as etapas da pós-colheita que são [11]:

- pré-processamento
- transporte
- armazenagem
- processamento
- embalagem
- comercialização

Dados sobre o desperdício agrícola foram obtidos em um estudo detalhado da Fundação João Pinheiro [2]. Esse estudo foi realizado no estado de Minas Gerais dividido em oito regiões diferentes. Essas regiões podem ser consideradas como representativas do Brasil como um todo, pelas semelhanças que apresentam com as principais regiões brasileiras. No estudo ficou demonstrado que é necessária a produção de 1,45 kg de produtos hortícolas para que o consumidor tenha acesso a 1,0 kg dessas hortaliças em sua mesa, ou seja, mais de 30 % da produção é desperdiçada (Tab. 2.3). Esse desperdício pode ser reduzido dado que o desperdício em alguns países asiáticos agriculturalmente desenvolvidos é da ordem de 10 % [13].

Tab. 2.3: Perdas aferidas no estado de Minas Gerais [2].

| Produto               | Produção<br>(1000t) | Perdas (1000t)    |                   |                   | %<br>Perdas      | Fator de<br>Perda (kg) |
|-----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------------|
|                       |                     | Propriedade       | Atac./Varejo      | Total             |                  |                        |
| Flor/Folha/Haste      | 42,72               | 3,21              | 9,88              | 13,09             | 30,65            | 1,44                   |
| Fruto                 | 305,89              | 41,22             | 75,40             | 116,62            | 38,13            | 1,62                   |
| Raízes                | 1352,84             | 183,03            | 228,08            | 411,12            | 30,39            | 1,44                   |
| <b>Hortaliças</b>     | <b>1701,45</b>      | <b>227,46</b>     | <b>313,37</b>     | <b>540,83</b>     | <b>31,79</b>     | <b>1,47</b>            |
| <br><b>Frutas</b>     | <br><b>1400,82</b>  | <br><b>110,13</b> | <br><b>311,05</b> | <br><b>421,18</b> | <br><b>30,07</b> | <br><b>1,43</b>        |
| <br><b>Hortícolas</b> | <br><b>3102,27</b>  | <br><b>337,59</b> | <br><b>624,42</b> | <br><b>962,01</b> | <br><b>31,01</b> | <br><b>1,45</b>        |

A perda total estimada apresentada na Tab. 2.3 refere-se ao volume total de perdas, considerando tanto as ocorridas na propriedade como as ocorridas na comercialização (atacado e varejo), sendo essas últimas bem mais elevadas, notadamente para as frutas.

A fruticultura representa apenas 6,9 % da área colhida no Brasil, cuja agricultura ocupa uma área de 50,32 milhões de hectares. No entanto, tem excelente rentabilidade, representando cerca de 18 % do valor bruto da produção agrícola.

Durante o transporte deve-se buscar a manutenção na qualidade do produto. Condições inadequadas afetam em muito a qualidade do produto, dado que grande parte do tempo do ciclo pós-colheita é devido a essa etapa [14]. No processo de transporte, a perda é maior em razão das condições precárias das estradas e da utilização de veículos sem manutenção adequada [15]. Estudos demonstraram que a porcentagem de danos físicos pode aumentar em até oito vezes comparando-se o produto retirado diretamente da planta até a chegada ao galpão de beneficiamento e classificação [16]. Em geral, podemos assumir que as perdas no transporte de produtos agrícolas são basicamente causadas por danos mecânicos ou superaquecimento [17].

### 2.1.2 Causas das perdas

Os principais fatores causadores de perdas para produtos perecíveis nas etapas pós-colheita são:

**Fisiológicos:** reações químicas e bioquímicas;

**Mecânicos:** cortes, abrasões, amassamentos, quedas;

**Microbiológicos:** ataque fúngico, bacteriano e viral;

**Físicos:** condições ambientais adversas no transporte, armazenamento e comercialização;

**Biológicos:** danos por insetos, pássaros e roedores.

Os produtos perecíveis são caracterizados por terem alto teor de umidade, são metabolicamente ativos após a colheita e, conseqüentemente, deterioram-se de maneira inevitável. Existem meios para prolongar seu tempo de prateleira, mas há um limite para esse tempo. Para os produtos perecíveis esse tempo é de alguns dias, no máximo semanas. Dentre outros fatores, a temperatura, umidade relativa do ar, cuidados com o manuseio e transporte determinam o grau de perdas pós-colheita.

A seguir descreveremos com mais detalhes cada um dos fatores causadores de perdas listados no início desta seção.

#### Fatores fisiológicos

As perdas fisiológicas são causadas devido à transformações nos tecidos vegetais. As principais transformações são: elevada taxa de respiração e produção de etileno; elevada atividade metabólica; perda de massa (umidade); amaciamento dos tecidos; perda do sabor e do valor nutritivo.

As perdas fisiológicas são inevitáveis mas podem ser aceleradas devido a condições de estresse que ocorrem quando o produto é armazenado em condições ambientais de temperatura, umidade e concentração de gases adversas.

#### Fatores mecânicos

Os danos mecânicos aos produtos podem permitir sua contaminação por patógenos que penetram através dos ferimentos.

Os danos mecânicos também alteram a atividade fisiológica dos tecidos, aumentando sua taxa de respiração, divisão celular e produção de etileno, o que torna os produtos mais perecíveis. Essas reações alteram o valor nutricional e sensorial do alimento. O produto danificado amadurece mais rapidamente devido a esse aumento na atividade. A evolução de etileno da parte ferida pode desencadear o amadurecimento de outros produtos próximos ao que foi danificado. Esse aumento na taxa

respiratória também causa a perda de matéria seca e de água do produto, além de reduzir seu valor comercial.

Os danos mecânicos podem ocorrer em qualquer ponto da cadeia de comercialização. Aparecem sob a forma de abrasões, cortes, rupturas, raladuras ou amassamentos e podem ser causados por vibrações, quedas, fricções ou pelo contato de objetos pontiagudos. Se o dano for primordialmente de natureza interna, torna-se difícil sua identificação uma vez que a superfície externa pode permanecer íntegra.

As perdas causadas por danos mecânicos são freqüentemente negligenciadas e, devido à complexidade adicional das perdas fisiológicas e patológicas, são difíceis de ser estimadas. Em certas frutas, como por exemplo bananas, que são colhidas comercialmente imaturas, os danos mecânicos não são aparentes no fruto verde; contudo, são bastante visíveis após o amadurecimento, por meio de sintomas como dessecação, descoloração e ataque de patógenos, promovendo a desqualificação ou perda total do produto [2].

### **Fatores microbiológicos**

Com o ataque de microorganismos, ocorre a redução na qualidade e na vida de prateleira dos produtos hortícolas, resultando em defeitos ou doenças superficiais ou com destruição dos tecidos, o que torna o produto menos atrativo ou não-comercializável. Esses danos são particularmente indesejáveis em frutas e hortaliças destinadas ao consumo *in natura*, no qual se dá ênfase à qualidade visual do produto.

### **Fatores físicos**

Os fatores físicos que influenciam nas perdas englobam a temperatura e a umidade do ar.

A temperatura é o principal fator de perda em produtos perecíveis [18], pois, não só afeta a taxa de deterioração, como também modifica o efeito de todos os outros fatores, como umidade relativa, aeração, modificação da atmosfera, etc.

As desordens acarretadas ao produto podem ser decorrentes de temperaturas acima de um limite máximo ou abaixo de um mínimo. Esses valores variam de acordo com o tipo de fruta e hortaliça.

A temperatura elevada leva o vegetal a responder a essa situação alterando sua composição química e seu teor de umidade.

Temperaturas abaixo de 0 °C podem causar o congelamento dos tecidos vegetais. Esse congelamento pode danificar o produto. Além dos danos por congelamentos, alguns produtos podem sofrer danos mesmo em temperaturas acima da temperatura de congelamento. Frutas como abacate, limão e manga podem ser danificados pelo frio se expostos por um período prolongado (alguns dias) a temperaturas abaixo de 13 °C.

Quando colhidas, frutas e hortaliças têm seu suprimento de água pela planta cortado e são facilmente danificadas pela perda de umidade. Nessa fase, elas são mais suscetíveis ao estresse hídrico por não possuírem mais a habilidade de repor a perda d'água decorrente da transpiração. O estresse hídrico ocorre quando o teor de umidade intra ou extracelulares encontra-se fora dos valores considerados ótimos.

O teor normal de umidade na maioria dos produtos hortícolas, encontra-se acima de 90 % e a sua redução promove o estresse hídrico, cujos sintomas principais são: murchamento, perda de massa, elevação na produção de etileno, elevação na atividade respiratória, perda de clorofila, redução do aroma, redução no valor nutritivo, aumento na sensibilidade ao frio e aumento da invasão por patógenos.

### Fatores biológicos

As infestações pós-colheita por insetos, pássaros e roedores, que são de grande importância em produtos duráveis, são de pequena importância nos perecíveis, em comparação com os danos causados por microorganismos e outros fatores.

## 2.2 Esfera instrumentada

Na tentativa de estudar alguns fatores causadores de perdas nas etapas pós-colheita, pesquisadores têm utilizado as chamadas esferas instrumentadas. Essas esferas são instrumentos similares às frutas em seu tamanho e peso. Essas esferas monitoram algumas variáveis envolvidas nos processos pós-colheita, sendo a principal delas a aceleração/impacto.

O uso de instrumentos simulando frutos, também chamados pseudofrutas, não é recente. Em 1967 utilizou-se uma esfera que simulava uma batata para medir acelerações em um processo de colheita de batatas. Houve dificuldades na utilização desse instrumento juntamente com máquinas colheitadeiras, pois era um instrumento que necessitava de cabos [19, 20].

Em 1968 foi desenvolvida a PMS, do inglês *pressure measuring sphere*, e em 1974 foi aprimorada. A PMS é uma esfera que mede os esforços mecânicos sobre as frutas através da medida da pressão [21]. Essa esfera será discutida com mais detalhes na seção 2.2.1.

Em 1973 foi criada uma esfera que transmitia os dados sem fio equipada com acelerômetros. Várias limitações técnicas dificultaram sua utilização. Entre elas a dificuldade em transmitir sem fio um sinal analógico [22].

Por causa da tecnologia digital e a evolução dos sistemas computacionais o projeto de pseudo-frutas avançou consideravelmente. Em 1988–90 foi desenvolvida a IS100; uma cooperação entre o

Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, a Estação Experimental em Agricultura de Michigan e a Universidade Estadual de Michigan, EUA [23, 24]. A IS100 é uma pseudofruto de 89mm de diâmetro constituída de um microcontrolador, bateria e um acelerômetro triaxial. Durante a aquisição ela grava os dados em uma memória interna. Esses dados são depois descarregados em um computador através de uma conexão serial RS-232 e analisados em um software fornecido com a esfera. A IS100 grava todos os impactos maiores que um valor de referência e os salva juntamente com o instante em que ocorreram.

Além da PMS60 e da IS100 existem outras pseudofrutas. São elas PTR100 (Bioteknisk Institut, Dinamarca, 1990), PTR200 (SM Engineering, Dinamarca, 1999) e a ‘Smart Spud’ (Sensor Wireless, Canadá, 2000) [25]. Todas essas últimas medem aceleração/impacto.

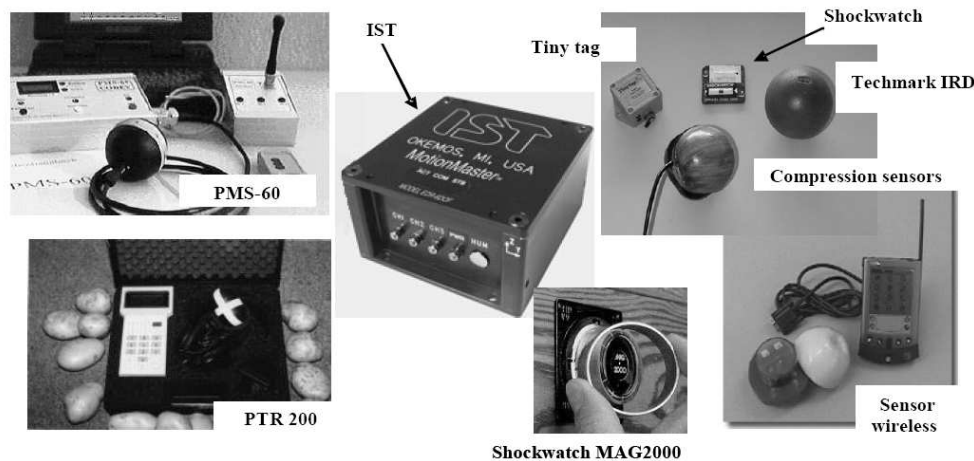


Fig. 2.2: Fotos retiradas de sites comerciais [26].

### 2.2.1 PMS

A esfera é o sólido que possui o maior volume para uma dada área de superfície. Assim sendo, qualquer carga aplicada externamente à uma esfera elástica vai causar uma variação em seu volume. Isso causa uma variação na pressão interna da esfera se ela estiver preenchida com um líquido incompressível. Essa variação na pressão pode ser medida por um único sensor interno. A PMS é composta de uma parte eletrônica centrada dentro de uma esfera de borracha preenchida com óleo. Em 1992 foi criada uma nova versão da PMS, a PMS60 com algumas melhorias no hardware, na estrutura física e na aquisição de dados. Um esquema da PMS é apresentado na Fig. 2.3.

O hardware da PMS é composto de uma bateria, uma placa digital e uma analógica (Fig. 2.4). A placa analógica contém um sensor de pressão absoluta microeletrônico e um circuito condicionador para amplificar o sinal e corrigir o *offset*. A placa digital contém um microcontrolador, um circuito de

alimentação para gerenciamento de energia, uma memória RAM estática de 32 kbyte e uma interface para comunicação de cinco fios.

A comunicação da esfera com o computador necessita de um outro hardware chamado CODEV. A comunicação é feita através da interface serial RS-232. Esse hardware também é responsável pela recarga da bateria da esfera.

A PMS só grava valores de pressão acima de um valor mínimo. Quando a pressão volta abaixo desse valor ela grava também uma certa quantidade de valores anteriores para dar uma idéia do histórico das pressões próximo do impacto.

A interface de usuário que controla a esfera através do computador roda sobre o MS-DOS. Esse

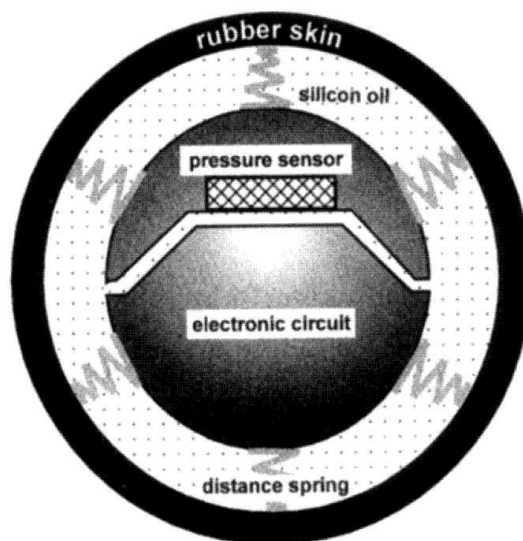


Fig. 2.3: Esquema mecânico da PMS.

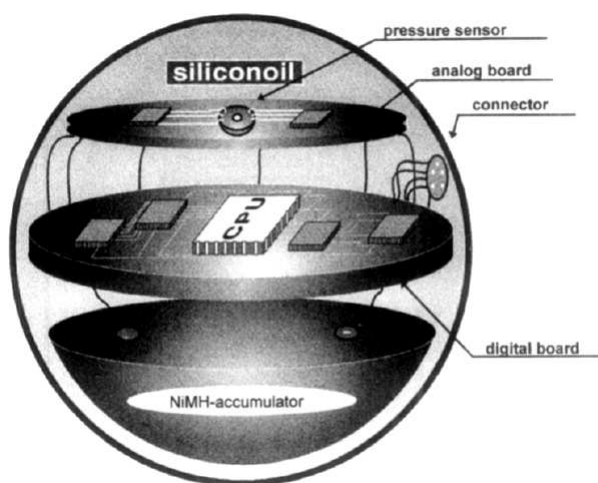


Fig. 2.4: Detalhe do circuito eletrônico da PMS.



programa mostra os dados na tela e efetua alguns cálculos básicos sobre os dados, também exporta os dados em um formato de planilha de dados [19].

### 2.2.2 IRD

A esfera mais utilizada para fazer medidas de impactos é a IRD© (*Impact Recording Device*©). Ela é uma esfera comercial da Techmark, Inc©. IRD é o nome comercial da IS100 que foi apresentada na seção 2.2.

A IRD possui um acelerômetro piezelétrico triaxial capaz de medir acelerações de até  $500 g_n^a$  com uma resposta em frequência de 5 Hz a 3 kHz. A exatidão da medida da aceleração pela IRD é de 3 % e sua resolução é de 8 bits. A faixa de temperatura que ela opera vai de  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A IRD é imersível em líquidos desde que seu conector seja tapado com fita isolante ou similar. Ela opera com uma bateria de 6 V (NiMH). Possui uma memória interna de 32 kbytes. Sua frequência de amostragem para a aceleração varia de 488 Hz a 5 kHz e é selecionável. A IRD não mede acelerações abaixo de um determinado valor que é selecionável pelo usuário. Esse valor depende das características de calibração da IRD e o valor mínimo selecionável é de aproximadamente  $6 g_n$ . A IRD salva a amplitude triaxial do impacto e o tempo. A esfera IRD funciona em três modos de operação: ativo, espera e desligado. Para fazer medidas e comunicar com o computador a IRD deve estar no modo ativo. Quando ociosa ela fica no modo de espera que consome pouca energia, o suficiente para manter os dados da última medida na memória. Quando a tensão da bateria cai a menos de 4 V ela entra no modo desligado. Nesse modo de operação ela não gasta bateria mas todas as informações da memória são perdidas.

Para comunicação com o computador é fornecido um software chamado PCIRD©. Esse software é responsável por ler as medidas feitas pela IRD e salvá-las no computador. O arquivo é salvo como um arquivo CSV que é interpretado pelo PCIRD. O PCIRD também é responsável por definir alguns parâmetros da IRD como valores de calibração (fornecidos juntamente com a IRD), valor mínimo de acelerações medidas, frequência de amostragem e a quantidade de pontos salvos a cada medida. Os dados medidos pela esfera são interpretados nesse mesmo software. Esses dados são apresentados em forma de tabelas e gráficos. As tabelas mostram um resumo dos dados. Os gráficos são de dois tipos: um mostra a amplitude das acelerações no tempo, o outro apresenta os dados de uma forma particular desenvolvida especificamente para essa esfera.

A comunicação entre a IRD e o computador é feita utilizando-se um equipamento especial, uma “caixa para comunicação e carga”<sup>b</sup>. Esse equipamento, fornecido juntamente com a IRD, também é responsável pela recarga da bateria da IRD. Para descarregar os dados da IRD para o computador é

---

<sup>a</sup>1  $g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$  [27].

<sup>b</sup>Tradução livre para *charger/communications box*.

necessário ligar a IRD à essa caixa utilizando-se um cabo especial fornecido no kit da IRD. Para ligar essa caixa ao computador utiliza-se um cabo RS-232. Deve-se ligar a caixa de comunicação à uma tomada. Depois disso, utilizando o software PCIRD pode-se ler os dados da esfera [28].

A Fig. 2.5 mostra duas fotos da IRD.



Fig. 2.5: Fotos da IRD.

## 2.3 Aplicações da esfera instrumentada

A esfera instrumentada é utilizada para medir grandezas físicas. Vemos as esferas instrumentadas sendo utilizadas para medir temperatura [29], estresse [30], aceleração [31], força e pressão [19] e comportamento de sedimentos no fundo de um rio [32]. Abrangendo as mais diversas áreas do conhecimento: agricultura, engenharia, bioquímica, ciências do ambiente, física, ciência dos materiais. . .

Apesar de toda essa variedade notamos a maior utilização da esfera instrumentada na agricultura. A esfera instrumentada é especialmente útil para analisar as condições às quais frutas e vegetais são submetidos na etapa de pós-colheita. Dado o grande desperdício da produção de frutas e hortaliças acontecer na etapa de pós-colheita, é de grande interesse o estudo das causas desse desperdício.

O desperdício de frutas e hortaliças está diretamente ligado aos danos físicos e às condições ambiente presentes durante a etapa de pós-colheita. Então podemos desenvolver instrumentos e métodos que nos permitam relacionar as condições à que frutas e hortaliças são submetidas com os danos sofridos pelas mesmas em cada etapa desde a colheita até sua comercialização no varejo.



## Capítulo 3

# Estudo, desenvolvimento e projeto da Fruta Eletrônica

A partir da identificação do problema do desperdício associado às etapas pós-colheita, nos propomos a estudar, desenvolver e projetar um instrumento com características especiais que seja capaz de medir algumas variáveis relacionadas diretamente às perdas pós-colheita. Apresentamos neste capítulo um estudo dos requisitos de projeto desse instrumento e também das variáveis de interesse. Após a definição destes requisitos e da identificação das variáveis, projetamos o primeiro protótipo do instrumento denominado Fruta Eletrônica (FE). A FE é composta basicamente por três partes: hardware, *firmware* e software. O desenvolvimento e projeto dessas partes são descritos ao longo desse capítulo.

### 3.1 Requisitos de projeto

No capítulo 2 apresentamos a revisão bibliográfica de algumas esferas instrumentadas comerciais destinadas ao uso na agricultura de precisão<sup>a</sup>. Identificamos algumas características comuns e necessárias ao nosso projeto. Além disso, observamos que algumas características das esferas instrumentadas comerciais dificultavam a sua utilização. Nesta direção definimos que os principais requisitos do projeto da FE são:

- Baixo custo;
- Baixo consumo de energia;
- Grande autonomia;

---

<sup>a</sup>Consiste na utilização de tecnologias atuais (eletrônica, informática, etc.) a fim de aumentar a produtividade na agricultura

- Tamanho compatível;
- Fácil operação;
- Aquisição de dados sem fio.

O custo das esferas instrumentadas comerciais disponíveis atualmente é alto pois são instrumentos importados que dificilmente podem ser adquiridos por produtores rurais. O custo da esfera instrumentada da Techmark [33] modelo IRD400 é de aproximados US\$5111,00 [34]. A nacionalização do projeto desse instrumento e a utilização de componentes disponíveis no mercado nacional para a sua construção colaboram para a redução de custo, tornando esse instrumento uma ferramenta ao alcance do produtor rural para que possa identificar os problemas associados às perdas.

A FE deve fazer as medidas das variáveis de interesse sem a utilização de cabos e a energia para seu funcionamento é provida por uma bateria interna. As variáveis de interesse devem ser armazenadas pela FE com uma referência temporal. A etapa de aquisição das variáveis deve ter duração suficiente para que todo o processo de beneficiamento ou de transporte seja monitorado.

Um baixo consumo de energia colabora para um aumento da autonomia, mas no caso da FE somente isso não é suficiente. Sua autonomia também depende do tamanho da memória onde os dados medidos são salvos. Para ter uma boa autonomia é necessário além do baixo consumo de energia, uma boa capacidade de memória.

A FE é um instrumento que deve imitar um fruto em seu tamanho e peso. Isso significa que quanto menor e mais leve for o instrumento, melhor ele poderá se adaptar aos diversos tipos e tamanhos de frutos. Para isso é necessário que seja utilizado o menor número possível de componentes eletrônicos. Esse número reduzido de componentes também colabora para um menor consumo de energia.

Outra característica desejável para a FE é que ela seja de fácil operação. Para isso deveríamos projetar a FE de modo que ela utilize o menor número de cabos possível para comunicar-se com o computador. Também é desejável que essa comunicação com o computador e a interface com o usuário sejam simples e diretas, sem a utilização de equipamentos extras. Como a utilização da FE acontece principalmente no campo, onde o acesso à energia elétrica é difícil, utilizar um equipamento extra acarreta em algumas complicações.

Outro componente da FE que deve facilitar seu uso é o software que vai instalado no computador. Esse software é responsável por descarregar os dados aquisitados pela FE, exibí-los na tela do computador e salvá-los. Para que a utilização do software seja facilitada, a comunicação entre o computador e a FE deve ser a mais direta possível, sem que o usuário tenha que definir muitos parâmetros no software para que a comunicação aconteça.

O software também não deve oferecer muitas opções de gráficos e formatos de arquivos para salvar os dados, senão sua utilização pode ficar confusa.

## 3.2 Variáveis de interesse

Como descrevemos na seção 2.1.2 são vários os fatores que podem causar danos às frutas e hortaliças resultando no subaproveitamento da produção. Os fatores que nos propomos a estudar neste trabalho são os fatores mecânicos e ambientais.

Alguns fatores mecânicos que podem causar danos às frutas são: cortes, abrasões e amassamentos causados, usualmente, por manuseio indevido do produto. Esses danos podem ser decorrentes de impactos sofridos pelos produtos hortícolas. Esses impactos podem chegar a valores maiores que 200 g<sub>n</sub> em processamentos pós-colheita para produtos mais resistentes a impactos, como por exemplo a batata [35].

Os fatores ambientais que podem causar perdas se não estiverem dentro de valores aceitáveis estão ligados ao tipo de atmosfera ao qual o produto está sujeito, e esses fatores são temperatura e umidade.

Deve-se evitar que os produtos de origem vegetal sejam expostos a extremos de temperatura (frio ou calor). Produtos expostos ao sol podem ter sua temperatura elevada em até 15 °C acima da temperatura ambiente. As temperaturas elevadas aumentam a taxa de metabolismo dos produtos hortícolas reduzindo seu tempo de vida pós-colheita, ou seja, o tempo em que o produto ainda está adequado para o consumo. Por exemplo, o milho-doce pode perder até 14 % do seu teor de açúcares quando armazenado a 20 °C por três horas, mas se armazenado a 0 °C essa perda pode ser reduzida a 4 % em um período de 24 h. Existe um limite máximo de temperatura para qualquer tecido vivo. Esse limite está entre 50 °C e 55 °C. Acima dessa temperatura as proteínas e enzimas contidas nos tecidos desnaturam-se e perdem sua função, com isso o metabolismo das frutas e hortaliças fica descontrolado causando colapso dos tecidos.

As baixas temperaturas também podem causar danos aos produtos hortícolas. Esses danos manifestam-se como depressões na superfície, descoloração interna, colapso dos tecidos, etc. Temperaturas abaixo de 0 °C causam danos irreversíveis à praticamente todos os produtos hortícolas devido ao congelamento dos tecidos. Os produtos originários de climas temperados sofrem menos com as temperaturas baixas, alguns suportam 0 °C durante um tempo limitado sem apresentar qualquer tipo de dano. Produtos de origem tropical são mais sensíveis a temperaturas baixas. Alguns exemplos de frutas e hortaliças que sofrem danos com o frio são as mangas, vagens, berinjelas, certos melões e pimentas doces. Esses produtos são danificados por temperaturas abaixo de 7,5 °C. Outros produtos mais sensíveis ao frio são bananas, abóboras, tomate e pepino. Esses não suportam temperaturas inferiores a 11 °C.

A umidade relativa baixa pode provocar o murchamento de produtos folhosos e frutas. A umidade relativa alta, embora evite esse murchamento, pode favorecer o aparecimento de patógenos, além de influenciar no metabolismo. A umidade ideal para armazenagem de frutas e hortaliças está entre 85 % e 95 % [2].

Portanto para diminuir ao máximo as perdas decorrentes de fatores ambientais desfavoráveis é necessário um controle muito preciso dos valores de temperatura e umidade.

Além desses fatores que causam danos aos produtos agrícolas, a FE deve medir o tempo durante a etapa de aquisição dos dados. Essa medida de tempo é necessária para que possamos relacionar o instante em que ocorrem os eventos durante o processo pós-colheita em estudo com os valores das variáveis aquisitados pela FE.

### 3.3 Projeto do hardware

No projeto do hardware da FE os principais componentes utilizados foram:

- Sensores;
- Microcontrolador;
- Conversor USB/paralelo.

Um diagrama esquemático da FE é mostrado na Fig. 3.1.

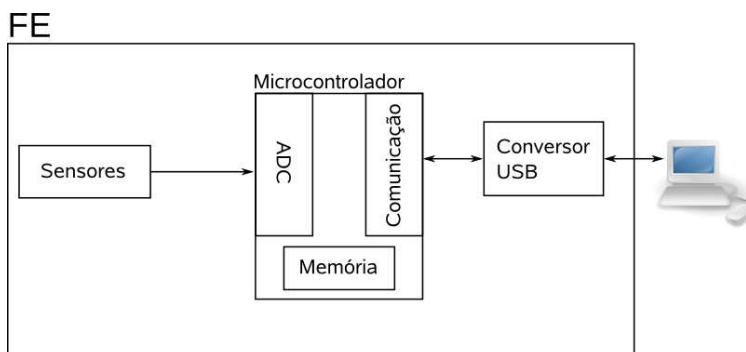


Fig. 3.1: Esquema de funcionamento da FE.

Todos os componentes utilizados na FE são componentes comerciais pois o objetivo desse projeto foi desenvolver o sistema como um todo e não algum componente específico.

A seguir, apresentamos um estudo detalhado de cada componente.

#### 3.3.1 Acelerômetros

O primeiro componente escolhido foi o acelerômetro. O acelerômetro é o principal componente desse projeto. A escolha de um acelerômetro que satisfaça os requisitos de funcionamento da FE é crucial. Por isso sua escolha deve ser cuidadosa.

Os acelerômetros são constituídos basicamente por um sistema massa-mola. Quando esse sistema é submetido à uma aceleração, surge uma força que tende a deslocar a massa de seu ponto de equilíbrio. Essa massa será deslocada até que a força gerada pela aceleração seja igual à força de restituição da mola.

$$F = ma \quad (3.1)$$

$$F = k_H x \quad (3.2)$$

Das equações (3.1) e (3.2) pode-se concluir que o deslocamento da massa será proporcional à aceleração à qual está sujeita ( $x = \frac{m}{k_H}a$ ). Medindo-se esse deslocamento pode-se relacionar o seu valor à aceleração. Esse é o princípio básico de funcionamento dos acelerômetros.

Os tipos de acelerômetro mais utilizados são: piezelétricos, piezoresistivos e capacitivos.

### Acelerômetros piezelétricos

Nesse tipo de acelerômetro o material piezelétrico funciona como a mola do sistema massa-mola. A força aplicada à massa é transmitida ao material piezelétrico. A Fig.3.2 ilustra esse princípio de funcionamento. Na figura a massa está sujeita à uma aceleração causada por alguma força externa.



Fig. 3.2: Princípio de funcionamento dos acelerômetros piezelétricos (adaptado de [36]).

Quando uma força atua no material ele é polarizado devido ao surgimento de cargas elétricas. Essa polarização é proporcional à força aplicada. Assim, para medir a aceleração é necessário um circuito de condicionamento que converta as cargas elétricas geradas pelo sensor em tensão elétrica. Alguns sensores já vêm com um circuito embutido no encapsulamento que faz essa conversão.

Algumas características desse sensor são: resposta linear para uma grande faixa de amplitude da aceleração, resposta plana em uma ampla faixa de frequências e excelente durabilidade desde que não se exceda seus limites de operação [37].

Alguns materiais utilizados nos acelerômetros piezelétricos são: o quartzo, o mais popular; diversos tipos de cerâmicas; e até mesmo silício (Si) com um filme piezelétrico depositado<sup>b</sup>.

<sup>b</sup>O Si não apresenta o efeito piezelétrico.



### Acelerômetros piezoresistivos

Piezoresistividade é a propriedade de um material ter sua resistência influenciada pelo estresse mecânico ao qual está sujeito. Os acelerômetros piezoresistivos utilizam essa propriedade para medir o deslocamento  $x$  e relacioná-lo à aceleração.

O Si apresenta o efeito de piezoresistência e esse efeito é uma ordem de grandeza maior que para os metais. Esse fenômeno já foi bastante estudado para o Si e seu comportamento sob estresse é bem conhecido [38].

Nos acelerômetros piezoresistivos é normalmente utilizada uma microestrutura em Si como mostrado na Fig 3.3.

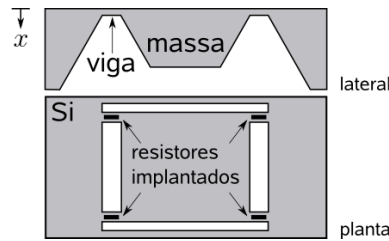


Fig. 3.3: Representação de um acelerômetro piezoresistivo feito em Si.

Essa estrutura é feita por um processo de micromáquina em Si e é constituída por uma massa central engastada por vigas. Essas vigas correspondem à mola do sistema massa-mola. Sob aceleração essa massa é deslocada. Esse deslocamento gera deformação mecânica nas vigas que por sua vez altera o valor de resistência dos resistores implantados. Essa variação na resistência pode ser diretamente relacionada ao deslocamento e conseqüentemente à aceleração [39].

A magnitude do efeito piezoresistivo é dependente da temperatura. Desta forma, o circuito de condicionamento deve ser projetado de forma a compensar essa deriva térmica.

### Acelerômetros capacitivos

Os acelerômetros capacitivos são formados por capacitores de placas paralelas. Esses capacitores possuem normalmente uma das placas fixa e outra móvel. A variação da capacitância deve-se à mudança na distância ou na área entre as placas. A capacitância de um capacitor de placas paralelas é dada por:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (3.3)$$

No caso em que o acelerômetro é projetado para que a distância seja dependente da aceleração, temos que a distância  $d$ , indicada na equação 3.3, corresponde ao deslocamento  $x$  na equação 3.2.

Medindo-se a variação na capacitância pode-se conhecer o deslocamento da placa móvel  $x$  e assim conhecer a aceleração  $a$ .

A influência da temperatura na sensibilidade dos acelerômetros capacitivos é intrinsecamente menor que no caso dos piezoresistivos [40]. Ainda assim para minimizar ao máximo o efeito da temperatura, *drifts* e interferências os acelerômetros capacitivos são montados usando um segundo capacitor cuja variação na capacitância esteja em oposição de fase com o primeiro capacitor. Essa montagem é feita utilizando-se uma estrutura diferencial microfabricada, onde a placa central móvel é envolvida por duas placas periféricas fixas. Essa estrutura e seu esquema elétrico são mostrados na Fig. 3.4.

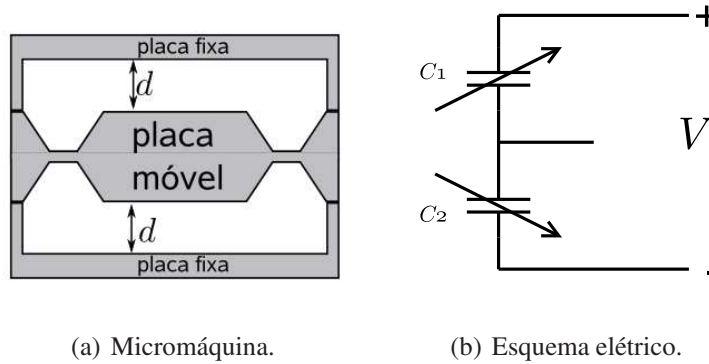


Fig. 3.4: Acelerômetro capacitivo diferencial feito em Si.

Além de minimizar alguns efeitos indesejáveis, essa montagem diferencial possibilita que o sinal de saída seja linear com o deslocamento e sua sensibilidade é maior comparada à de um único capacitor [41]. Consideremos que a capacitância dos capacitores da Fig. 3.4(b) seja dada por:

$$C_i = \frac{\epsilon A}{d + \Delta d} \quad (3.4)$$

sendo que  $\Delta d$  é a variação na distância das placas. Essa variação tem sinais contrários para os capacitores  $C_1$  e  $C_2$ . A tensão elétrica sobre cada capacitor é dada por:

$$V_1 = \frac{V}{(1/j\omega C_1) + (1/j\omega C_2)} \frac{1}{j\omega C_1} = V \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (3.5)$$

$$V_2 = \frac{V}{(1/j\omega C_1) + (1/j\omega C_2)} \frac{1}{j\omega C_2} = V \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (3.6)$$

Substituindo os valores das capacitâncias dados pela equação 3.4 e considerando  $\Delta d$  positivo para  $C_1$  e negativo para  $C_2$  temos:

$$V_1 = V \frac{1/(d - \Delta d)}{1/(d + \Delta d) + 1/(d - \Delta d)} = V \frac{d + \Delta d}{2d} \quad (3.7)$$

$$V_2 = V \frac{1/(d + \Delta d)}{1/(d + \Delta d) + 1/(d - \Delta d)} = V \frac{d - \Delta d}{2d} \quad (3.8)$$

Subtraindo as tensões  $V_1$  e  $V_2$  obtemos:

$$V_1 - V_2 = V \left( \frac{d + \Delta d}{2d} - \frac{d - \Delta d}{2d} \right) = V \frac{\Delta d}{d} \quad (3.9)$$

A vantagem da equação 3.9 sobre as equações 3.3 e 3.4 é que o sinal de saída torna-se linear com a variação na distância  $\Delta d$ .

Uma vantagem dos acelerômetros capacitivos é a possibilidade de inclusão de um circuito de autoteste. Esse circuito possibilita a verificação da integridade do acelerômetro e até mesmo sua calibração [42]. Esse pode ser um recurso importante para aplicações onde deseja-se detectar impactos, pois dependendo da amplitude do impacto, pode acontecer do acelerômetro se danificar.

### Escolha dos acelerômetros

A Tab. 3.1 mostra um comparativo entre algumas características dos três tipos de acelerômetro vistos.

Tab. 3.1: Comparativo das principais características dos tipos de acelerômetros disponíveis comercialmente (adaptado de [40] e [37]).

|                           | Capacitivo | Piezelétrico | Piezo-resistivo |
|---------------------------|------------|--------------|-----------------|
| Resposta estática         | Sim        | Não          | Sim             |
| Resposta dinâmica         | até 1 kHz  | até 50 kHz   | até 10 kHz      |
| Faixa de medida ( $g_n$ ) | 5E-5 a 1E3 | 1E-6 a 1E6   | 1E-3 a 1E5      |
| Faixa dinâmica            | ~ 90dB     | ~ 120dB      | ~ 80dB          |
| Sensibilidade             | Alta       | Média        | Média           |
| Necessita eletrônica      | Sim        | Sim          | Não             |
| Custo                     | Médio      | Alto         | Baixo           |

Dentro dessas famílias de acelerômetros existem inúmeras possibilidades de escolha e suas características são bastante variadas.

Para fazer parte da FE os acelerômetros devem ser de baixo custo, seu tamanho deve possibilitar sua montagem dentro de uma esfera com diâmetro de aproximadamente 70 mm, seu consumo de energia deve ser compatível com a utilização de baterias, sua montagem deve exigir o mínimo de componentes possível para que não comprometa o tamanho final da FE, e finalmente a faixa de

aceleração deve compreender valores que vão desde a aceleração da gravidade ( $1 g_n$ ) até impactos maiores que  $200 g_n$ .

O motivo do baixo consumo e dos componentes externos já foram explicados na seção 3.1. Os valores de impacto foram apresentados na seção 3.2. Os valores de aceleração próximos de  $1 g_n$  são necessários para o estudo do processo de transporte, que também apresenta grandes perdas (vide seção 2.1) e os valores de acelerações medidos são bem menores se comparados a testes de impacto em linhas de beneficiamento<sup>c</sup> devido à ausência de impactos decorrentes de quedas.

Outra informação contida na aceleração, mais precisamente na aceleração estática, diz respeito à posição espacial da fruta. Essa informação permite que conheçamos qual é a posição predominante da fruta em uma linha de beneficiamento. Isso pode ser importante dado que muitas frutas não são esferas perfeitas, às vezes nem mesmo são simétricas. Se a esfera instrumentada imitar também o formato da fruta, essa é uma informação possível de obtermos [43].

Escolhemos os acelerômetros capacitivos porque seu sinal de saída pode ser lido diretamente pelo microcontrolador pois o condicionamento do sinal já é feito dentro do próprio *chip*. Esses acelerômetros medem acelerações estáticas e impactos de até  $250 g_n$ . O custo desse tipo de acelerômetro é bastante atrativo, por volta de R\$70,00 a unidade.

Os acelerômetros utilizados na FE foram o MMA1200 e o MMA3202, ambos da Freescale Semiconductor. Possuem eletrônica interna para conversão da variação da capacitância em tensão e o sinal de saída é linear com a variação da aceleração.

A faixa de aceleração medida pelo MMA1200 é de  $\pm 250 g_n$  para o eixo z. A faixa do MMA3202 é de  $\pm 100 g_n$  para o eixo x e  $\pm 50 g_n$  para o eixo y.

### 3.3.2 Sensor de temperatura

Sensores de temperatura dos mais variados tipos estão disponíveis comercialmente.

Os sensores eletrônicos de temperatura baseiam-se em um dos seguintes princípios de funcionamento: resistivo, termoeletrico, semicondutivo, óptico ou piezoeletrico.

Cada tipo de sensor tem suas características particulares. Eles devem ser escolhidos conforme suas características sejam mais indicadas para a aplicação a que se destinam.

A faixa de temperatura de interesse não é muito ampla, pois frutas e hortaliças não se dão bem com temperaturas abaixo de  $0^\circ\text{C}$  ou acima de  $55^\circ\text{C}$ . Quase todos os sensores de temperatura funcionam nessa faixa de temperatura, então esse não é um fator crítico para escolha do sensor.

O importante para o sensor de temperatura é que sua sensibilidade e faixa de medida sejam compatíveis com a resolução do conversor analógico-digital (A/D) do microcontrolador. Também é im-

---

<sup>c</sup>Conjunto de equipamentos automatizados utilizados para beneficiamento (lavar, secar, embalar, etc.) de frutas e hortaliças.

portante que ele tenha um baixo consumo de energia, e seu sinal de saída seja lido diretamente pelo microcontrolador, dispensando componentes extras.

Os únicos sensores que cumprem os requisitos de sensibilidade, faixa de medida, tamanho e consumo de potência são os sensores microeletrônicos. Mesmo restritos aos sensores de temperatura microeletrônicos, ainda assim as possibilidades de escolha são muitas. Um sensor bastante conhecido é o LM335 da National Semiconductor Corp. Esse sensor é um dos mais baratos disponíveis, senão o mais barato entre os microeletrônicos. A tensão de saída é linear com a variação da temperatura [44], possui uma sensibilidade de 10 mV/°C e necessita de apenas um resistor para polarização. Ele pode operar com uma corrente tão baixa quanto 400  $\mu$ A. Quando polarizado com 5 V isso corresponde a 2 mW.

Esse sensor de temperatura baseia-se na bem conhecida relação da tensão base-emissor de um transistor bipolar de junção com a temperatura. O LM335 utiliza como sinal principal a diferença entre duas tensões base-emissor de transistores bipolares operando com diferentes densidades de corrente. Desta forma o sinal de saída é dado por:

$$V_{PTAT} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{r_I I}{I_{S1}} \right) - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I}{I_{S2}} \right) \quad (3.10)$$

sendo que  $r_I$  é a relação entre as densidades de corrente,  $k$  a constante de Boltzmann,  $q$  a carga do elétron,  $T$  a temperatura absoluta,  $I$  é a corrente de coletor para os dois transistores e  $I_{Si}$  é a corrente de saturação reversa para cada transistor. Se os dois transistores são idênticos podemos assumir  $I_{S1} = I_{S2}$ , então a equação 3.10 pode ser reescrita como:

$$V_{PTAT} = \frac{kT}{q} \ln r_I \quad (3.11)$$

Essa diferença de tensão é proporcional a temperatura absoluta  $T$ , por isso é normalmente conhecida por PTAT (*Proportional to Absolute Temperature*). Note que a equação 3.11 não depende da corrente de polarização dos transistores mas somente da relação entre as densidades de corrente.

### 3.3.3 Sensor de umidade

Para o projeto de esferas instrumentadas devemos escolher sensores de tamanho reduzido para que possam ser incorporados às esferas sem prejudicar sua semelhança em tamanho com as frutas. Os sensores de umidade compatíveis com o uso em esferas instrumentadas são os microeletrônicos.

Dentre os sensores de umidade microeletrônicos destacamos os condutivos e os capacitivos. Esses dois tipos de sensores de umidade funcionam de forma semelhante.

Eles são compostos de um substrato, um filme higroscópico depositado sobre o substrato e eletrodos interdigitados para aumentar a área de contato entre os eletrodos e o filme. Esse sensor está

representado na Fig. 3.5.

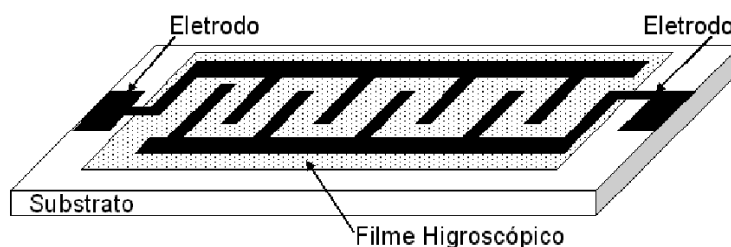


Fig. 3.5: Representação de um sensor de umidade microeletrônico (retirado de [45]).

A diferença entre o sensor condutivo e o capacitivo está no tipo de filme higroscópico utilizado.

### Sensor de umidade condutivo

Para o sensor condutivo é utilizado um tipo de filme que tem sua condutância alterada de acordo com a umidade do ar. Os tipos de materiais empregados como filme nesse tipo de sensor podem ser: cerâmicos, polímeros ou eletrolíticos.

Como a condutância do sensor varia com a umidade podemos utilizar a lei de Ohm para medir a umidade relativa do ar medindo o resistência do sensor.

$$V = RI \quad (3.12)$$

Aplicando uma tensão conhecida e bem controlada ao sensor podemos medir a corrente que passa por ele e assim calcular o valor da resistência do sensor e relacioná-la ao valor da umidade relativa do ar.

### Sensor de umidade capacitivo

Para o sensor capacitivo o filme utilizado varia o valor de sua permissividade elétrica de acordo com a umidade do ar. Os tipos de materiais utilizados nos sensores capacitivos são: cerâmica porosa, silício e polímeros.

Podemos relacionar a umidade relativa do ar com o valor da capacitância de um sensor capacitivo utilizando a equação 3.3. Como no sensor de umidade o parâmetro que varia seu valor é a permissividade elétrica, então temos uma relação linear da permissividade com a capacitância. Mas a permissividade não tem uma relação linear com a umidade relativa do ar [45].

Selecionamos um sensor de umidade Sensirion modelo SHT15. Esse sensor é do tipo capacitivo com filme polimérico. Ele tem baixo consumo de energia, já vem calibrado de fábrica, possui saída digital e utiliza dois pinos para comunicação. Além da umidade esse sensor também mede

temperatura. A medida das variáveis é feita por um conversor A/D de 14 bits embutido no mesmo encapsulamento do sensor.

### 3.3.4 Microcontrolador

O microcontrolador é responsável por fazer aquisição dos sinais dos sensores, armazenar na memória e transferi-los para o computador quando necessário. Para cumprir essas tarefas e ainda assim estar dentro das especificações da FE (seção 3.1) o microcontrolador deve possuir as seguintes características mínimas:

- Possuir um modo de baixo consumo de energia;
- Tensão de alimentação compatível com a dos sensores;
- Conversor A/D de 4 canais com resolução compatível com o sinal dos sensores;
- Temporizador;
- 15 entradas/saídas digitais;
- Uma entrada com possibilidade de interrupção externa.

Como o processamento dos dados coletados é feito no computador, não é necessário um microcontrolador de alto desempenho. Um microcontrolador de 8 bits já é suficiente para cumprir as funções requeridas pela FE.

O microcontrolador escolhido para comandar todo o sistema da FE foi um microcontrolador da Freescale, o MC68HC908AP64CFA. Na época do projeto da FE este era o único microcontrolador da Freescale a possuir um conversor A/D de 10 bits. Esse é um item importante do projeto da FE pois permite uma resolução de aproximadamente 5 mV para uma tensão de alimentação de 5 V. Esse valor é importante no caso dos sensores da FE. Para um conversor de 8 bits a resolução do conversor A/D seria de aproximadamente 9 mV. Essa limitação restringiria muito a resolução da medida da temperatura e da aceleração.

Esse microcontrolador funciona com uma tensão de alimentação de 5 V, igual à dos acelerômetros. Tem um conversor A/D multiplexado de 8 canais e 10 bits. Possui dois modos de economia de energia, dois temporizadores com dois canais cada um, 16 entradas/saídas digitais e dois pinos para interrupção externa.

Por ser um microcontrolador de 8 bits, é de baixo custo. O encapsulamento escolhido foi o LQFP de 48 pinos dado o grande número de pinos necessários para comandar a FE e a necessidade de ocupar pouco espaço já que esse encapsulamento é o menor para esse microcontrolador (9 mm×9 mm).

Outra vantagem desse microcontrolador é que ele possui 64 kbytes de memória FLASH. Esse tipo de memória é não-volátil, isto é, não perde o seu conteúdo mesmo na ausência de energia. Essa memória além de utilizada para gravar o *firmware* do microcontrolador também pode ser utilizada para gravar os dados medidos dos sensores.

### 3.3.5 Chip USB

Entre as características de fácil operação da FE está a comunicação direta da FE com o computador. O tipo mais recomendado de comunicação de um microcontrolador com um computador é a comunicação serial. Até pouco tempo atrás a comunicação via porta serial (RS-232) era a mais utilizada, pois era a única forma de comunicação serial direta com o computador. Até hoje muitos sistemas ainda utilizam essa forma de comunicação. Essa comunicação é de fácil implementação pelo fato de muitos microcontroladores terem embutido o protocolo de comunicação dessa interface, bastando apenas um único *chip* extra pra fazer a conversão de tensão TTL para RS-232 e alguns capacitores.

Outra forma de comunicação serial que conquistou seu espaço é a USB. Atualmente todos os computadores novos tem pelo menos duas portas USB. Existem *chips* que fazem a conversão entre USB e formas de comunicação comuns aos microcontroladores. Além disso a porta USB fornece energia para o circuito conectado à ela, coisa que o padrão RS-232 não faz, eliminando a necessidade de um cabo extra para alimentação do circuito da FE.

Outra vantagem da comunicação USB é que não existem parâmetros que necessitam ser configurados para estabelecer a comunicação. O padrão RS-232 necessita de configuração para taxa de transferência, paridade e número de bits para os tipos mais simples de comunicação [46]. Esses parâmetros tem que ser iguais nos dois dispositivos que estão se comunicando. Se os parâmetros no computador são diferentes do periférico o usuário tem que modificar um dos dois. Essa tarefa não é trivial, dificultando a utilização do equipamento para a maioria das pessoas.

Como a comunicação USB hoje é bastante popular e dada sua facilidade de utilização pelo usuário, ela foi a escolhida para fazer a ponte entre o microcontrolador e o computador.

O *chip* escolhido foi o FT245BM USB FIFO da FTDI. Esse *chip* suporta completamente o protocolo USB, e sua comunicação com o microcontrolador é feita de forma paralela utilizando-se 8 bits de dados e 4 de *handshake*. O fabricante já disponibiliza os *drivers* USB para serem instalados no computador.



### 3.3.6 Protótipo de desenvolvimento

Escolhidos os componentes principais da FE montamos um protótipo de desenvolvimento. Desenvolvemos o *firmware* da FE com base nesse protótipo. A partir do momento que garantimos que o *firmware* desse protótipo está funcionando completamente, podemos iniciar o projeto e confecção de uma PCB (*Printed Circuit Board*) para a FE. Uma foto desse primeiro protótipo é mostrada na Fig. 3.6.

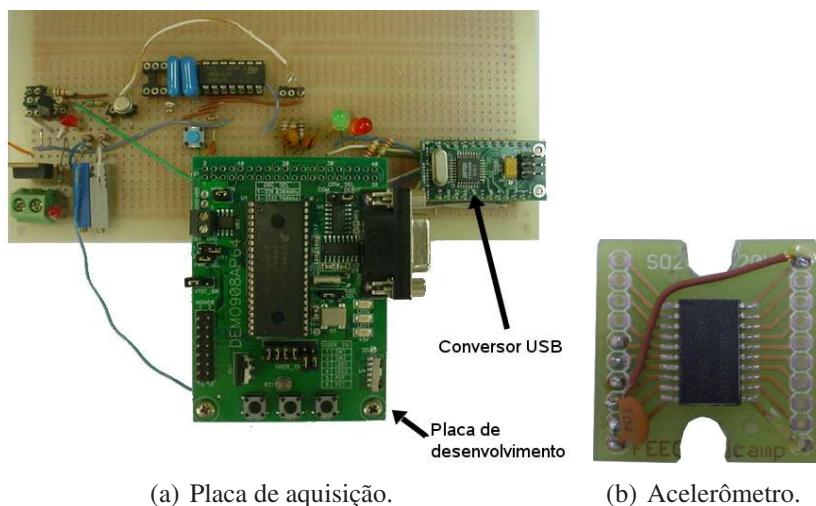


Fig. 3.6: Protótipo de desenvolvimento da FE.

A placa de aquisição (Fig. 3.6(a)) contém basicamente os seguintes componentes: um regulador de tensão saída 5 V; trimpots para testar o conversor A/D do microcontrolador; LED's e um botão para interface com o usuário; o sensor de temperatura; uma placa de desenvolvimento para gravação, teste e *debug* do *firmware* do microcontrolador; e a placa do conversor USB.

Esse protótipo de desenvolvimento também tem um filtro passa baixas para o sinal do acelerômetro. Utilizamos esse filtro durante a fase de testes do acelerômetro (para mais detalhes vide seção 5.1). Montamos o acelerômetro em uma placa separada, vista na Fig. 3.6(b), para ser testado pela estrutura descrita no capítulo 4. A placa do acelerômetro tem um conector na parte de baixo que permite sua conexão com a placa de aquisição.

Feitos os testes iniciais e o *firmware* já estruturado e funcionando nesse protótipo de desenvolvimento a próxima etapa foi o projeto da PCB do primeiro protótipo da FE.

### 3.3.7 Primeiro protótipo

Foram discutidos nas seções anteriores os detalhes de cada um dos componentes principais da FE. Nessa seção serão abordados os detalhes do circuito eletrônico do primeiro protótipo da FE. O

esquema elétrico desse protótipo é mostrado na Fig. 3.7. Todo o projeto da PCB da FE foi feito no editor de *layout* EAGLE [47].

Os conectores X1 são utilizados para gravar o microcontrolador no próprio circuito da FE. Essa técnica é mais conhecida como *in-circuit programming*.

O componente U1 é um regulador de tensão. Ele permite uma tensão de entrada de até 40 V e tem proteção contra tensão reversa na entrada. Sua tensão de saída é de 5 V. Este regulador é do tipo *low power*, pois sua corrente quiescente é bem pequena, podendo chegar a 15  $\mu\text{A}$  quando fornecendo uma corrente menor que 100 $\mu\text{A}$ .

O componente IC2 é o *chip* da interface paralelo/USB. Esse componente juntamente com o conector X2 e os componentes ligados a eles é responsável pela interface USB.

O componente IC1 é o microcontrolador.

O *jumper* JP1 é utilizado para selecionar o *clock* do microcontrolador. A FE trabalha com dois *clocks* distintos, o primeiro é utilizado para gravar e regravar o *firmware* do microcontrolador e o segundo é utilizado quando a FE está em operação normal de aquisição e transferência de dados.

Q1 é um cristal que oscila na frequência de 32,768 kHz. Escolhemos esse cristal pois é mais adequado para aplicações de baixo consumo de energia devido a sua frequência de oscilação não ser muito alta.

O botão S1 e os LED's LEDR e LEDG fazem a interface com o usuário quando a FE é utilizada em campo. Mais detalhes sobre o funcionamento dessa interface serão discutidos na seção 3.5.

O transistor T1 é utilizado como chave liga/desliga para os sensores. Enquanto a FE está fazendo aquisição, os sensores ficam ligados. Se a FE não está fazendo aquisição, os sensores são desligados para economizar energia.

Os componentes U3, U4 e U5 são os acelerômetros capacitivos. O componente U2 é o sensor de temperatura.

Note que o sensor de umidade não está representado nesse diagrama esquemático, pois nesse primeiro protótipo da FE não foi implementada a medida de umidade devido ao fato de que em alguns processos pós-colheita os produtos agrícolas passam por algum tipo de lavagem. Os sensores de umidade medem umidade relativa do ar e não podem ser imersos em água.

A partir do diagrama esquemático projetamos o *layout* da PCB. O principal objetivo do *layout* é acomodar todos os componentes dentro de uma figura geométrica com uma determinada área que possibilite sua montagem dentro de um encapsulamento que simule um fruto. Desta forma, optamos por uma PCB dupla face com formato circular. Como essa primeira PCB é um protótipo, o *layout* deve facilitar o *debug* do hardware. Por exemplo, se for necessário trocar um componente é melhor que ele seja do tipo *through hole* e não SMT, pois é mais fácil soldar/retirar o primeiro. Portanto essa primeira PCB não foi totalmente otimizada em tamanho quanto poderia. Também não deveria ser

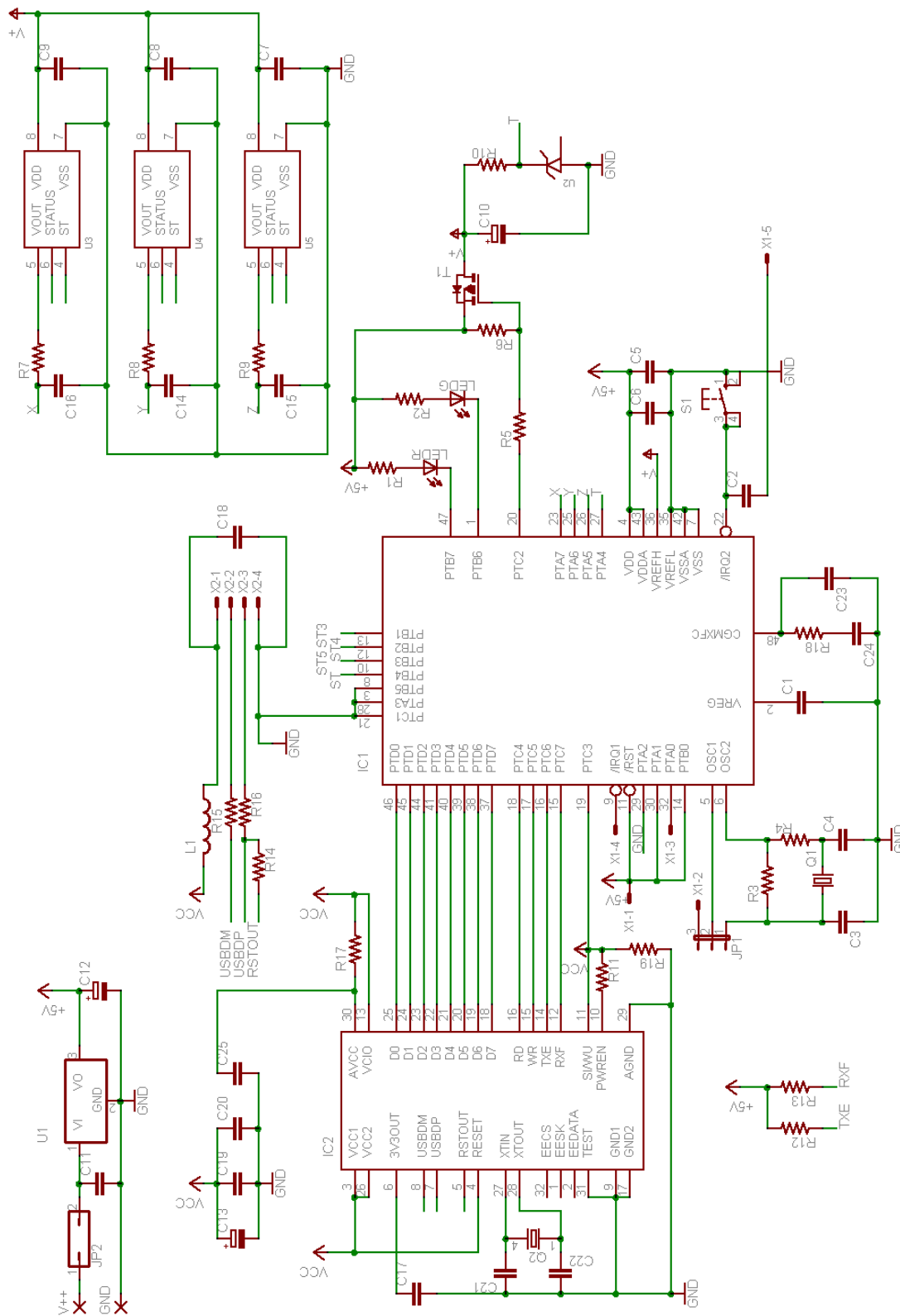


Fig. 3.7: Diagrama esquemático do primeiro protótipo.

muito grande pois isso dificultaria os testes em campo.

Buscando um equilíbrio entre tamanho e manuseio chegamos a uma placa com os CI's SMD e os componentes passivos tipo *through hole*. A Fig. 3.8 mostra o *layout* da PCB do primeiro protótipo da FE com 78 mm de diâmetro. Depois de testarmos o primeiro protótipo da FE, projetamos um segundo protótipo de tamanho reduzido. Os detalhes sobre esse segundo protótipo estão no apêndice A.

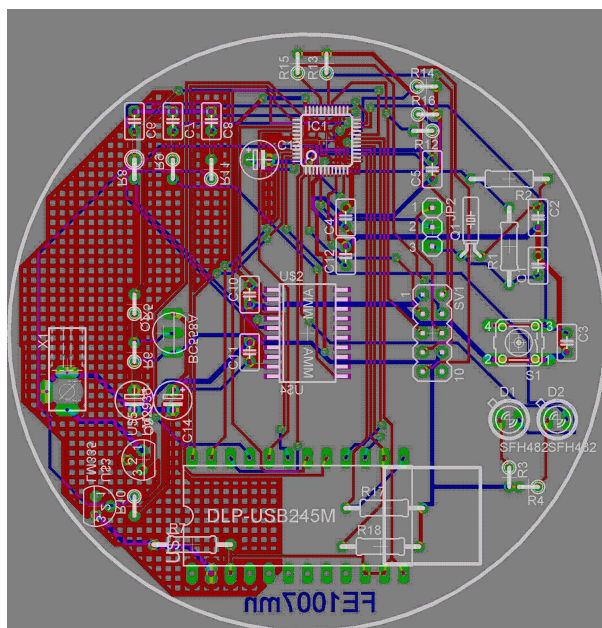


Fig. 3.8: *Layout* da PCB do primeiro protótipo da FE.

Outro aspecto importante do *layout* é o cuidado em separar as partes de potência, digital e analógica. Isso evita ruídos nos sinais analógicos.

A espessura das trilhas tem que ser compatível com a corrente que passa por cada uma. As trilhas de alimentação devem ser as mais largas possíveis, principalmente as do GND. Um plano terra é altamente indicado para reduzir ruído. Outro aspecto fundamental da alimentação é adicionar capacitores de desacoplamento nos CI's digitais. Isso porque quando há o chaveamento dos circuitos digitais internos, há um transiente na corrente. Se essa corrente depender somente da fonte de alimentação, por causa da resistência do caminho que essa corrente tem que percorrer, essa corrente gera um transiente na tensão. Isso pode contaminar outros sinais com ruído. O capacitor de desacoplamento serve para suprir essa corrente instantânea e deve ser colocado o mais próximo possível dos terminais de alimentação do CI para diminuir a resistência entre os capacitores e os terminais de alimentação.

Outro cuidado especial que deve ser tomado é com as trilhas dos sinais digitais, principalmente as de altas frequências. Elas não devem fazer ângulos de 90° para diminuir radiação/ruído. O cristal também deve estar o mais próximo possível do CI em que está ligado por esse mesmo motivo [48].

A Fig. 3.9 mostra duas fotos da PCB do primeiro protótipo da FE com os componentes montados.

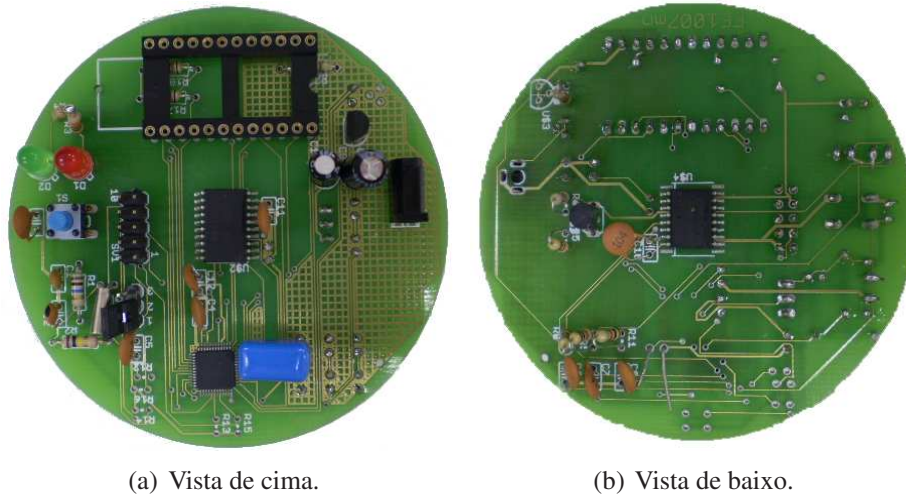


Fig. 3.9: Fotos da placa do primeiro protótipo da FE.

### 3.4 Projeto mecânico do encapsulamento externo

O encapsulamento externo diz respeito à casca esférica que contém a PCB da FE. Essa casca foi feita de duas partes que são rosqueadas uma na outra. Em uma primeira tentativa, realizamos este encapsulamento em duas peças, quase simétricas, usinadas em politetrafluoretileno (PTFE), mais conhecido como *teflon*®. Com a montagem da bateria, PCB e componentes neste encapsulamento verificamos dois problemas. O primeiro foi com relação ao desbalanceamento mecânico da FE e o segundo foi com relação ao peso final que foi de aproximadamente 1000 g. Esse desbalanceamento e peso excessivo prejudicariam a movimentação da FE dentro de uma linha de beneficiamento de frutas, por exemplo laranjas. Com o objetivo de melhorar o balanceamento e reduzir o peso realizamos um segundo encapsulamento.

Esse segundo encapsulamento tem a parte superior feita em *nylon* e a parte inferior em polipropileno. Como as duas partes têm tamanhos diferentes, foram usados materiais diferentes, com densidades diferentes, para tentar manter a esfera o mais balanceada possível. A rosca da parte da casca esférica feita em *nylon* desgastou com o uso. Então foi feita uma cinta em alumínio e essa cinta foi colada no lugar da rosca. A rosca então foi feita nessa cinta. A Fig. 3.10 mostra uma fotografia dessas duas partes da casca da FE.

Essa casca esférica possui 10 mm de espessura. Para conter a PCB da FE ela deve ter um diâmetro interno de 78 mm. Assim seu diâmetro externo é de 98 mm.

Internamente foi feito um suporte em alumínio que é parafusado à casca da FE. Esse suporte serve para fixar a bateria da FE pra que ela não fique solta, pois por causa da magnitude das acelerações que a FE pode estar sujeita (da ordem de centenas de  $g_n$ ), a bateria poderia danificar o circuito da FE. Por exemplo, uma bateria de 50 g sujeita à uma aceleração de 200  $g_n$  corresponde a uma força de



aproximadamente 100 N, o equivalente ao peso de uma massa de 10 kg!

A PCB da FE é presa entre as duas partes da casca esférica. O sensor de temperatura está exposto ao ambiente por um furo feito na parte superior da casca. O sensor entra justo nesse furo e é ligado à PCB através de um cabo duplo. O sensor foi colado no furo e o furo vedado com silicone. A FE deve ser hermeticamente fechada pois ela pode ser utilizada em processamentos de frutas e hortaliças que contenham algum líquido (água, cera, produtos químicos, etc.).

A Fig. 3.11 mostra o acomodamento da PCB dentro da casca. A bateria está na parte inferior da esfera, abaixo da PCB. A Fig. 3.12 mostra a FE fechada e o detalhe do sensor de temperatura.



Fig. 3.10: Detalhe das partes separadas.

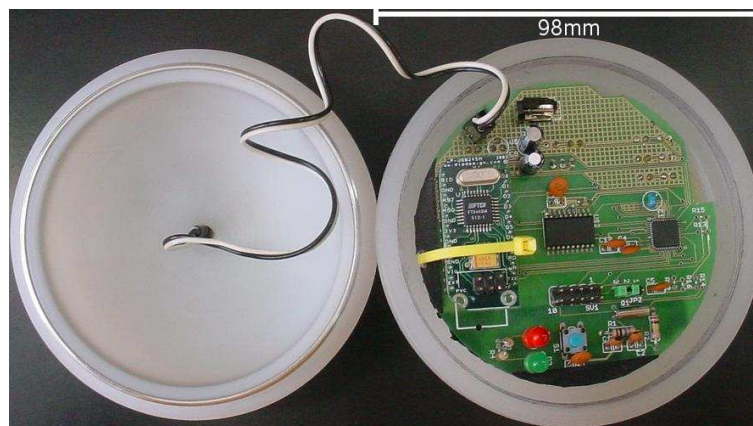


Fig. 3.11: Foto da FE aberta com a PCB exposta.

Depois de pronta, a FE apresentou uma massa total de 346 g. A Tab.3.2 mostra em detalhes a contribuição de cada parte da FE para sua massa total.

Esses valores foram medidos em uma balança de precisão BEL Engineering modelo MARK 4100.



Fig. 3.12: Foto da FE fechada.

Tab. 3.2: Massa de cada componente da FE.

| Parte menor da casca | Parte maior da casca | Bateria | Sensor temp. | PCB     | Total        |
|----------------------|----------------------|---------|--------------|---------|--------------|
| 124,26 g             | 138,64 g             | 49,32 g | 2,45 g       | 30,99 g | <b>346 g</b> |

### 3.5 Projeto do *firmware*

O *firmware* da FE foi projetado visando principalmente o baixo consumo de energia [49]. Para atingir esse objetivo o *firmware* deve ser o mais simples possível, por exemplo, fazendo o mínimo de processamento dos dados localmente.

A partir dessa necessidade definimos o funcionamento da FE. Com base no hardware da FE e na aplicação para a qual ela foi desenvolvida, as características do *firmware* devem ser:

- Aquisitar a variável aceleração com taxa de amostragem de 1 kHz;
- Aquisitar a variável temperatura com taxa de amostragem de 1 Hz;
- Armazenar o maior valor de aceleração a cada segundo;
- Desligar o maior número de componentes quando em estado de espera;
- Não fazer aquisição enquanto conectada ao computador.

Na sequência realizamos o fluxograma do *firmware* a partir do detalhamento do funcionamento das funções básicas da FE. Esse fluxograma é mostrado na Fig. 3.13.

O *firmware* foi escrito utilizando a linguagem C através da IDE CodeWarrior da Freescale. O ambiente CodeWarrior possui um compilador C bem otimizado para a família HC08 de microcontroladores. Isso significa que mesmo o *firmware* sendo escrito em C, não ocupa tanta memória depois

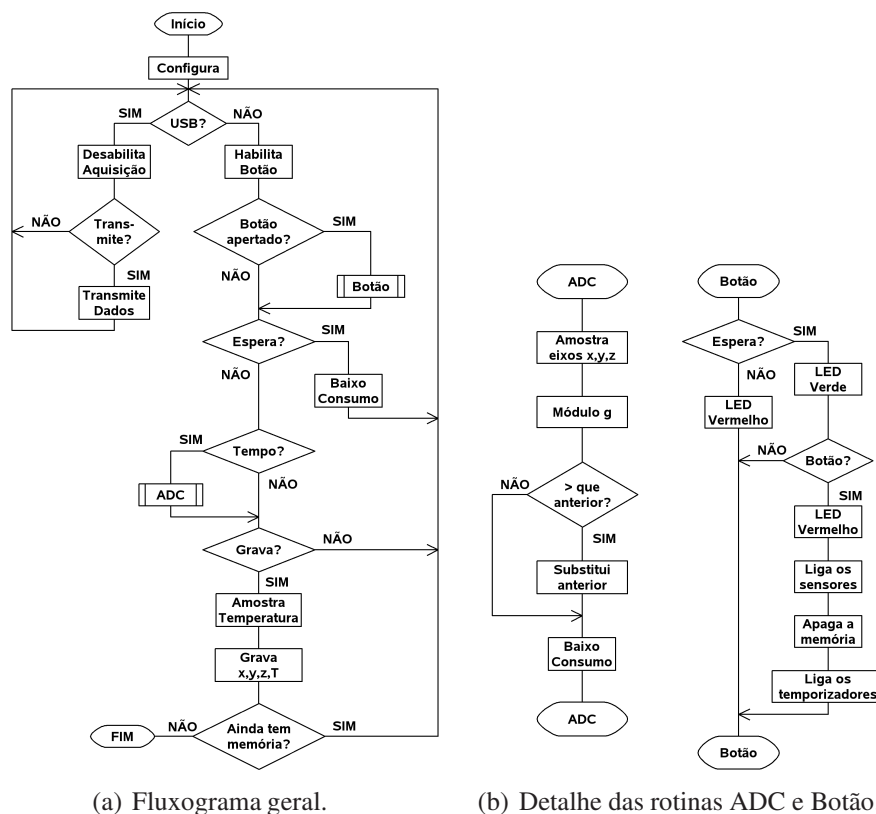


Fig. 3.13: Fluxograma do Firmware da FE.

de compilado e gerado o código de máquina<sup>d</sup>. Portanto não nos preocupamos em escrever o código em *assembly* buscando máxima otimização de código pois o ganho seria pequeno e o tempo de desenvolvimento seria maior.

O *firmware* funciona da seguinte forma. Inicialmente é feita a configuração do microcontrolador definindo, por exemplo, a fonte de *clock* e sua frequência; os valores iniciais das variáveis e *flags* do programa; o estado inicial dos pinos de saída; parâmetros dos módulos ADC (conversor A/D) e temporizador; e a área de memória onde serão salvos os dados medidos.

Na Fig. 3.13(a) nota-se que o *firmware* tem duas partes principais: a parte de comunicação USB e a parte de aquisição das grandezas aceleração e temperatura.

Se o cabo USB está conectado à FE então o microcontrolador fica no estado “comunicação”. Essa conexão é detectada através do pino 19 do microcontrolador. A parte de comunicação USB é bastante simplificada graças ao *chip* USB. Durante a comunicação, a FE basicamente desliga tudo o que não é usado para comunicação, inclusive desabilita o botão, e espera um comando do computador para transferir os dados gravados na memória do microcontrolador. Recebido esse comando o microcontrolador transfere os dados para o *chip* USB. Depois de transferidos todos os dados, o mi-

<sup>d</sup>Um *firmware* grande é ineficiente no quesito economia de energia



crocontrolador fica esperando um próximo comando para transferí-los novamente caso o computador solicite.

Quando o cabo USB não está conectado à FE, ela está no estado “aquisição”. Durante esse estado, a FE pode estar fazendo aquisição dos sinais dos sensores ou então em estado de espera. Quando a FE está esperando ela está no estado de baixo consumo de energia. Os sensores são desligados e o microcontrolador entra no estado de hibernação, só saindo desse estado quando o botão é pressionado. Nesse estado o consumo de corrente da FE é de 3,0 mA.

Quando o botão da PCB é pressionado o *firmware* entra na rotina “Botão”. Logo que o programa entra nessa rotina, o LED verde é acionado por um tempo. Se o botão for pressionado novamente enquanto o LED verde está acionado, o LED vermelho pisca avisando que o microcontrolador irá começar a aquisição dos sinais dos sensores. Então o microcontrolador liga os sensores, apaga a memória de dados e liga os temporizadores. Os temporizadores disparam as medidas do ADC a 1 kHz e a gravação dos dados a cada 1 segundo. A partir daí a FE já está medindo. Nesse estado o consumo de corrente da FE é de 25,1 mA.

Se o botão não é pressionado enquanto o LED verde estiver aceso, então o microcontrolador volta para o estado de baixo consumo de energia. Se o botão é pressionado enquanto o microcontrolador já está fazendo aquisição, então o LED vermelho pisca para indicar que o estado de aquisição continua.

As saídas dos acelerômetros são aquisitadas a cada 1 ms. São aquisitados os sinais referentes aos eixos x, y e z. Assim, quando esses valores de aceleração foram aquisitados, o microcontrolador precisa decidir se esses novos valores são maiores que os anteriores ou não, pois somente o maior valor a cada segundo é que será salvo na memória. Para poder decidir por esse valor maior de aceleração é necessário relacionar o valor binário aquisitado com o valor de tensão analógico de aceleração indicado pelo acelerômetro.

O acelerômetro indica um valor de 0 (zero)  $g_n$  no meio da escala da tensão de saída. Isso significa que para um conversor A/D de 10 bits isso corresponde a  $512_{10}$  ou  $200_{16}$  ou  $1000000000_2$ . Portanto o valor de aceleração medido está deslocado de 2,5 V da tensão de referência (GND). Qualquer valor de aceleração positiva ou negativa será representado em torno desse referencial.

Para decidir pelo maior valor desenvolvemos um algoritmo específico para prever o valor da norma do vetor aceleração a partir do valor binário aquisitado pelo conversor A/D. O fluxograma desse algoritmo está ilustrado na Fig.3.14.

Esse algoritmo faz uma previsão do valor da norma do vetor aceleração indicado pelo acelerômetro, detectando o afastamento do sinal em relação ao zero  $g_n$ . Então o microcontrolador pode comparar o valor de aceleração aquisitado anteriormente com o valor atual e descartar o menor dos dois. A Tab. 3.3 ilustra esse procedimento<sup>e</sup>.

<sup>e</sup>Essa tabela foi construída com base no acelerômetro MMA1200.



Fig. 3.14: Fluxograma do algoritmo “Módulo G”.

Tab. 3.3: Exemplo de funcionamento do algoritmo “Módulo G”.

| Aceleração<br>( $g_n$ ) | Saída do<br>sensor (V) | Valor ADC<br>decimal | Valor ADC<br>binário | Complemento<br>de 2 | Saída do<br>algoritmo |
|-------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1,46                    | 2,515                  | 515                  | 10 0000 0011         | —                   | 0 0000 0011           |
| 0,98                    | 2,510                  | 514                  | 10 0000 0010         | —                   | 0 0000 0010           |
| 0,49                    | 2,505                  | 513                  | 10 0000 0001         | —                   | 0 0000 0001           |
| 0                       | 2,500                  | 512                  | 10 0000 0000         | —                   | 0 0000 0000           |
| -0,49                   | 2,495                  | 511                  | 01 1111 1111         | 10 0000 0001        | 0 0000 0001           |
| -0,98                   | 2,490                  | 510                  | 01 1111 1110         | 10 0000 0010        | 0 0000 0010           |
| -1,46                   | 2,485                  | 509                  | 01 1111 1101         | 10 0000 0011        | 0 0000 0011           |

Note pela tabela a simetria das colunas “Aceleração” e “Saída do algoritmo” em torno do valor central da escala (512). Os valores acima de 512 são valores positivos de aceleração. Os valores abaixo de 512 são valores negativos de aceleração.

Depois que o maior valor de aceleração é armazenado na memória, o microcontrolador entra no estado de baixo consumo, no qual a CPU é desligada. Ele fica parado até que o temporizador o desperte e ele faça novas medidas dos sensores. Com esse esquema pode-se economizar energia gasta pelo microcontrolador.

A Fig.3.15 ilustra o tempo em que o microcontrolador está ativo e o tempo em que ele está esperando para fazer outra medida. O valor de corrente estimado para o microcontrolador funcionando com o ADC e os temporizadores ligados e um *clock* de 2 MHz é de 10 mA, e para o microcontrolador esperando é de 2,5 mA. O microcontrolador fica ativo 25 % do tempo e 75 % inativo. Isso porque com um *clock* de 2 MHz tem-se 2000 ciclos de máquina [50] em 1 ms que é o tempo que o microcontrolador espera para fazer outra medida. Como a parte do *firmware* responsável pela medição dos acelerômetros leva aproximadamente 500 ciclos de máquina para ser completada, nos outros 1500 ciclos o microcontrolador pode ficar esperando. Com esse esquema de economia de energia o microcontrolador consome uma corrente média de 4,4 mA. Isso resulta em uma economia de 56 % da

energia consumida pelo microcontrolador<sup>f</sup>.

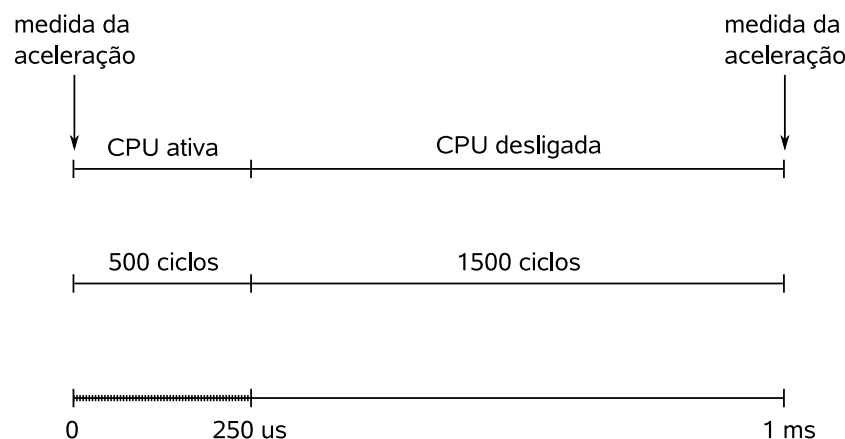


Fig. 3.15: Ciclo de medida dos valores de aceleração.

A cada 1 s o microcontrolador entra na rotina de gravação. Antes de gravar ele faz a aquisição da temperatura, então grava os quatro valores medidos na memória (x, y, z, e t). Depois de gravar, a rotina verifica se ainda há espaço na memória. Se sim o microcontrolador segue com as medidas, se não o microcontrolador desliga tudo na placa e entra no modo hibernação para economizar o máximo de energia. Ele só sai desse estado com um *reset*. Para isso é necessário desligar e ligar a energia da FE<sup>g</sup>. Nesse estado de hibernação a FE consome 1,7 mA.

Como o consumo de energia da FE é baixo e a bateria usada é de grande capacidade, o que limita a autonomia da FE é a sua memória. O microcontrolador possui uma memória de 64 kbytes. Desses, aproximadamente 7,5 kbytes são para armazenar o *firmware*. Restam então 56,5 kbytes para gravar os dados adquiridos. Como os dados são gravados a 64 bits/s (4 medidas de 16 bits<sup>h</sup> = 8 bytes), a memória tem capacidade para armazenar dados durante mais de 2 h de funcionamento contínuo da FE.

$$\frac{56,5 \text{ kbytes}}{8 \text{ bytes/s}} = \frac{57856}{8} \text{ s} = 7232 \text{ s} > 2 \text{ h}$$

### 3.6 Projeto do software

O projeto do software que é instalado no computador foi desenvolvido de forma que a utilização desse software seja intuitiva ao usuário. Esse software serve para transferir os dados da FE para o computador, mostrá-los em gráficos e, se necessário, salvar os dados no computador para uma análise

<sup>f</sup>Valores de corrente estimados a partir de [51].

<sup>g</sup>A FE possui um *jumper* que possibilita essa operação sem a necessidade de retirar a bateria.

<sup>h</sup>O ADC só mede 10 bits. Mas sendo o microcontrolador de 8 bits, ele só pode armazenar na memória palavras de 8 em 8 bits. Portanto uma medida de 10 bits necessita de no mínimo 16 bits para ser armazenada.

posterior. Um diagrama de estados desse software é mostrado na Fig. 3.16. Desenvolvemos esse software utilizando a linguagem de programação LabVIEW®.

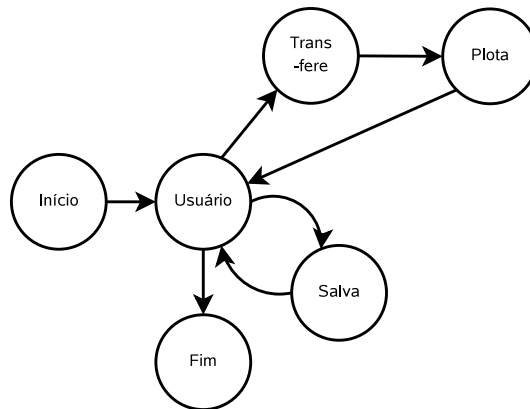


Fig. 3.16: Diagrama de estados do software.

Segue uma descrição sucinta dos estados do software.

**Início:** Configurações iniciais.

**Usuário:** Espera comandos do usuário.

**Transfere:** Descarrega os dados da FE.

**Plota:** Plota os dados nos gráficos.

**Salva:** Salva os dados no computador.

**Fim:** Fecha o programa.

Projetamos o software para que ele funcionasse como uma máquina de estados [52] (detalhes sobre as vantagens em utilizar-se essa abordagem podem ser vistos na seção 4.2.2). Para projetar o software utilizamos o método em espiral [53]. Esse método permite que as partes do software sejam desenvolvidas por etapas. A sequência das etapas de desenvolvimento do software foram as seguintes:

- Implementação da comunicação USB;
- Implementação do protocolo de comunicação;
- Formatação correta dos dados lidos a partir da FE;
- Cálculo da aceleração e temperatura;

- Plotagem dos dados e formatação dos gráficos;
- Formatação do arquivo a ser salvo no computador;
- Interface *plug-and-play*;
- Formatação final do Painel Frontal;
- Finalização do software.

Como primeiro passo implementamos a comunicação do computador com a FE. Essa comunicação se dá através da porta USB do computador. Utilizamos os *drivers* que o fabricante do *chip* USB disponibiliza. Para acontecer a comunicação é necessário iniciar o dispositivo, escrever no ou ler do dispositivo e fechar a comunicação.

Feito isso foi necessário criar um protocolo de comunicação simples entre a FE e o computador. Esse protocolo consiste em um comando que o computador envia à FE para que ela transmita os dados gravados em sua memória. Enquanto a FE não recebe esse comando ela continua em estado de espera.

Os dados são lidos pelo computador *byte a byte*. Como os dados do conversor A/D utilizam dois *bytes*, esses dados necessitam ser montados de forma que os dados das medidas sejam recuperados sem erros.

Garantindo que os dados lidos estão corretos implementamos a conversão dos valores binários para valores de aceleração em  $g_n$  e temperatura em  $^{\circ}C$ . A conversão de binário para aceleração em  $g_n$  é obtida pela equação 3.13.

$$a_i/g_n = \left( \frac{5}{1024} a_{ADC} - 2,5 \right) [s_{ac}/(V/g_n)]^{-1} \quad (3.13)$$

sendo que  $a_i$  é o valor da aceleração no eixo  $i$  (x, y ou z), 5 corresponde a tensão de alimentação (garantida pelo regulador de tensão),  $a_{ADC}$  é o valor do sinal de aceleração medido pelo ADC do microcontrolador convertido para decimal, 1024 a resolução do ADC, 2,5 o *offset* da saída do acelerômetro e  $s_{ac}$  o valor da sensibilidade do acelerômetro. No eixo z a sensibilidade da saída do acelerômetro é de 8 mV/ $g_n$  [54]. No eixo x é de 20 mV/ $g_n$  e no eixo y de 40 mV/ $g_n$  [55].

O cálculo da equação 3.13 é feito para cada eixo da aceleração. Depois de calculados os valores de cada eixo o valor da norma do vetor aceleração é calculado utilizando-se a equação 3.14.

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (3.14)$$

Para a conversão do valor de temperatura foi utilizada a equação 3.15 obtida pela caracterização do sensor de temperatura na faixa de temperatura de interesse. O processo de obtenção dessa equação

é discutido detalhadamente na seção 5.2.

$$t/^{\circ}\text{C} = \left( \frac{5}{1024} t_{\text{ADC}} \right) 100,26 - 275,85 \quad (3.15)$$

sendo que  $t$  é o valor da temperatura calculado e  $t_{\text{ADC}}$  o valor do sinal de temperatura medido pelo ADC do microcontrolador.

Convertidos os dados para as suas unidades mais usuais, esses dados são plotados em gráficos de fácil visualização pelo usuário. Foram definidos dois gráficos distintos. O primeiro mostra a magnitude da aceleração e a temperatura, o segundo mostra o valor da aceleração para cada eixo separadamente. Esses gráficos são mostrados na Fig. 3.17.

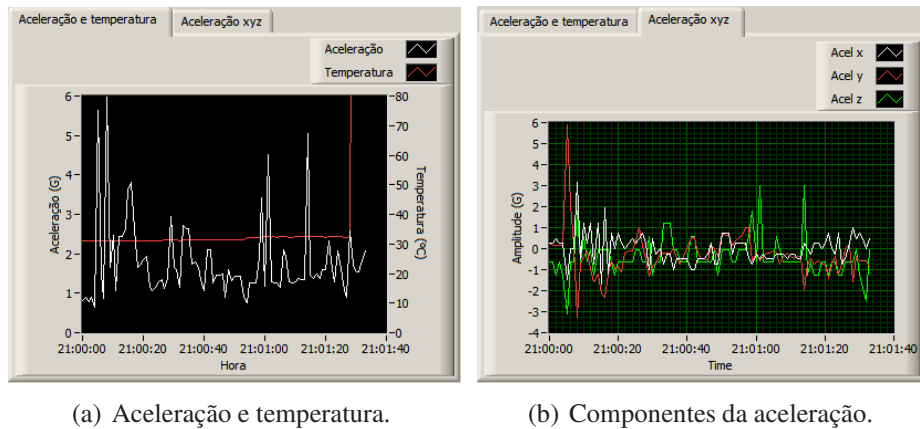


Fig. 3.17: Exemplo dos gráficos mostrados no software.

O arquivo com os dados é salvo em um formato texto puro (.txt) que pode ser lido pelos principais programas de análise de dados, como por exemplo Excel, Matlab, Origin, Octave, Gnuplot, etc. Esse arquivo contém um cabeçalho que reproduz as informações sobre as medidas que o usuário passou para o software como a data e a hora da medida e observações (onde o usuário pode anotar alguns dados extras sobre as medidas, como por exemplo, o local onde elas foram feitas, por quem foram feitas, etc.). Os dados são salvos em forma de tabela. As colunas são espaçadas por tabulações simples para facilitar a importação desse arquivo por outros programas. A Fig. 3.18 mostra um exemplo desse arquivo. A Fig. 3.19 mostra um exemplo do mesmo arquivo importado diretamente para o Excel.

Para facilitar o uso da FE com o computador desenvolvemos um sistema *plug-and-play* para a comunicação. Isso é feito por um algoritmo durante o estado “Usuário”. Esse algoritmo detecta se a FE está conectada ou não ao computador. Esse algoritmo procura pela FE, se achá-la inicia a conexão, senão continua procurando. A cada transferência dos dados a conexão é encerrada para que a FE possa ser desconectada do computador sem problemas. Esse procedimento faz com que a comunicação entre a FE e o computador seja totalmente transparente para o usuário.

```

23/10/2008 15:00:00
Ouro do Brasil. 1 linha morcota, duas quedas
hora x y z aceleração temperatura
21:00:02 -0,488281 -0,470703 -0,639648 1,449505 29,056543
21:00:03 -0,244141 -0,592773 -1,250000 1,364788 29,056543
21:00:04 0,000000 -1,203125 -1,250000 1,953125 29,056543
21:00:05 -1,464844 -0,348633 -1,250000 1,831055 29,056543
21:00:06 -0,244141 0,017578 -0,639648 0,984162 29,056543
21:00:07 0,244141 -0,104492 -1,250000 0,888685 29,056543
21:00:08 0,000000 -0,104492 -0,029297 1,490058 29,056543
21:00:09 -0,244141 -0,104492 -0,639648 1,078096 29,056543
21:00:10 0,488281 -0,104492 -0,639648 1,158061 29,056543
21:00:11 -1,220703 -0,226562 -1,250000 1,563263 29,056543
21:00:12 -0,732422 -0,592773 -0,639648 1,646819 29,056543
21:00:13 -0,488281 -0,836914 -1,860352 1,768967 29,056543
21:00:14 0,000000 -0,470703 -0,639648 1,364788 29,546094
21:00:15 -1,464844 -0,348633 -0,639648 1,930101 29,056543
21:00:16 0,000000 -0,470703 -0,639648 1,364788 29,056543

```

Fig. 3.18: Exemplo de arquivo .txt salvo pelo software.

|    | A                                                     | B         | C         | D         | E          | F           | G |
|----|-------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|---|
| 1  | 23/10/2008 15:00                                      |           |           |           |            |             |   |
| 2  | Ouro do Brasil. 1 passagem linha morcota, duas quedas |           |           |           |            |             |   |
| 3  | hora                                                  | x         | y         | z         | aceleração | temperatura |   |
| 4  | 15:00:02                                              | -0,488281 | -0,470703 | -0,639648 | 1,449505   | 29,056543   |   |
| 5  | 15:00:03                                              | -0,244141 | -0,592773 | -1,25     | 1,364788   | 29,056543   |   |
| 6  | 15:00:04                                              | 0         | -1,203125 | -1,25     | 1,953125   | 29,056543   |   |
| 7  | 15:00:05                                              | -1,464844 | -0,348633 | -1,25     | 1,831055   | 29,056543   |   |
| 8  | 15:00:06                                              | -0,244141 | 0,017578  | -0,639648 | 0,984162   | 29,056543   |   |
| 9  | 15:00:07                                              | 0,244141  | -0,104492 | -1,25     | 0,888685   | 29,056543   |   |
| 10 | 15:00:08                                              | 0         | -0,104492 | -0,029297 | 1,490058   | 29,056543   |   |
| 11 | 15:00:09                                              | -0,244141 | -0,104492 | -0,639648 | 1,078096   | 29,056543   |   |
| 12 | 15:00:10                                              | 0,488281  | -0,104492 | -0,639648 | 1,158061   | 29,056543   |   |
| 13 | 15:00:11                                              | -1,220703 | -0,226562 | -1,25     | 1,563263   | 29,056543   |   |
| 14 | 15:00:12                                              | -0,732422 | -0,592773 | -0,639648 | 1,646819   | 29,056543   |   |
| 15 | 15:00:13                                              | -0,488281 | -0,836914 | -1,860352 | 1,768967   | 29,056543   |   |
| 16 | 15:00:14                                              | 0         | -0,470703 | -0,639648 | 1,364788   | 29,056543   |   |
| 17 | 15:00:15                                              | -1,464844 | -0,348633 | -0,639648 | 1,930101   | 29,056543   |   |
| 18 | 15:00:16                                              | 0         | -0,470703 | -0,639648 | 1,364788   | 29,056543   |   |

Fig. 3.19: Exemplo de arquivo .xls salvo pelo software.

O Painel Frontal é a interface do LabVIEW com o usuário. Toda a programação é feita pelo programador no que se chama de Diagrama de Blocos. Esse Diagrama contém o código do software e só é visto pelo programador.

Concluindo o software, podemos compilar o código do Diagrama de Blocos e gerar um arquivo executável que poderá ser instalado em qualquer outro computador. Esse arquivo executável só permite ao usuário ver o Painel Frontal.

Uma das últimas tarefas de um programador em LabVIEW é formatar o Painel Frontal. Para que o software funcione como descrito anteriormente o Painel Frontal do software final ficou com a aparência mostrada na Fig 3.20.

O Painel apresenta os seguintes controles e mostradores:

**Botão Transferir** Clicando nesse botão o software requisita os dados da FE.

**Botão Sair** Encerra o software.

**Botão Gravar** Salva os dados no arquivo texto.

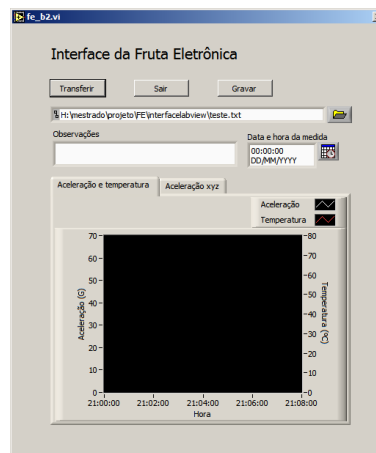


Fig. 3.20: Interface gráfica do software.

**Caminho** Indica o local e o nome do arquivo .txt onde serão salvos os dados.

**Observações** Campo para anotar as observações.

**Data e hora da medida** Para o usuário indicar a data e hora de início da medida que será descarregada.

**Gráficos** Existem duas abas para os gráficos. Cada uma para um tipo separado.

Por último foi implementada a rotina que finaliza a execução do software. Quando o botão Sair é selecionado, o software encerra todas as tarefas e fecha a janela correspondente.





# Capítulo 4

## Estruturas de testes

Neste capítulo apresentaremos dois aparatos de testes que utilizamos na caracterização e validação da Fruta Eletrônica (FE). O primeiro foi especialmente desenvolvido para este projeto e o segundo foi gentilmente disponibilizado pelo Laboratório UNIMAC da Feagri UNICAMP. O principal objetivo destes aparatos é permitir o teste da FE aproximando ao máximo das condições de temperatura, frequência e intensidade de impacto a que a fruta é normalmente submetida durante os processos pós-colheita. Os resultados destes testes realizados em laboratório contribuirão para o desenvolvimento, projeto e validação da FE.

O aparato de testes que desenvolvemos permite que acelerações uniaxiais bem controladas, de até  $7 g_n$ , sejam aplicadas à FE. Além da aceleração, podemos controlar a temperatura do ambiente de teste. Este aparato, totalmente automatizado, permite simular algumas das condições às quais a fruta é normalmente submetida durante o processo pós-colheita. O segundo aparato destina-se ao teste em queda livre da FE, possibilitando impor impactos com acelerações de maior magnitude através do ajuste da altura de queda [56].

### 4.1 Concepção do aparato de testes de vibração

O aparato de testes desenvolvido para este projeto é composto pelas seguintes partes:

- um *shaker*, utilizado para gerar vibrações bem controladas;
- um *driver* para comandar o *shaker*;
- instrumentos para medir os sinais dos sensores;
- uma câmara climática para controlar a temperatura do ambiente de teste;

- um computador com software dedicado para controlar todo o aparato.

Os instrumentos, a câmara climática e o computador são equipamentos comerciais. O *shaker* e o *driver* foram projetados e construídos devido à necessidade de se testar os acelerômetros da Fruta Eletrônica. O software de controle do aparato foi especialmente desenvolvido para essa aplicação. O esquema de ligação da estrutura de testes e dos sensores é mostrado na Fig. 4.1

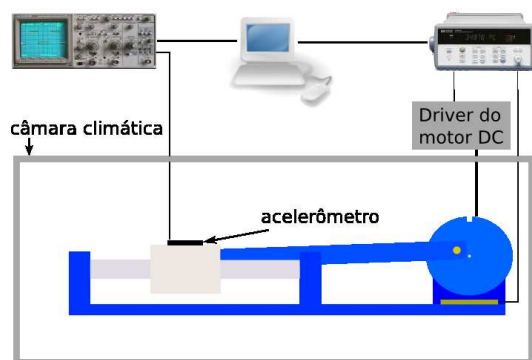


Fig. 4.1: Esquema de ligação da estrutura de testes para acelerômetros.

#### 4.1.1 Projeto do *shaker*

O *shaker* é formado por uma mesa de deslocamento linear, um motor elétrico, um volante, uma haste ligando o volante à mesa e um conta-giros para medir a velocidade de rotação do motor.

A estrutura do *shaker* foi feita toda em alumínio anodizado. Para a mesa linear foram utilizadas duas guias paralelas, cada uma com um rolamento linear e uma base fixada nesses rolamentos. A haste que liga o volante à mesa é presa nessa base. A estrutura do *shaker* e cada uma de suas partes são mostradas na Fig. 4.2.

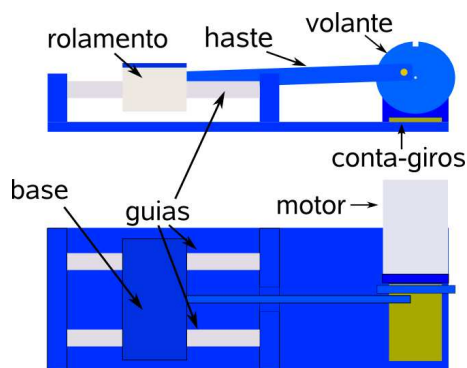


Fig. 4.2: *Shaker*.

O motor utilizado no *shaker* é um Graupner SPEED 600BB. É um motor DC de aeromodelo com tensão nominal de 7,2 V e corrente de 12 A em sua máxima eficiência. Pode chegar a 18800 rpm sem carga.

Esse *shaker* produz na mesa à qual o sistema sob teste está fixado um movimento bem controlado. Esse movimento é conhecido como “movimento harmônico simples” (MHS). Podemos conhecer a intensidade da aceleração, sua direção e sentido em qualquer instante de tempo. A aceleração pode ser calculada para cada instante de tempo  $t$  de acordo com as equações 4.1 e 4.2.

$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \phi) \quad (4.1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4.2)$$

sendo que  $a(t)$  é o valor da aceleração em cada instante de tempo  $t$ ,  $f$  é a frequência de rotação do motor,  $x_m$  é a amplitude do movimento harmônico simples realizado pela mesa de deslocamento linear,  $\omega$  é a frequência angular do movimento e  $\phi$  é chamada fase inicial ou ângulo de fase [57].

Nos testes com a FE, o valor da aceleração máxima em dada frequência de rotação do motor tem maior interesse que o valor da aceleração em cada instante de tempo. O valor da aceleração máxima é dado pela amplitude de aceleração  $a_m$ , que é o termo que multiplica o cosseno na equação 4.1, assim  $a_m = \omega^2 x_m$ . A partir desse resultado podemos substituir o valor de  $\omega$  pela equação 4.2, assim o valor máximo da aceleração em  $g_n$  pode ser relacionado diretamente com  $f$  dividindo  $a_m$  pelo valor padrão da aceleração da gravidade. A equação 4.3 mostra a relação entre  $a_m$  e  $f$ .

$$a_m = \frac{(2\pi f)^2 r}{9,80665} \quad (4.3)$$

sendo que  $r = x_m$ .

Nota-se na equação 4.3 que a amplitude máxima ou o módulo da aceleração máxima é função somente de  $r$  e  $f$ . A Fig. 4.3 mostra um gráfico de  $a_m$  em função de  $f$  parametrizado por  $r$ .

Como é de interesse testar os acelerômetros da FE com relação ao valor máximo de aceleração medido e sua resposta em frequência, optamos por utilizar o menor raio possível para fixar a haste ao volante. Assim pode-se atingir uma frequência maior sem danificar o acelerômetro. Havendo a necessidade de produzir uma aceleração grande com uma frequência baixa, basta aumentar o raio.

A Fig.4.4 mostra o *shaker* em funcionamento.

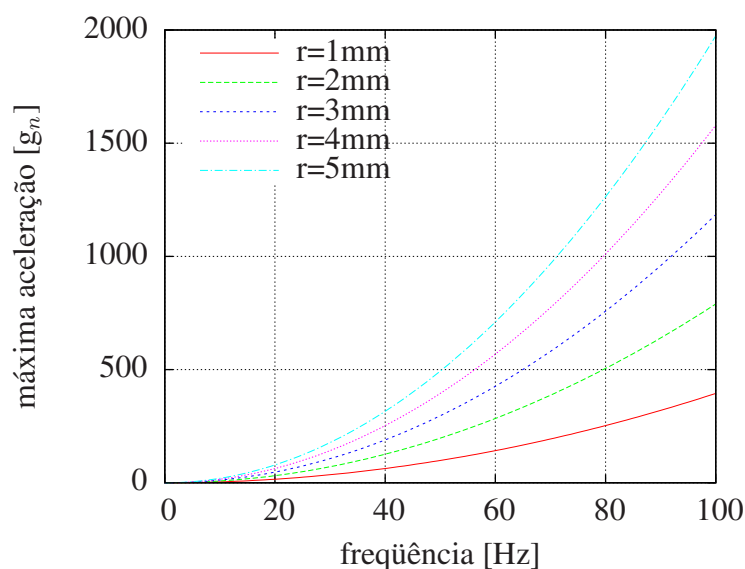


Fig. 4.3: Gráfico da amplitude da aceleração  $\times$  frequência parametrizado pelo raio.

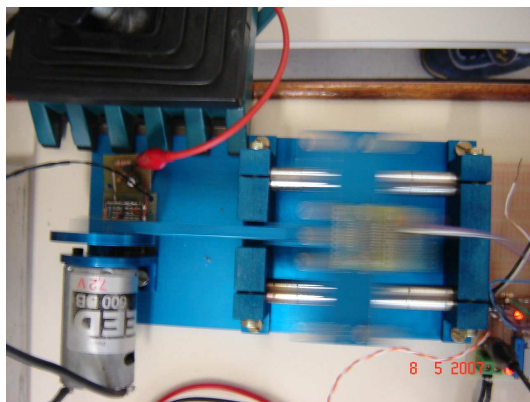


Fig. 4.4: *Shaker* em funcionamento.

### Conta-giros.

O conta-giros mede a velocidade de rotação, ou frequência de rotação, do motor. Essa frequência é a mesma frequência do MHS à qual o dispositivo sob teste está sujeito. Esse conta-giros é um circuito eletrônico composto basicamente por um emissor de infravermelho e um receptor que capta esse sinal. O emissor infravermelho é o diodo D1 e o receptor é o transistor Q1 (Fig.4.5). Esses componentes estão posicionados na base do suporte para o volante. O volante possui um rasgo pelo qual o infravermelho pode passar. À medida que o motor gira, esse rasgo passa entre os componentes ópticos. Quando o rasgo está alinhado com os componentes o transistor conduz corrente pois tem sua base iluminada pelo diodo. Quando o rasgo não está alinhado com os componentes o volante impede o transistor de receber o sinal emitido pelo diodo, então o transistor não conduz corrente.

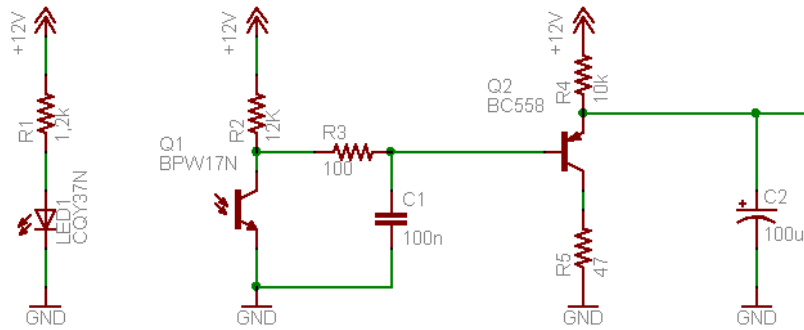


Fig. 4.5: Circuito conta-giros

O transistor nesse circuito é utilizado como uma chave. Quando ele não conduz o capacitor C1 é carregado. Essa corrente de carga do capacitor passa através dos resistores R2 e R3. Quando o transistor conduz, o capacitor é descarregado através do resistor R3 e do transistor. Dado esse comportamento podemos calcular o tempo de carga e descarga do capacitor através da equação 4.4 [58].

$$\tau = RC \quad (4.4)$$

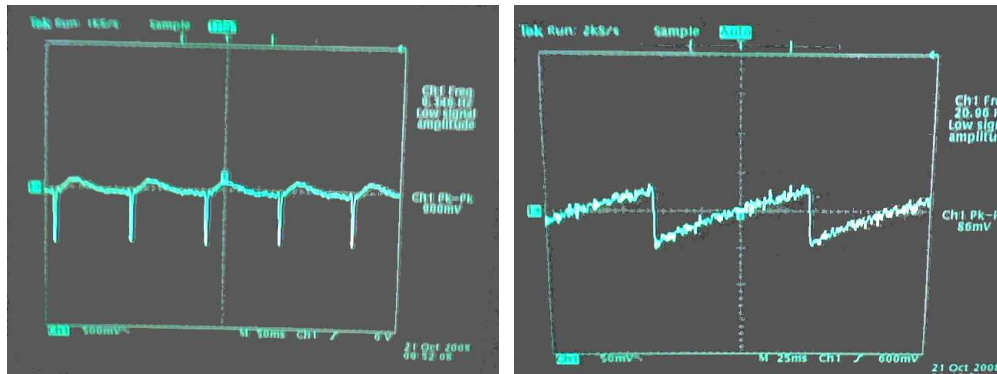
Considerando que o tempo de carga/descarga do capacitor é de aproximadamente  $5\tau$ , o capacitor C1 leva  $5 \times 12100 \times 1e^{-7} = 6,05$  ms para carregar e da mesma forma  $50 \mu s$  para descarregar. Esse comportamento é mostrado na Fig. 4.6(a). A medida da frequência desse sinal de tensão sobre C1 pelo freqüencímetro não é muito estável. Por isso decidimos implementar um segundo estágio nesse circuito conta-giros para que a forma de onda de saída fosse mais bem comportada, com transientes mais suaves, a fim de que a medida da frequência fosse mais estável. Desse modo o segundo estágio desse circuito — composto por Q2, R4, R5 e C2 — segue o mesmo princípio de funcionamento do primeiro estágio. O capacitor C2 é carregado e descarregado por resistências diferentes, mas a topologia do circuito é ligeiramente diferente. A forma de onda da saída desse circuito é mostrada na Fig. 4.6(b).

#### 4.1.2 Driver do motor

O *driver* que controla a rotação do motor foi desenvolvido especialmente para esse projeto. O *driver* para acionamento do motor é composto basicamente de um transistor em série com o motor. Um esquema elétrico completo do *driver* é apresentado na Fig. 4.7.

Montamos o *driver* utilizando os seguintes componentes:

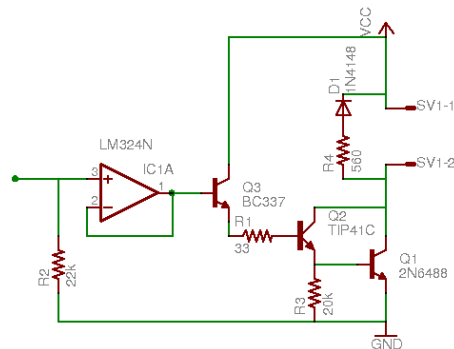
- uma fonte DC da LRI modelo S-145-12 [59];
- um *buffer*;



(a) Forma de onda da tensão sobre C1.

(b) Forma de onda da tensão sobre C2.

Fig. 4.6: Formas de onda do circuito conta-giros.

Fig. 4.7: Esquemático do *driver*.

- um transistor na configuração coletor comum;
- um par Darlington;
- circuitos de proteção.

O sinal de controle do motor é aplicado no terminal não inversor do *buffer*. O *buffer* isola o sinal de comando da parte de potência do *driver*. A saída do *buffer* aciona a base do transistor Q3, ligado como seguidor de emissor, que funciona como um amplificador de corrente para o estágio seguinte. O par de transistores Q1 e Q2 estão ligados numa topologia conhecida como Darlington que proporciona um ganho de corrente bastante alto [60].

O resistor R2 é necessário pois sem ele, na ausência de sinal na entrada, a saída do *buffer* poderia ter um valor qualquer dada a alta impedância de entrada do AmpOp. Então R2 garante que sem o sinal de controle a entrada será igual a zero, conseqüentemente a saída do *buffer* também será zero.

O resistor R1 é um resistor limitador de corrente. Ele protege os transistores, principalmente o transistor Q3, no caso de ausência da carga (motor). Pois na ausência da carga os transistores Q1 e

Q2 funcionam como diodos e se for aplicada uma tensão maior que aproximadamente 1,8V (tensão  $V_{BE}$  do par Darlington mais  $V_{BE}$  do seguidor de emissor) na entrada, a corrente através de Q3 poderia queimá-lo.

O circuito formado por D1 e R4 protege o motor. Se o transistor Q1 parar de conduzir repentinamente a corrente que flui pelo motor terá um caminho alternativo. O resistor irá atenuar essa corrente até a sua extinção. Isso é necessário pois, devido à característica indutiva do motor, a corrente tende a continuar fluindo se não for diminuída lentamente e isso poderia causar uma sobretensão no circuito.

A Fig 4.8 mostra fotos do *driver* montado.

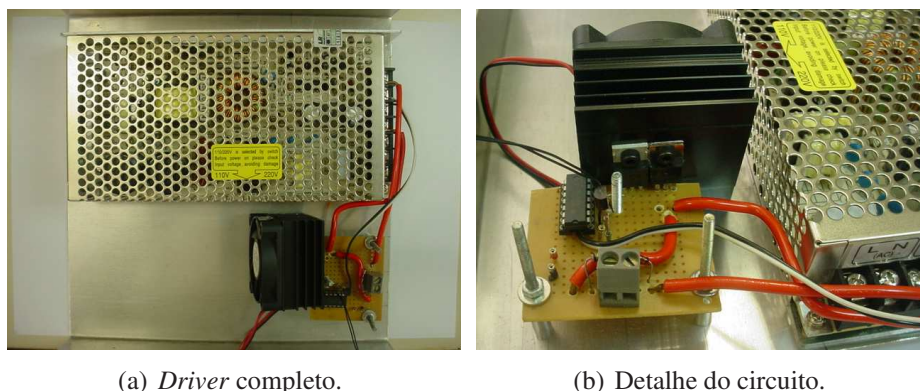


Fig. 4.8: Fotos do *driver* do motor.

### 4.1.3 Instrumentos

Utilizamos um multiplexador e um osciloscópio para controlar o *shaker* e fazer as aquisições dos sinais provenientes dos acelerômetros e do sensor de temperatura da FE.

O multiplexador Agilent 34970A foi utilizado com os cartões 34901A (multiplexador de 20 canais) e 34907A (módulo multifunção). O multiplexador tem um multímetro interno. O cartão 34901A permite que sejam ligados vários sinais à esse multímetro, um de cada vez. O multímetro é utilizado para medir a frequência de rotação do motor através do sinal de saída do conta-giros. Esse mesmo multímetro mede o sinal de temperatura proveniente do sensor de temperatura. O cartão 34907A, dentre as suas funções tem um conversor D/A que é utilizado para gerar o sinal de tensão que irá controlar a velocidade do motor através do *driver*.

O osciloscópio Tektronics TDS340 é utilizado para capturar a forma de onda de saída do acelerômetro.

Tanto o multiplexador quanto o osciloscópio comunicam-se com o computador através de um barramento GPIB<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Também conhecido como HPIB ou IEEE-488.



## 4.2 Controle da estrutura

Toda a interação com a estrutura de testes e o controle da aquisição de dados foram feitos através do software Labview® da National Instruments.

### 4.2.1 Variáveis de E/S

Para controlar a estrutura de testes é necessário conhecer a velocidade do motor. Para isso é medida a frequência de rotação do volante através do conta-giros que está ligado ao freqüencímetro do multiplexador. O sinal que controla a rotação do motor é um sinal de tensão DC aplicado à entrada do *driver*. Esse sinal de tensão é proporcional ao sinal aplicado na base do par Darlington.

Além desses sinais de controle o software deve prover uma maneira automática de se fazer leituras nos sensores sob teste e salvá-las em uma pasta no computador definida pelo usuário.

### 4.2.2 Projeto do software

Depois de definidos o hardware da estrutura e as variáveis de entrada e saída, iniciamos o projeto do software.

Estruturamos o software para que funcione como uma máquina de estados. Utilizamos essa abordagem por apresentar algumas vantagens em relação à outros métodos de estruturação de software. Uma vantagem apresentada por essa abordagem é que ela facilita a manutenção, a documentação e a ampliação do código do software. Outra vantagem é que ela permite ao software alterar o seu fluxo de execução, respondendo inteligentemente à entradas e resultados do sistema [53].

Pelo fato da execução do programa não ser necessariamente linear, existe a possibilidade do tratamento de eventuais erros que aconteçam durante sua execução.

O propósito das máquinas de estado é prover respostas definidas a todos os eventos que possam ocorrer. Este mecanismo de controle é facilmente implementado, é escalonável para eventos adicionais e sempre permite o mesmo mecanismo de resposta a eventos.

Para implementação da máquina de estados é necessária a definição dos estados, eventos e as ações a serem tomadas em resposta aos eventos. Assim, a definição do software para controle da estrutura de testes foi feita como mostrado na Fig. 4.9.

**Início:** Define valores iniciais para as variáveis e inicia a comunicação com os instrumentos.

**Config:** Configura os instrumentos de acordo com as medidas a serem feitas.

**Atua:** Mede a velocidade do motor e atua no *driver* de acordo com o comando do usuário.

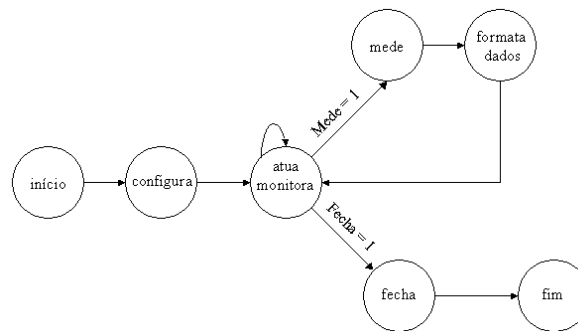


Fig. 4.9: Estados do software de controle.

**Mede:** Mede todas as grandezas envolvidas no teste.

**Formata:** Formata os dados de forma que facilite sua interpretação pelo usuário.

**Fecha:** Realiza os procedimentos para uma finalização segura do programa como, por exemplo, a parada do motor que atua na estrutura.

**Fim:** Encerra a comunicação com os instrumentos e pára o programa.

Projetamos o software utilizando o método espiral que consiste na implementação do software por etapas [53]. Essa abordagem facilita o *debug* de cada parte do software. A seqüência das etapas para implementação do software foi:

- Implementação da comunicação com os instrumentos;
- Definição da configuração dos instrumentos;
- Definição da interface com o usuário;
- Condicionamento dos sinais das variáveis medidas;
- Estruturação dos dados medidos;
- Parada do software.

Primeiramente implementamos a comunicação dos instrumentos com o computador. Para isso instalamos os *drivers* dos instrumentos fornecidos por seus respectivos fabricantes. Depois disso definimos a parte do software responsável pela configuração dos instrumentos de acordo com as características dos sinais a serem medidos.

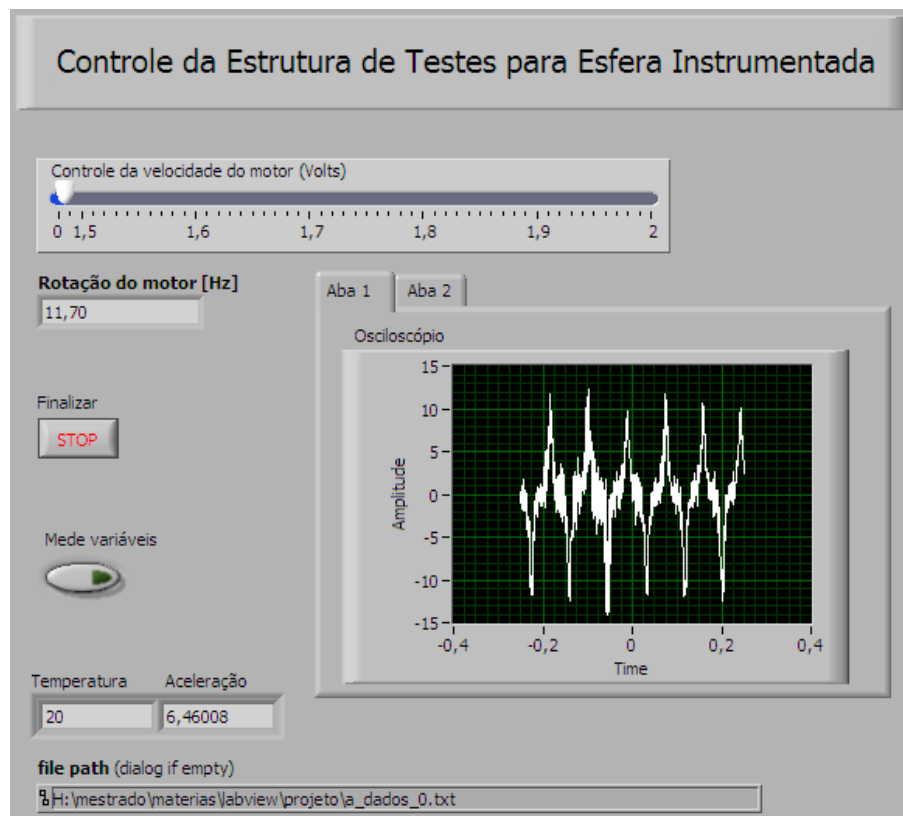


Fig. 4.10: Interface de controle para a estrutura de testes.

Em seguida definimos os componentes básicos da interface com o usuário. Essa interface é mostrada na Fig.4.10.

Selecionamos mostradores numéricos para os sinais DC e gráficos para os sinais AC, assim a interpretação dos dados pelo usuário é feita de uma forma mais amigável. Nessa etapa também adicionamos à interface os controles necessários para comandar a estrutura.

Listamos a seguir os controles e indicadores que compõem a interface da estrutura com o usuário:

**Controle da velocidade do motor:** Controle tipo *slider* que define a tensão de controle do motor. Essa tensão é aplicada na entrada do *driver* do motor.

**Rotação do motor:** Indica a frequência de rotação do motor em Hz.

**Finalizar:** Finaliza o programa.

**Mede variáveis:** Botão tipo booleano que permite ao usuário indicar o momento em que quer fazer a medida das variáveis.

**Temperatura:** Mostra a temperatura medida pelo sensor da FE.

**Aceleração:** Mostra o valor da aceleração máxima  $a_m$  à qual o sensor está sujeito. Esse valor é calculado utilizando-se a frequência de rotação do motor e a equação 4.3.

**Caminho do arquivo:** Mostra onde o arquivo com as medidas está sendo salvo. Também permite ao usuário modificá-lo.

**Abas 1 e 2:** Mostra num gráfico a saída do acelerômetro medida pelo osciloscópio e microcontrolador, respectivamente.

A próxima etapa foi a conversão dos dados medidos. Os sinais dos sensores são sinais elétricos medidos na forma de tensão. O software aquisita esses sinais e precisa convertê-los para suas unidades usuais. Utilizamos a equação 4.3 para calcular a aceleração máxima a partir da frequência, a equação 3.13 para calcular a aceleração medida a partir do microcontrolador e para o sinal do osciloscópio calculamos a aceleração utilizando:

$$a_i = (a_{osc} - 2,5)s_{ac}^{-1} \quad (4.5)$$

sendo que  $a_i$  é o valor da aceleração no eixo  $i$  (x, y ou z),  $a_{osc}$  é o valor do sinal de aceleração medido pelo osciloscópio, 2,5 o *offset* da saída do acelerômetro e  $s_{ac}$  o valor da sensibilidade do acelerômetro.

Para o cálculo da temperatura utilizamos a equação 3.15.

Os dados adquiridos precisam ser formatados para serem salvos no computador. É necessário organizar os dados em forma de tabela. Para isso montamos matrizes com os valores medidos e seus respectivos valores de tempo. Como os dados da aceleração são adquiridos sem uma referência temporal, tivemos que montar vetores com esses valores de tempo a partir do valor da frequência de amostragem de cada instrumento. Dessa forma podemos formatar os dados para que sejam salvos em arquivos texto e estejam prontos para serem importados por programas de análise de dados. Um exemplo de arquivo salvo pelo software é mostrado na Fig. 4.11.

| %Temp.   | acel.    | t (osc). | a (osc).  | t (uC).  | a (uC).  |  |  |
|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|--|--|
| 2.785E+0 | 7.096E+0 | 5.000E-4 | -1.200E+1 | 3.200E-5 | 6.934E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 1.000E-3 | -1.344E+1 | 6.400E-5 | 7.227E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 1.500E-3 | -1.376E+1 | 9.600E-5 | 7.227E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 2.000E-3 | -1.184E+1 | 1.280E-4 | 6.836E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 2.500E-3 | -1.264E+1 | 1.600E-4 | 6.348E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 3.000E-3 | -1.104E+1 | 1.920E-4 | 5.664E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 3.500E-3 | -1.024E+1 | 2.240E-4 | 5.371E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 4.000E-3 | -8.800E+0 | 2.560E-4 | 5.566E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 4.500E-3 | -3.040E+0 | 2.880E-4 | 6.152E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 5.000E-3 | -5.920E+0 | 3.200E-4 | 7.031E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 5.500E-3 | -4.960E+0 | 3.520E-4 | 8.203E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 6.000E-3 | -4.160E+0 | 3.840E-4 | 9.375E+0 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 6.500E-3 | -3.040E+0 | 4.160E-4 | 1.084E+1 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 7.000E-3 | -3.840E+0 | 4.480E-4 | 1.230E+1 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 7.500E-3 | -5.600E+0 | 4.800E-4 | 1.367E+1 |  |  |
| 0.000E+0 | 0.000E+0 | 8.000E-3 | -3.200E+0 | 5.120E-4 | 1.445E+1 |  |  |

Fig. 4.11: Exemplo de arquivo salvo.

Finalmente implementamos uma maneira segura de parada para a estrutura de testes. Quando o usuário aciona o botão Finalizar, o software entra em uma rotina que diminui a tensão de controle do motor lentamente. Esse procedimento foi adotado para que o transistor Q1 do *driver* não pare de conduzir repentinamente (vide seção 4.1.2).

### 4.3 Aparato para testes em queda livre

Para realizar os testes de impacto utilizamos um aparato de testes que é capaz de submeter a FE à queda livre. A seguir descreveremos sucintamente as partes que compõem esse aparato e seu funcionamento.

Esse tipo de teste é importante pois permite que a FE esteja sujeita à uma aceleração perfeitamente constante, a aceleração da gravidade local. Mas para que os resultados sejam repetitivos, a FE deve ser abandonada (velocidade inicial igual a zero) sempre de uma mesma altura. Além disso é importante que não haja movimento de rotação durante a queda.

O aparato descrito a seguir permite submeter a FE e alguns tipos de frutos à essas condições de teste.

#### 4.3.1 Princípio de funcionamento

O fenômeno de queda livre é resultado do abandono de um corpo a partir de uma determinada altura. Assim esse corpo está sujeito apenas a atuação da aceleração da gravidade, que é constante e igual para qualquer corpo à uma mesma distância do centro de gravidade da Terra [61]. Conhecendo-se a aceleração da gravidade local  $g$  e a altura  $h$  a que o corpo foi abandonado é possível calcular a velocidade  $v$  do corpo antes de atingir o solo bem como sua energia cinética  $E_c$ .

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4.6)$$

$$E_c = \frac{mv^2}{2} = mgh \quad (4.7)$$

Mantendo-se constante a altura de abandono do corpo e sendo a aceleração da gravidade constante, a velocidade e a energia cinética com que esse corpo atinge o solo devem ser sempre iguais para cada queda.

#### 4.3.2 Descrição do aparato

Os componentes do aparato de testes são [56]:

- Aspirador de pó portátil;
- Mangueira de plástico;
- Registro de esfera PVC;
- Suporte de lançamento;
- Ajuste regulador de altura;
- Bucal para segurar os frutos;
- Base.

O aspirador de pó juntamente com a mangueira e o registro são utilizados para gerar vácuo no bocal para segurar os frutos ou a FE. Esse bucal é composto por uma ventosa plástica com um furo no centro para a passagem do vácuo. O suporte de lançamento é preso à uma base feita em chapa de aço carbono de 3,25 mm de espessura. Nesse suporte é preso o ajuste de altura que nos permite ajustar a altura de queda da FE.

O registro controla o fluxo de ar pela mangueira. Assim, com o registro aberto o aspirador suga o ar através da ventosa, segurando a FE presa à ventosa. Quando o registro é fechado, devido à ausência do vácuo, a FE é abandonada. A Fig. 4.12 mostra uma foto desse aparato.



Fig. 4.12: Foto do aparato de testes para queda livre.

# Capítulo 5

## Resultados experimentais

Neste capítulo apresentamos os resultados experimentais obtidos durante o desenvolvimento da Fruta Eletrônica (FE). Descrevemos os testes e caracterizações dos acelerômetros, do sensor de temperatura e por fim do sistema completo. O teste do sistema completo foi realizado primeiro no laboratório e em seguida em campo. Para o teste em campo utilizamos a linha de beneficiamento de laranjas Ouro do Brasil localizada no município de Engenheiro Coelho, SP.

### 5.1 Testes dos acelerômetros

Montamos o acelerômetro MMA3202 na estrutura de testes descrita no capítulo 4. Medimos a aceleração com frequências diferentes. A saída do acelerômetro foi monitorada pelo osciloscópio e adquirida pelo microcontrolador.

O sinal de aceleração teórico, conforme equação 4.1, apresenta um formato senoidal. O sinal de aceleração obtido experimentalmente através do *shaker* apresentou componentes de alta frequência inerentes à vibrações e ruídos introduzidos pelo *shaker*. Uma amostra de uma dessas medidas é mostrada na Fig. 5.1.

Montamos um filtro passa baixas ativo de 2ª ordem com frequência de corte de aproximadamente 150 Hz, mostrado na Fig. 5.2. Esse filtro se comporta como um filtro RC de 2ª ordem e é conhecido como filtro Sallen-e-Key [62].

Decidimos utilizar um filtro de 2ª ordem por ser um filtro de fácil implementação e por apresentar uma boa atenuação das componentes do ruído com frequências maiores que sua frequência de corte. Escolhemos essa frequência como sendo aproximadamente dez vezes maior que a frequência de rotação máxima atingida pelo *shaker*. Com essa frequência de corte o filtro não deve interferir no sinal mas atenuar somente o ruído [63].

Para montar esse filtro utilizamos um AmpOp LM324, dois resistores de 100 k $\Omega$  e dois capacitores



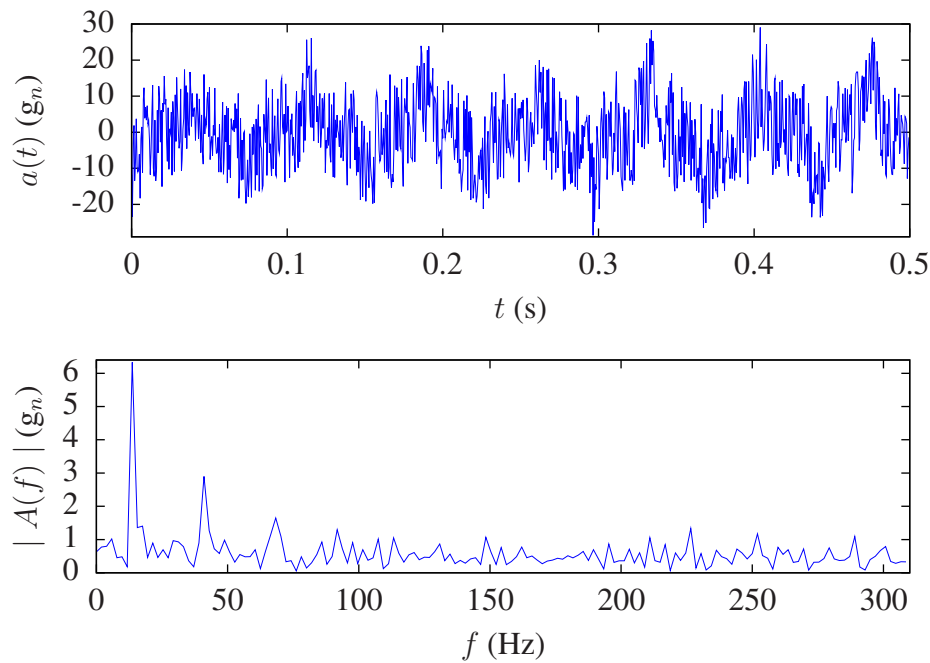


Fig. 5.1: Teste com o acelerômetro sem filtro.

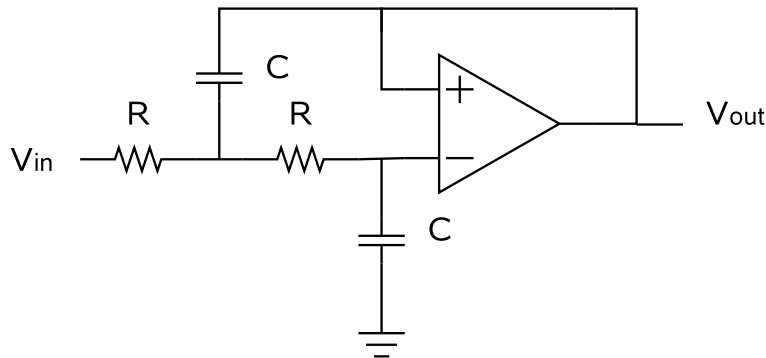


Fig. 5.2: Filtro passa-baixas de segunda ordem.

de 10 nF. Com esses valores, a função de transferência do filtro tem dois pólos em  $(2\pi RC)^{-1} \approx 160$  Hz.

Fizemos os testes do acelerômetro nas frequências de 12,5 Hz, 9 Hz, 5,5 Hz e 3,5 Hz. A Tab. 5.1 mostra um resumo dos resultados obtidos nesses testes e a Fig. 5.3 mostra os sinais de saída do acelerômetro filtrados, medidos pelo osciloscópio, tanto no domínio do tempo quanto da frequência, para cada frequência testada. A Fig 5.4 mostra os mesmos sinais medidos pelo microcontrolador.

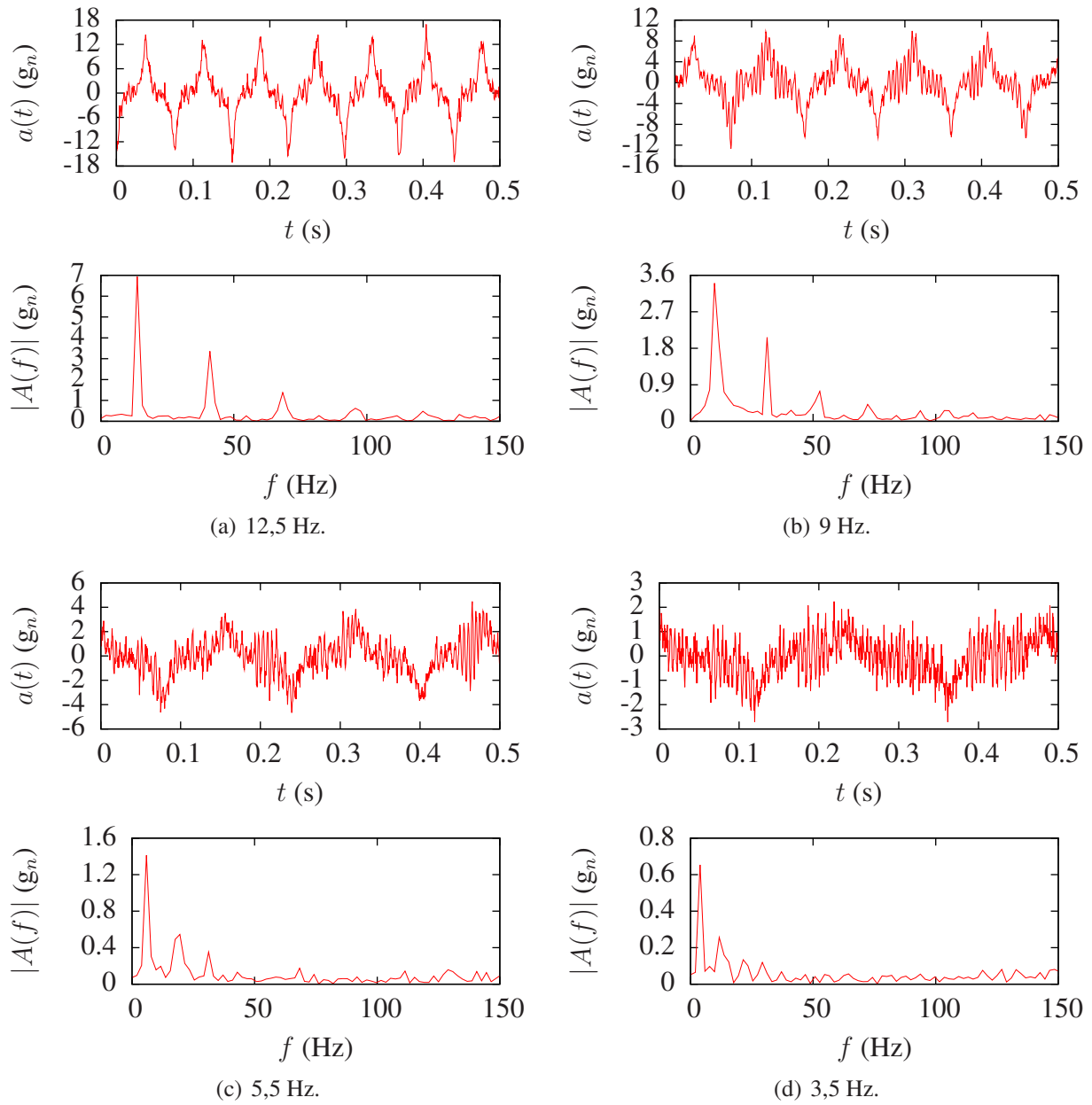


Fig. 5.3: Saída do acelerômetro medida pelo osciloscópio. a) 12,5 Hz. b) 9 Hz. c) 5,5 Hz. d) 3,5 Hz.

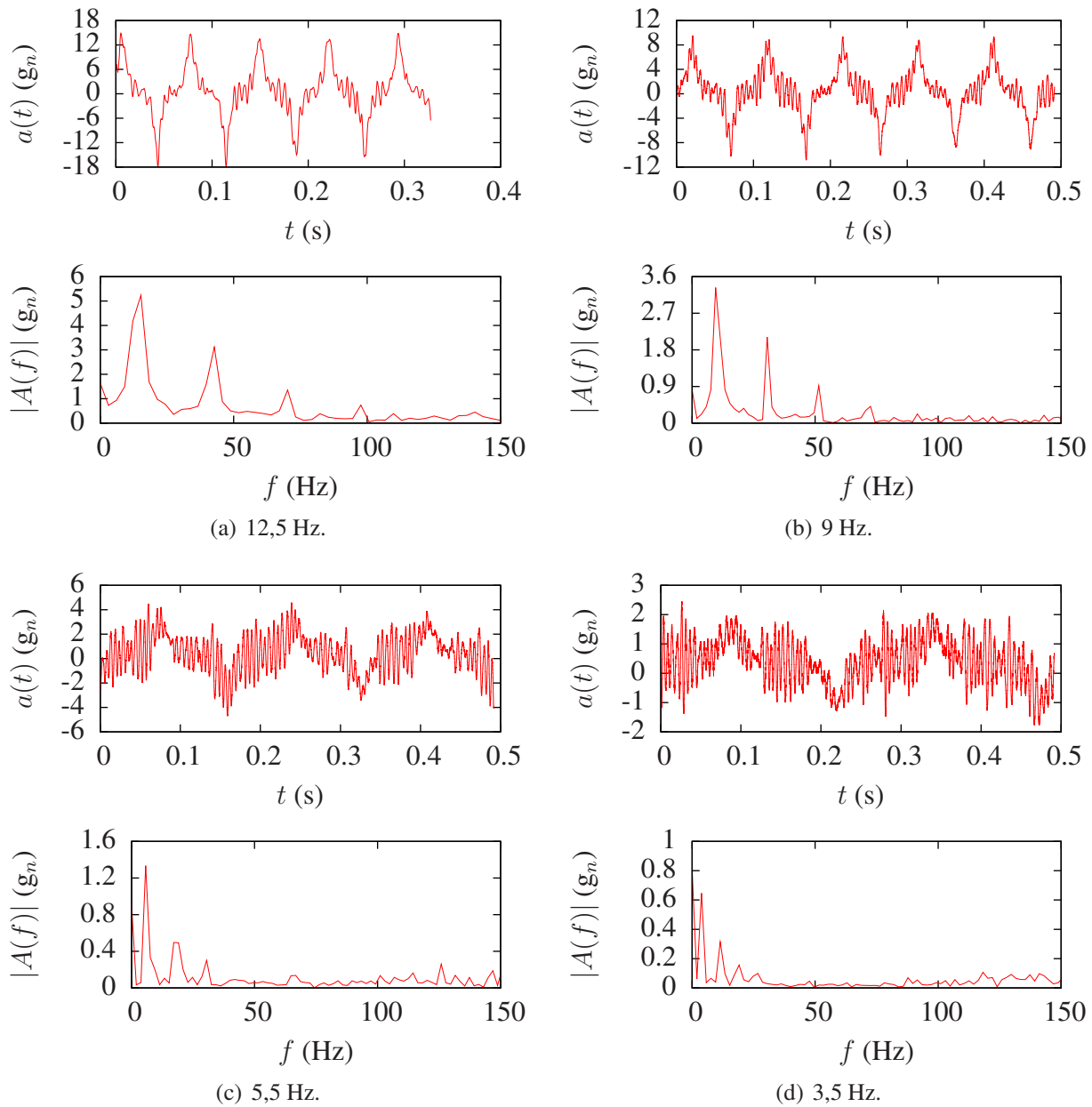


Fig. 5.4: Saída do acelerômetro medida pelo microcontrolador. a) 12,5 Hz. b) 9 Hz. c) 5,5 Hz. d) 3,5 Hz.

Tab. 5.1: Valores obtidos com o teste dos acelerômetros.

| Frequência (Hz) | Aceleração máxima ( $g_n$ ) |          |           | Erro relativo ( %) |
|-----------------|-----------------------------|----------|-----------|--------------------|
|                 | medida                      | software | calculada |                    |
| 12,5            | 6,9379                      | 7,096    | 7,5248    | -7,80              |
| 9               | 3,4036                      | 3,699    | 3,8392    | -11,35             |
| 5,5             | 1,4122                      | 1,335    | 1,3821    | 2,18               |
| 3,5             | 0,6540                      | —        | 0,6143    | 6,47               |

Obtivemos os valores da Tab. 5.1 a partir da aquisição dos sinais de saída do acelerômetro pelo osciloscópio e pelo microcontrolador. A seguir apresentamos uma descrição de como foram obtidos os valores de cada coluna da tabela:

**software:** Apresenta os valores de aceleração calculados pelo software de controle da estrutura de testes de acordo com a frequência de rotação do motor medida no momento do teste.

**medida:** Valor da aceleração na frequência fundamental, visto nos gráficos da aceleração no domínio da frequência.

**calculada:** Valor calculado utilizando a equação 4.3 e a frequência fundamental do sinal medido.

**Erro relativo:** Erro relativo calculado utilizando a equação:

$$\text{Erro relativo} = \frac{V_m - V_e}{V_e} \times 100 \quad (5.1)$$

sendo  $V_m$  o valor medido e  $V_e$  o valor esperado para a aceleração. Esses valores correspondem às colunas ‘medida’ e ‘calculada’, respectivamente.

Embora o sinal do acelerômetro tenha apresentado ruído devido a vibrações fora do nosso controle, podemos concluir que a medida da aceleração foi condizente com o esperado pois o erro relativo da medida de aceleração foi menor que 12 %. Também podemos concluir que a estrutura de testes funciona como o esperado pois o valor real da aceleração está próximo do valor calculado pelo software de controle da estrutura (colunas ‘medida’ e ‘software’ da Tab. 5.1).

## 5.2 Caracterização do sensor de temperatura

O sensor de temperatura utilizado no projeto da FE pode ser montado de diversas formas. Dentre as formas sugeridas no próprio manual do fabricante optamos por montar o sensor utilizando apenas um resistor de polarização. Escolhemos essa montagem (Fig. 5.5) principalmente por apresentar um número reduzido de componentes.



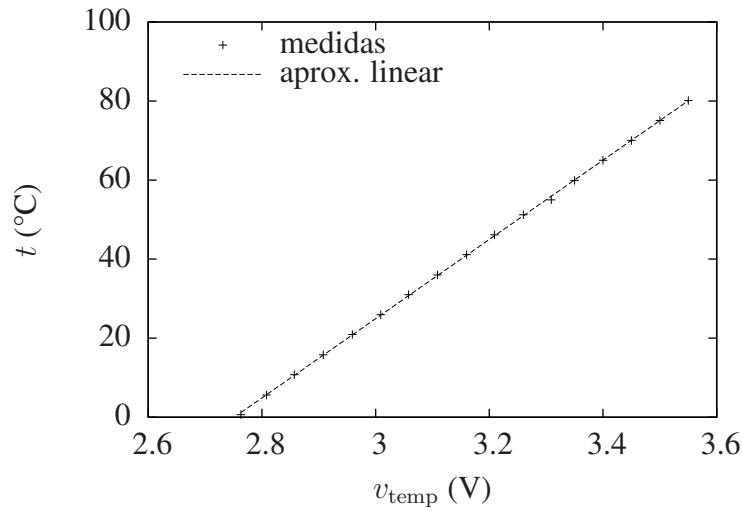


Fig. 5.7: Relação tensão×temperatura obtida após calibração.

A partir dos dados obtidos do teste podemos relacionar a temperatura  $t$  em °C com a saída do sensor  $V_{temp}$  em V através da equação 5.2.

$$t = 100,26V_{temp} - 275,85 \quad (5.2)$$

Obtivemos essa equação linear utilizando o método dos mínimos quadrados.

## 5.3 Testes da FE

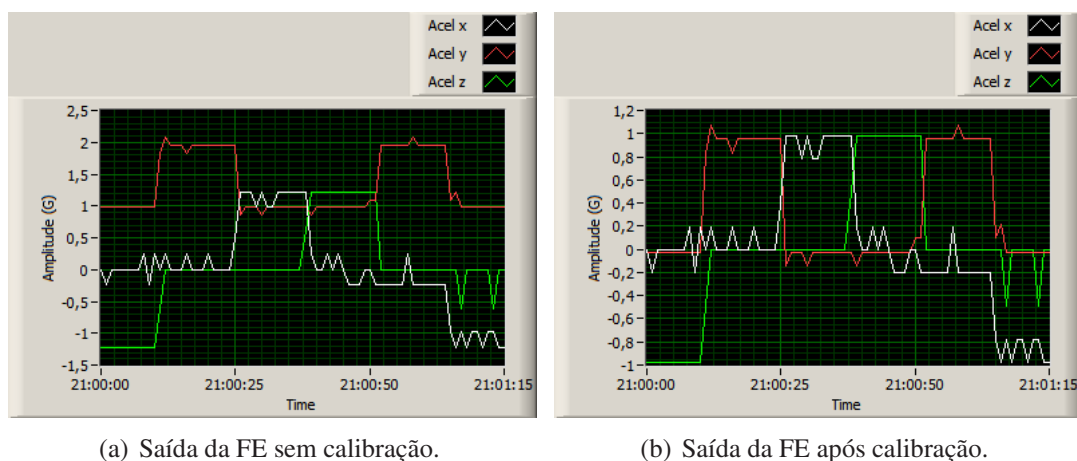
Depois de testarmos e caracterizarmos os sensores da FE, fizemos diversos testes com a FE em laboratório e em campo. Descrevemos cada um desses testes a seguir.

### 5.3.1 Teste de aceleração estática

Um teste bastante simples de se fazer porém muito importante é o teste de aceleração estática. Esse teste é feito com a finalidade de conhecer o *offset* dos acelerômetros. Conhecendo-se esses valores é possível corrigi-los através do software.

Outro motivo de fazermos esse teste foi para confirmar se é possível medir acelerações tão baixas quanto  $1 g_n$  com os acelerômetros da FE. Valores de aceleração nessa faixa de medida são importantes porque a aceleração da gravidade nos permite conhecer a posição espacial das frutas durante os processos pós-colheita (vide seção 3.3.1).

A Fig. 5.8(a) mostra um desses testes realizados com a FE.



(a) Saída da FE sem calibração.

(b) Saída da FE após calibração.

Fig. 5.8: Testes de *offset*.

Fizemos esse teste mantendo os eixos de medida de aceleração de cada acelerômetro alinhados com a aceleração da gravidade. Para isso devemos garantir que plano ortogonal a cada eixo de medida de aceleração esteja paralelo à uma superfície horizontal. Não há uma ordem específica para testar os eixos. Podemos, por exemplo, alinhar os eixos +z, +y, +x, -z, -y e -x. Depois de feitos esses testes devemos conferir se a FE mediu aproximadamente  $1 g_n$  para cada posição e se necessário corrigir o *offset* de cada eixo.

Notamos que o eixo y apresenta um *offset* de  $+1 g_n$ . Os eixos x e z não apresentaram *offset*.

Depois de detectados os *offsets*, podemos fazer a correção desses valores no software de interface com a FE. A Fig 5.8(b) mostra o mesmo teste mas com a correção do *offset* por software. Notamos que após essas correções os valores de aceleração estão mais condizentes com o valor real.

### 5.3.2 Teste em queda livre

Depois do teste de aceleração estática fizemos alguns testes em queda livre para conhecer o comportamento da FE em medidas de impacto.

Fizemos esses testes de queda utilizando um equipamento disponível no laboratório Unimac da Faculdade de Engenharia Agrícola — FEAGRI — da Unicamp. A seção 4.3 contém uma descrição detalhada desse equipamento.

A FE foi abandonada diversas vezes de uma altura fixa sobre uma espuma de espessura média de 27,5 mm para testar sua repetibilidade na medida de impacto. A Fig. 5.9 mostra a FE em queda livre e a Fig. 5.10 mostra o resultado desses testes para duas alturas diferentes.

Fizemos uma análise estatística desses dados. A Tab. 5.2 apresenta o resultado dessa análise. O apêndice B mostra detalhadamente os cálculos feitos para chegarmos a esses valores.

Considerando que a resolução do conversor A/D do microcontrolador é de 4,9 mV e que a maior



Fig. 5.9: Teste de queda livre realizado com a FE.

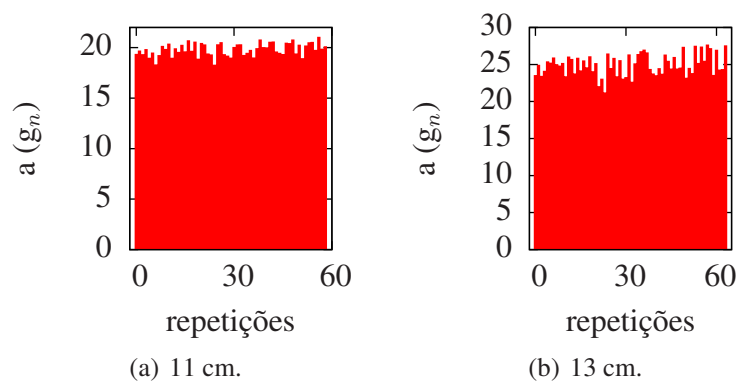


Fig. 5.10: Testes de queda livre.

Tab. 5.2: Análise estatística dos dados de queda livre.

| Altura<br>(cm) | n  | Máximo | Mínimo | Média  | Desvio<br>padrão<br>( $g_n$ ) | Erro<br>padrão<br>( $g_n$ ) | Variância | Intervalo de<br>confiança 95 % |
|----------------|----|--------|--------|--------|-------------------------------|-----------------------------|-----------|--------------------------------|
| 11             | 59 | 21,077 | 18,321 | 19,851 | 0,628                         | 0,0817                      | 0,394     | 19,688 – 20,015                |
| 13             | 64 | 27,698 | 21,225 | 25,001 | 1,452                         | 0,181                       | 2,108     | 24,638 – 25,364                |

sensibilidade dentre os acelerômetros da FE é para o eixo x, sendo de  $40 \text{ mV}/g_n$ , obtemos que a resolução para a medida de aceleração pela FE é de aproximadamente  $4,9/40 = 0,12 \text{ } g_n$ . Comparando esse valor com o erro padrão da Tab. 5.2 notamos que o erro padrão do teste de queda para 11 cm é menor que a resolução da FE. Isso quer dizer que podemos considerar o valor da média como sendo o valor verdadeiro da aceleração, e que a medida da aceleração pela FE é repetitiva. Para a altura de 13 cm, o erro padrão é 50 % maior que o menor valor de aceleração medido pela FE, isso quer dizer



que embora não possamos considerar o valor da média calculado como o verdadeiro, ainda assim o valor medido está próximo do valor real. O intervalo de confiança para a média também nos mostra uma boa precisão dos valores medidos pois ambos os intervalos têm uma variação menor que 3 % em relação à média.

Essa análise estatística feita comprova que a medida da aceleração é repetitiva. Contudo para estimar teoricamente o valor de aceleração que a FE deveria medir para cada altura é necessário um estudo mais extenso das características da casca da FE e da espuma utilizada nos testes [64].

### 5.3.3 Teste em beneficiadora comercial

Nesse teste utilizamos um equipamento do laboratório Unimac da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP. Esse equipamento é composto por escovas responsáveis pela limpeza e polimento dos frutos durante as etapas de beneficiamento. A Fig. 5.11 mostra uma foto desse equipamento. Uma descrição mais detalhada desse equipamento encontra-se em [65].

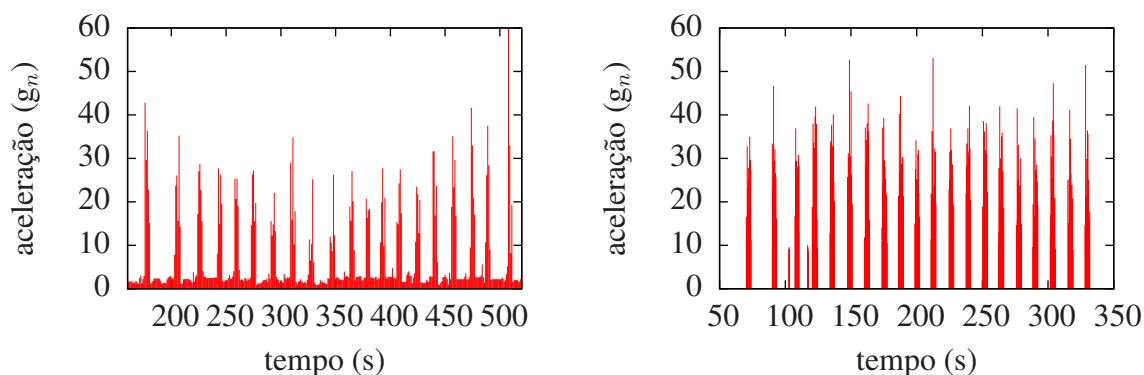


Fig. 5.11: Beneficiadora utilizada nos testes.

Os testes foram feitos com a FE e a esfera comercial IRD, apresentada no capítulo 2, passando juntas pelo equipamento e caindo em uma caixa plástica (52x32x28) cm utilizada comercialmente no transporte do tomate de mesa, coberta com espuma 8 mm. A altura de queda foi de 26 cm. Foram feitas 20 repetições para o teste. A Fig. 5.12(a) mostra os valores de aceleração medidos para a FE, e a Fig. 5.12(b) os valores para a IRD.

Para cada repetição, escolhemos o maior valor de aceleração medido. A partir desses dados calculamos os valores apresentados na Tab. 5.3. O último valor de impacto medido pela FE foi descartado pois fica claro que esse valor está fora da faixa de acelerações medidas para esse teste.

Comparando os resultados obtidos para estes testes com os resultados dos testes de queda, notamos que a dispersão dos dados desses testes em torno da média é muito maior do que para os testes



(a) Resultado da FE para o teste na beneficiadora.

(b) Resultado da IRD para o teste na beneficiadora.

Tab. 5.3: Análise dos dados para os testes na beneficiadora.

|               | FE    | IRD   |
|---------------|-------|-------|
| mínimo        | 20,75 | 34,2  |
| máximo        | 42,79 | 53,1  |
| média         | 29,88 | 42,37 |
| desvio padrão | 6,32  | 5,49  |
| erro padrão   | 2,88  | 1,23  |

de queda. A razão para isso é que as condições desse teste não são tão bem controladas como as condições dos testes de queda. Dependendo do ponto em que as esferas caem dentro da caixa, é perceptível, durante os testes, que os valores de impacto sofridos pelas esferas são bem diferentes.

Notamos também que os valores máximo, mínimo e médio de aceleração medidos por cada esfera são diferentes. Isso era esperado porque tanto o diâmetro como a massa das duas esferas são diferentes. Além disso o material que envolve as esferas também é diferente. A IRD que utilizamos durante os testes foi a IRD-400 com 70 mm de diâmetro e massa de 162 g, lembrando que o diâmetro da FE é de 98 mm e sua massa de 346 g.

Outro fator que devemos considerar é a forma como a energia cinética é absorvida durante o impacto de cada esfera. Isso é afetado pelo material de cada casca esférica e sua área de contato com a caixa plástica. Como a caixa plástica sofre deformação durante o impacto e o raio da FE é maior que da IRD, sua área de contato com a caixa plástica no momento do impacto é maior. Assim a energia cinética absorvida pela caixa plástica é maior para a FE que para a IRD.

Ainda assim esse teste é válido para compararmos os resultados das medidas das duas esferas. Notamos que os desvios padrão têm valores próximos. Isso também acontece com os valores dos erros padrão. Isso nos mostra que as medidas de aceleração/impacto medidos pela FE são condizentes com a esfera comercial IRD.

### 5.3.4 Testes em campo

Realizamos os testes em campo em uma linha de beneficiamento de laranjas do interior de São Paulo. Essa linha tem 65 m de comprimento e as etapas que compõem essa linha são basicamente: recebimento, pré-classificação, lavagem, secagem, enceramento, secagem da cera, classificação automática e classificação manual em banca classificadora [66].

Essa linha de beneficiamento tem ainda uma outra parte, anexa à primeira linha, para outros tipos de laranja. Nessa segunda parte o recebimento e a lavagem são feitos por equipamentos diferentes e ela não possui a pré-classificação. A partir da secagem a linha é a mesma. A Fig. 5.12 mostra um esquema dessas linhas de beneficiamento. Chamaremos a linha principal de linha 1 e a linha composta pela parte anexa de linha 2.

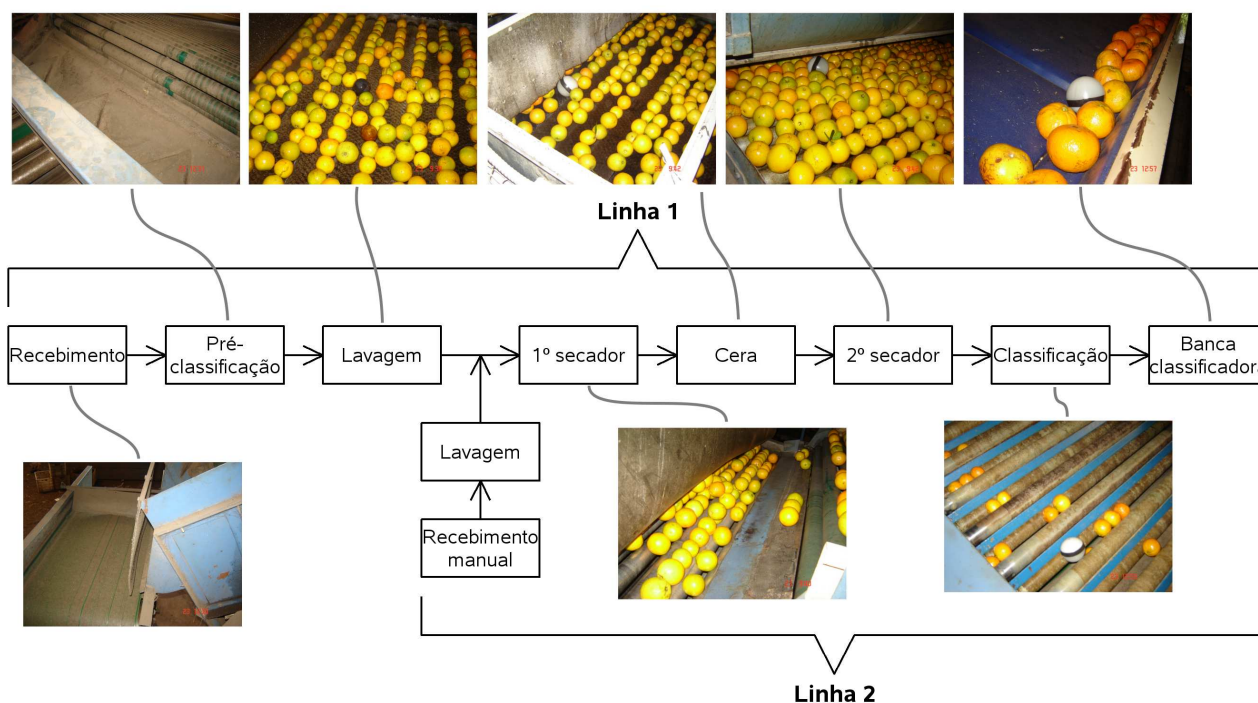


Fig. 5.12: Esquema das linhas de beneficiamento utilizadas nos testes.

Entre e durante as etapas de beneficiamento as frutas sofrem impactos principalmente nos pontos de transferência entre os equipamentos. Os pontos de transferência não são necessariamente na passagem entre uma etapa e outra. Por exemplo, entre a lavagem e o 1º secador da linha 1 existe uma esteira de roletes que transporta as frutas da saída da lavagem até a entrada do secador. Isso significa que existem dois pontos de impacto na passagem entre essas duas etapas.

Fizemos diversos testes em cada uma das linhas. Na linha 1 fizemos três testes a partir da lavagem. Depois fizemos um teste com a FE e dois testes com a IRD na linha 1 completa. Na linha 2 fizemos

três testes, mas a IRD não registrou os dados de dois deles pois estava com a memória cheia. A seguir mostramos os resultados de cada um desses testes.

As Fig. 5.13 e 5.14 mostram os gráficos dos testes feitos na linha 1 a partir da lavagem. Nos gráficos estão destacados os pontos de transferência. Esses pontos são indicados na Tab. 5.4. Essa tabela também apresenta os valores médios dos impactos medidos em cada ponto de transferência para cada esfera, e a média dos valores de temperatura medidos pela FE.

Tab. 5.4: Pontos de transferência para os testes na linha 1, a partir da lavagem.

| Impactos | Descrição                      | Aceleração ( $g_n$ ) |        | Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|----------|--------------------------------|----------------------|--------|------------------------------------|
|          |                                | IRD                  | FE     | FE                                 |
| I        | Entrada da lavagem             | 55,03                | 18,60  | 29,87                              |
| II       | Saída da lavagem               | 55,03                | 77,29  | 25,14                              |
| III      | Entrada 1 <sup>o</sup> secador | 113,37               | 147,86 | 25,96                              |
| IV       | Saída 1 <sup>o</sup> secador   | 65,63                | 32,47  | 30,69                              |
| V        | Entrada 2 <sup>o</sup> secador | 50,10                | 49,01  | 29,38                              |
| VI       | Saída 2 <sup>o</sup> secador   | 81,80                | 46,98  | 32,97                              |
| VII      | Entrada classificação          | 107,40               | 94,32  | 32,48                              |
| VIII     | Entrada esteira                | 87,60                | 39,57  | 32,16                              |
| IX       | Entrada 2 <sup>a</sup> esteira | 163,13               | 38,60  | 31,34                              |
| X        | Esteira — banca                | 33,87                | 93,27  | 31,34                              |
| XI       | Banca classificadora           | 22,30                | 25,21  | 31,18                              |

Nota-se nos gráficos da Fig. 5.13 que a medida da temperatura foi ficando menos sensível a cada passagem. Isso ocorreu pois foram feitas três passagens seguidas pela linha, e com a aplicação de camadas consecutivas de cera sobre a FE, a resistência térmica entre o sensor de temperatura e o ar aumentou. Com isso o tempo de resposta do sensor à variação da temperatura também aumentou, causando essa diferença entre as medidas de temperatura.

As Fig. 5.15 e 5.16 mostram os resultados para os testes na linha 1 completa e a Tab. 5.5 apresenta as médias dos valores medidos para a IRD. Os valores da tabela para a FE são os próprios valores medidos pois fizemos apenas um teste na linha completa.

O teste para a linha 1 completa foi feito somente uma vez para a FE pois, como mostrado na Fig. 5.15, a FE ficou muito tempo na etapa de lavagem (cerca de 10 min ou 600 s). Esse é praticamente o tempo decorrido para um teste completo. Isso ocorreu, pois dado o caráter aleatório do teste, a FE caiu em um ponto da linha onde a velocidade linear das laranjas era muito menor do que nos outros pontos. Assim enquanto fazíamos um teste com a FE, foi possível fazer dois testes com a IRD.

As Fig. 5.17 e 5.18 mostram os resultados para os testes na linha 2 e a Tab. 5.6 apresenta as médias dos valores medidos nos três testes feitos com a FE. Os valores da tabela para a IRD são os próprios valores medidos pois a IRD não registrou dois dos testes devido ao problema de memória

Tab. 5.5: Pontos de transferência para os testes na linha 1 completa.

| Impactos | Descrição                      | Aceleração ( $g_n$ ) |        | Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|----------|--------------------------------|----------------------|--------|------------------------------------|
|          |                                | IRD                  | FE     | FE                                 |
| I        | Recebimento                    | 78,20                | 42,45  | 29,06                              |
| II       | Esteira                        | 54,85                | 24,69  | 29,06                              |
| III      | Pré-classificação              | 128,00               | 106,64 | 29,06                              |
| IV       | Entrada da lavagem             | 135,10               | 118,92 | 29,06                              |
| V        | Saída da lavagem               | 75,25                | 33,70  | 22,69                              |
| VI       | Entrada 1 <sup>o</sup> secador | 86,95                | 60,13  | 22,69                              |
| VII      | Saída 1 <sup>o</sup> secador   | 42,25                | 104,55 | 28,57                              |
| VIII     | Entrada 2 <sup>o</sup> secador | 29,65                | 30,87  | 27,10                              |
| IX       | Saída 2 <sup>o</sup> secador   | 35,55                | 16,85  | 29,06                              |
| X        | Entrada classificação          | 78,25                | 92,75  | 29,06                              |
| XI       | Entrada esteira                | 74,40                | 40,62  | 28,57                              |
| XII      | Entrada 2 <sup>a</sup> esteira | 184,40               | 120,48 | 29,06                              |
| XIII     | Esteira — banca                | 73,90                | 55,62  | 29,06                              |
| XIV      | Banca classificadora           | 38,40                | 21,41  | 29,06                              |

cheia comentado anteriormente.

Tab. 5.6: Pontos de transferência para os testes na linha 2.

| Impactos | Descrição                      | Aceleração ( $g_n$ ) |        | Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|----------|--------------------------------|----------------------|--------|------------------------------------|
|          |                                | IRD                  | FE     | FE                                 |
| I        | Recebimento                    | 155,9                | 50,59  | 31,50                              |
| II       | Entrada da lavagem             | 28,2                 | 21,63  | 31,50                              |
| III      | Saída da lavagem               | 241,1                | 44,91  | 26,12                              |
| IV       | Passagem linha2-1              | 115,8                | 108,93 | 27,26                              |
| V        | Entrada 1 <sup>o</sup> secador | 84,1                 | 90,49  | 27,26                              |
| VI       | Saída 1 <sup>o</sup> secador   | 48,5                 | 136,50 | 33,46                              |
| VII      | Entrada 2 <sup>o</sup> secador | 134,1                | 62,37  | 31,99                              |
| VIII     | Saída 2 <sup>o</sup> secador   | 101,4                | 85,29  | 34,93                              |
| IX       | Entrada classificação          | 75,2                 | 83,32  | 34,77                              |
| X        | Entrada esteira                | 142,9                | 49,69  | 34,28                              |
| XI       | Entrada 2 <sup>a</sup> esteira | 35,8                 | 75,01  | 33,95                              |
| XII      | Esteira — banca                | 18,5                 | 65,62  | 33,79                              |
| XIII     | Banca classificadora           | —                    | 37,10  | 33,63                              |

Os valores de aceleração medidos pelas duas esferas durante a passagem pelas linhas juntamente com as laranjas não podem ser comparados diretamente pois as duas esferas estão sujeitas a condições muito diferentes. As fotos apresentadas no apêndice C mostram essas diferenças, principalmente as fotos das figuras C.2, C.5, C.6, C.8 e C.11. Ainda assim o teste é válido por comprovar que a FE pode medir todos os pontos de impacto que a esfera comercial mede. Além de tudo podemos comprovar a

vantagem da medida da temperatura durante os testes.

Comparando os gráficos das passagens pelas linhas de beneficiamento, notamos que a temperatura nos revela claramente os pontos por onde a FE passa em cada instante de tempo. Isso facilitou muito a análise dos dados das linhas aquisitados pela FE, pois analisando os gráficos da IRD, não fica claro quais são os impactos referentes aos pontos de transferência.

Também fizemos cinco testes de queda no início da linha 1 (entre o recebimento e a entrada da lavagem). Nesses testes as esferas passaram pelos equipamentos sozinhas, isto é, sem laranjas. As Fig. 5.19 e 5.20 e a Tab. 5.7 mostram os resultados desses testes. A IRD não gravou três desses testes devido ao problema de memória cheia.

Tab. 5.7: Pontos de impacto para os testes de queda.

| Queda | Descrição         | Aceleração ( $g_n$ ) |        |
|-------|-------------------|----------------------|--------|
|       |                   | IRD                  | FE     |
| I     | Elevador          | 62,40                | 79,97  |
| II    | Recebimento       | 134,10               | 142,61 |
| III   | Entrada           | 97,55                | 87,26  |
| IV    | Pré-classificação | 42,80                | 130,77 |
| V     | Lavagem           | 103,10               | 105,13 |

Como os testes de queda foram feitos sem as laranjas, as condições de impacto para as duas esferas são mais próximas. Notamos pela Tab. 5.7 que os valores de impacto para as duas esferas são próximos, com exceção dos valores na etapa de pré-classificação. Nesse caso os valores são diferentes pois as esferas têm tamanhos diferentes e na pré-classificação elas são conduzidas por caminhos diferentes e conseqüentemente sofrem impactos distintos.

O apêndice C contém várias fotos dos testes feitos em campo. Também estão disponíveis *on-line* alguns vídeos dos testes feitos. Esses vídeos podem ser acessados pelos endereços:

<http://www.youtube.com/watch?v=cyyTJaiaS28>

<http://www.youtube.com/watch?v=UARoyffdBwo>

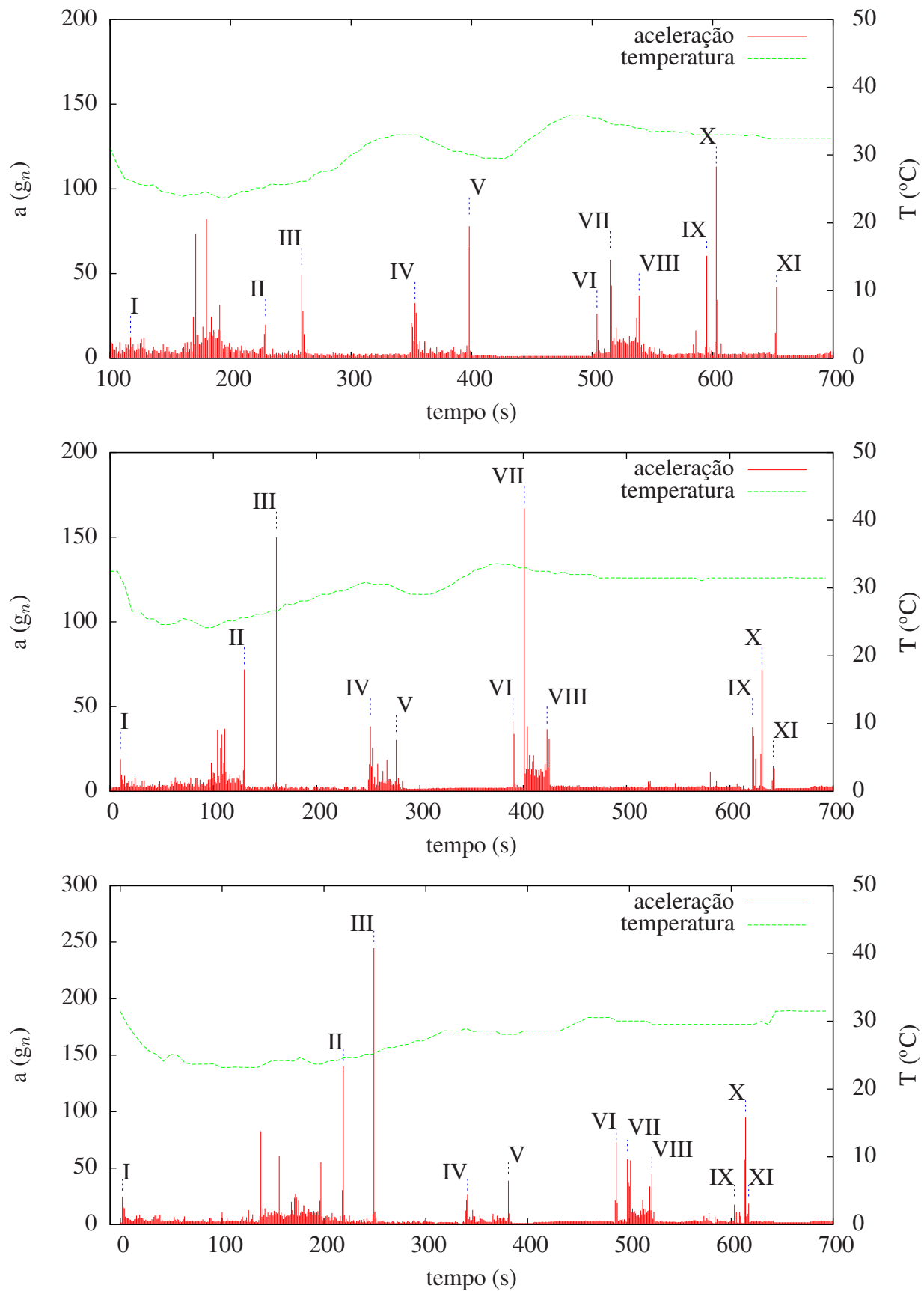


Fig. 5.13: Testes na linha 1 com a FE, a partir da lavagem. Pontos de impacto indicados na Tab 5.4.

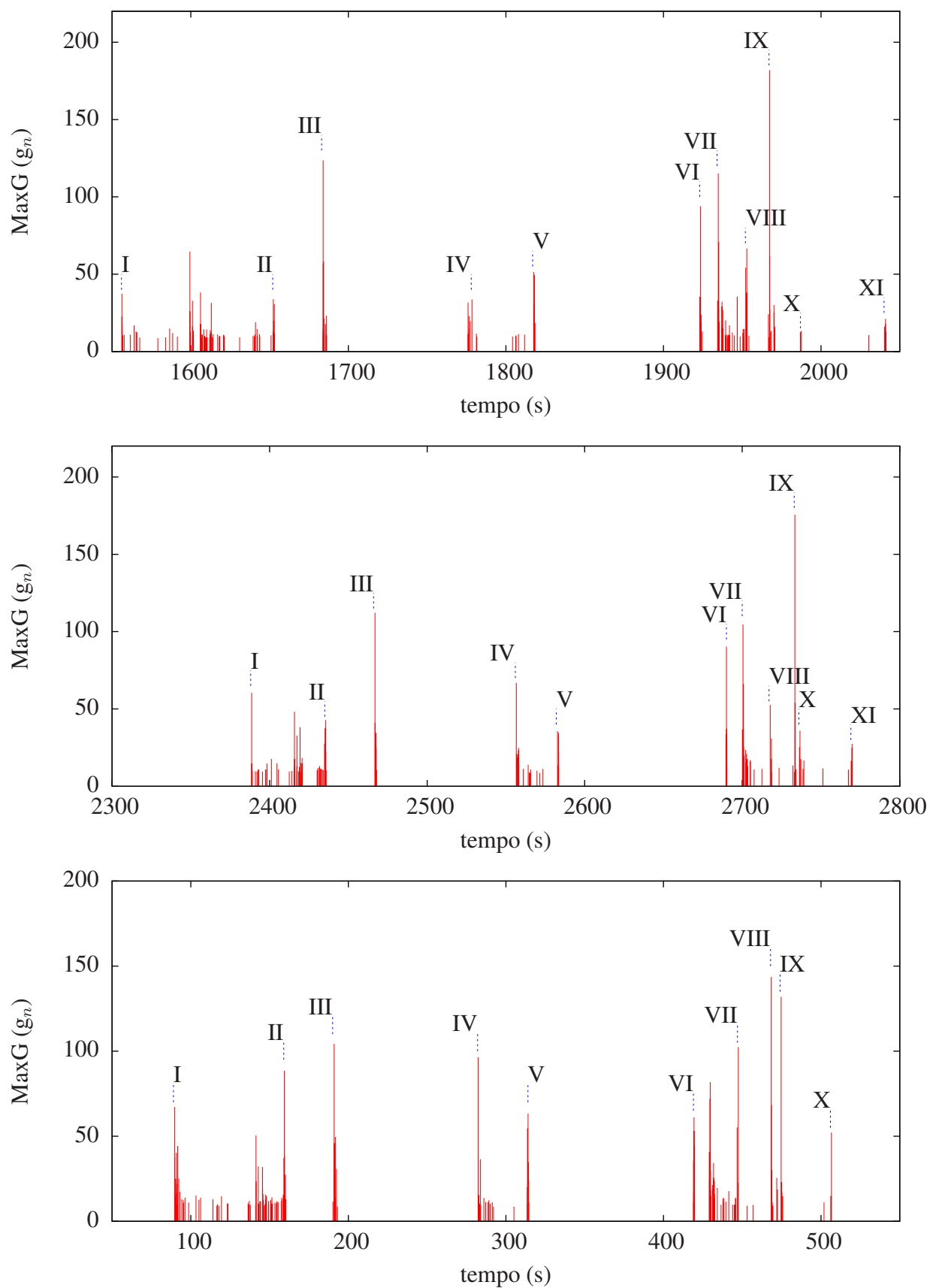


Fig. 5.14: Testes na linha 1 com a IRD, a partir da lavagem. Pontos de impacto indicados na Tab 5.4.



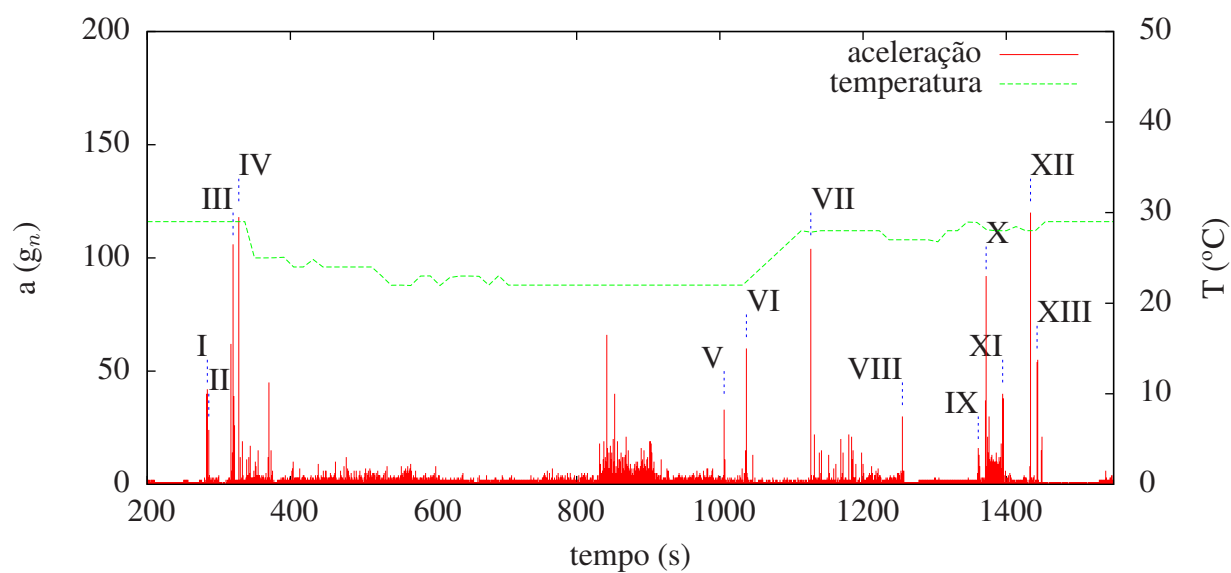


Fig. 5.15: Teste com a FE na linha 1 completa. Pontos de impacto indicados na Tab 5.5.

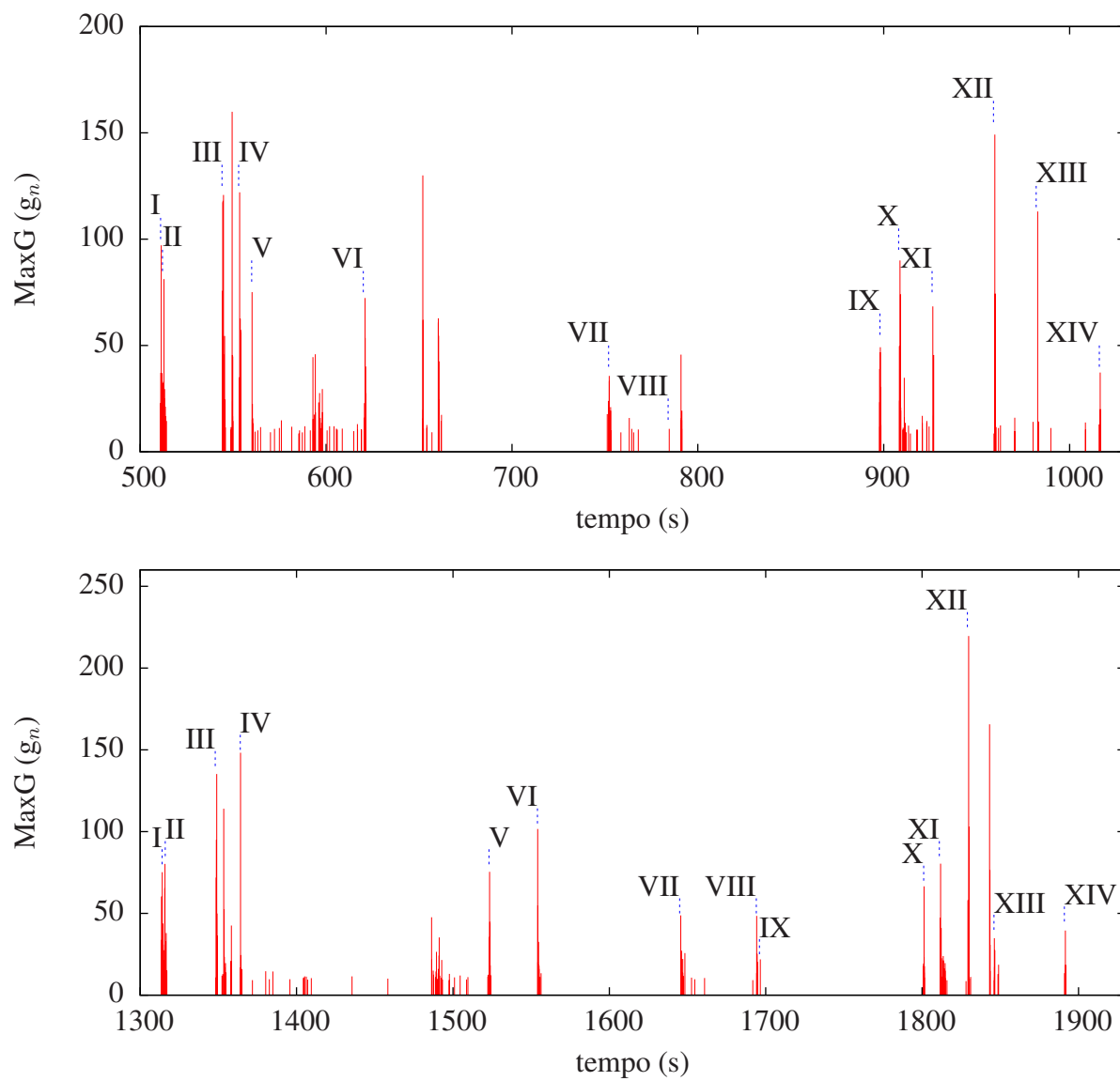


Fig. 5.16: Testes com a IRD na linha 1 completa. Pontos de impacto indicados na Tab 5.5.

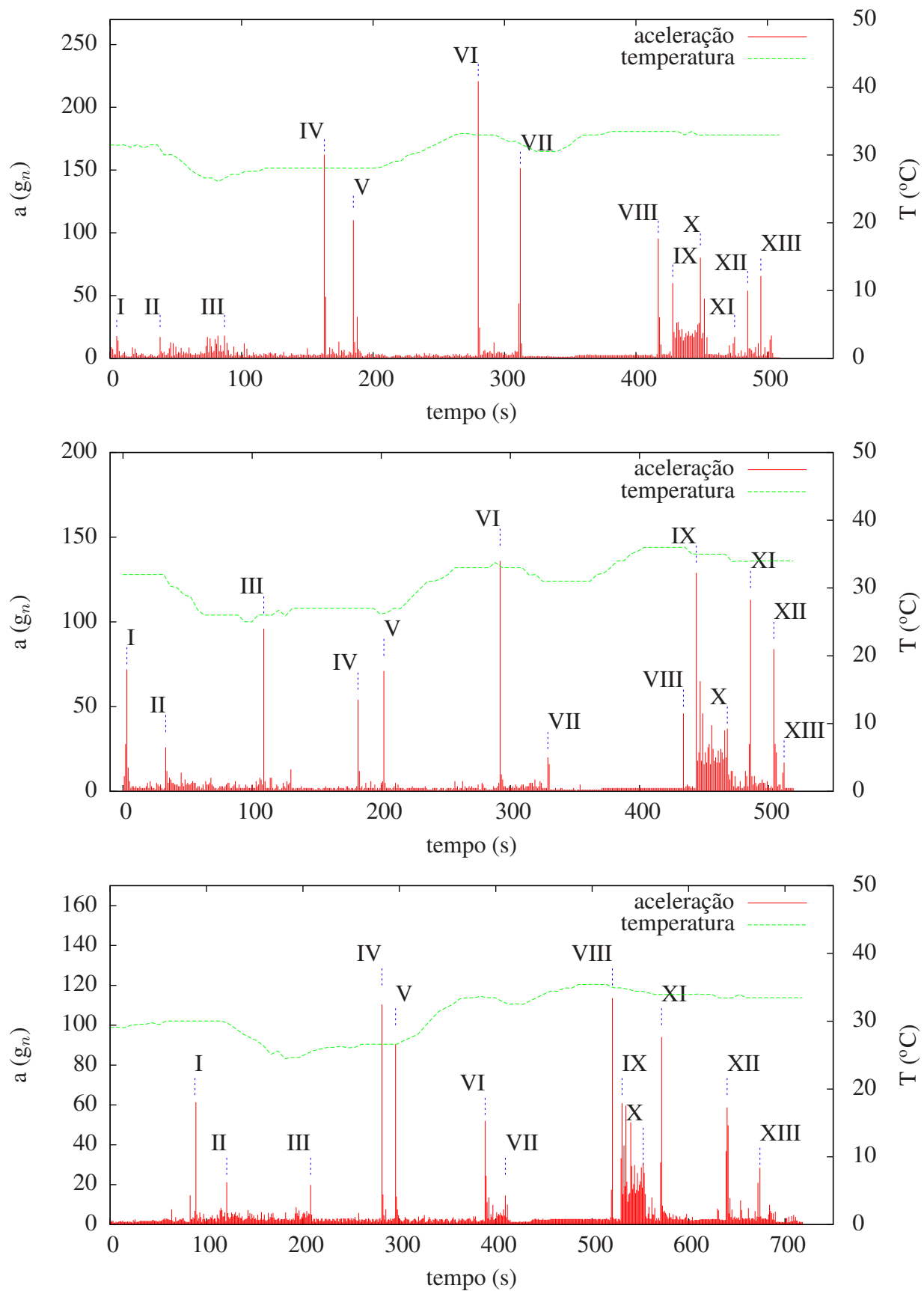


Fig. 5.17: Testes na linha 2 com a FE. Pontos de impacto indicados na Tab 5.6.

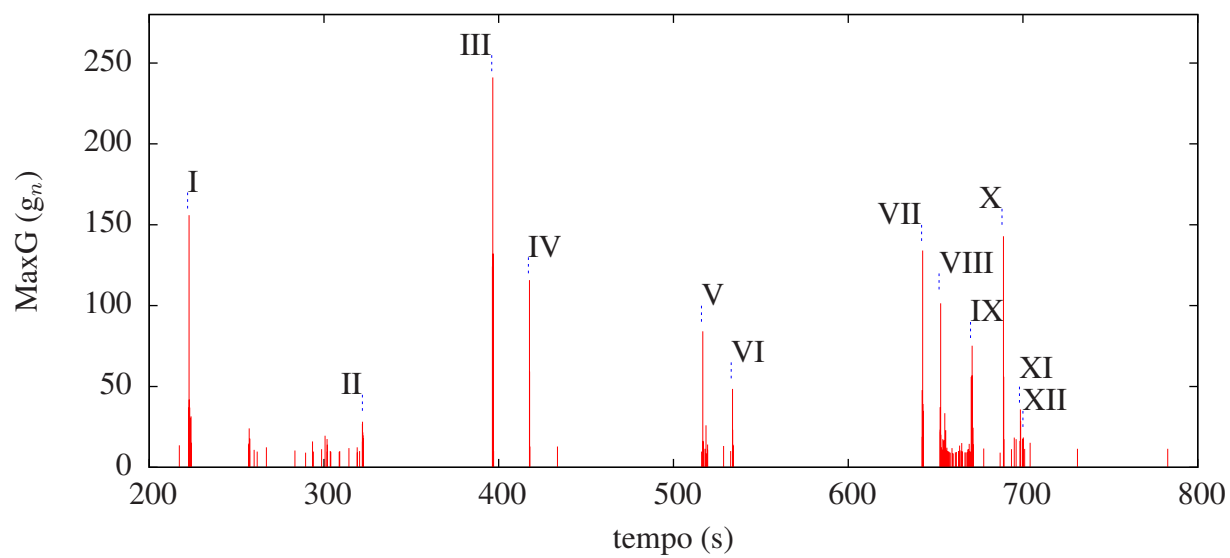


Fig. 5.18: Teste na linha 2 com a IRD. Pontos de impacto indicados na Tab 5.6.

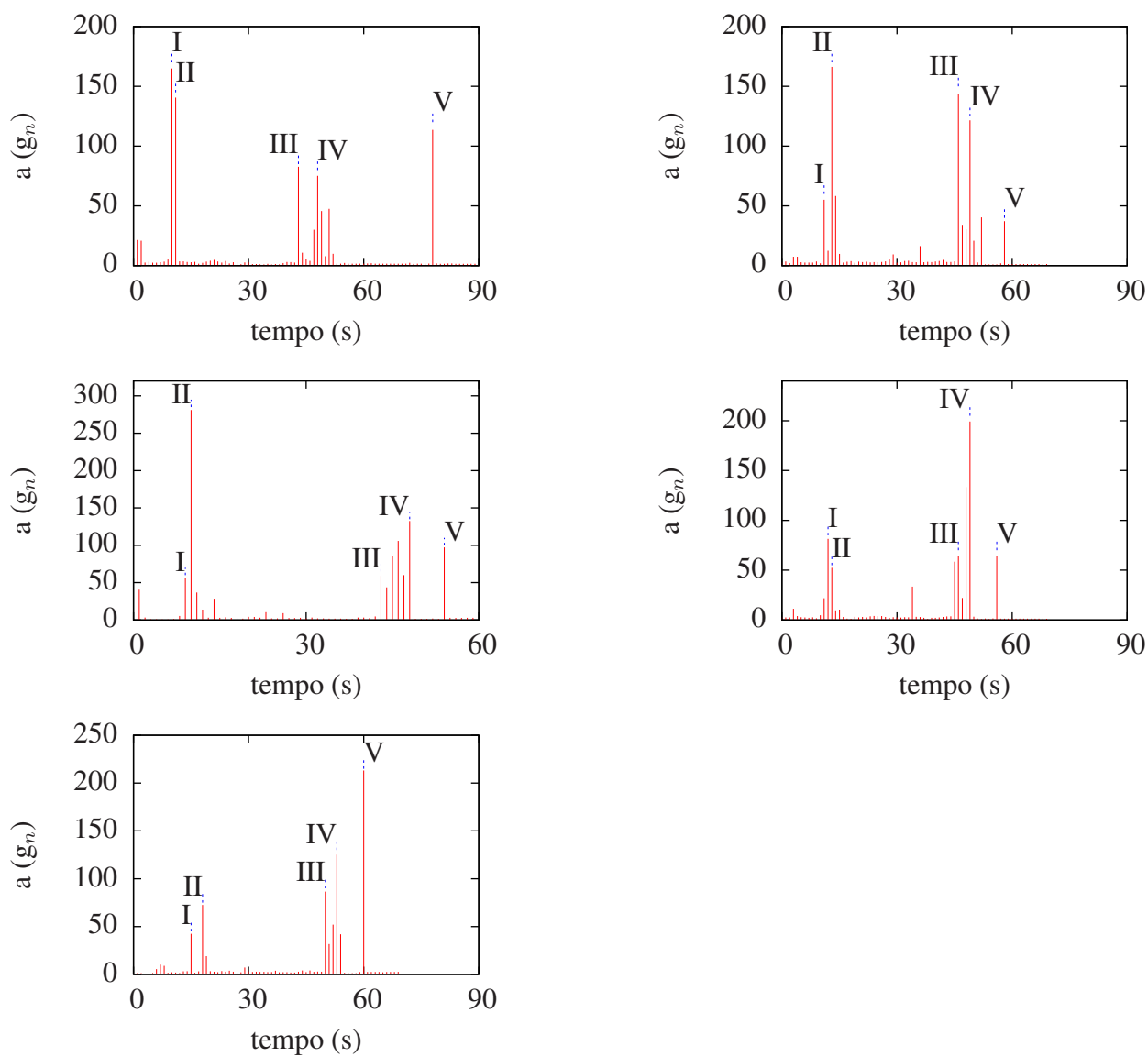


Fig. 5.19: Testes de queda com a FE. Pontos de impacto indicados na Tab 5.7.

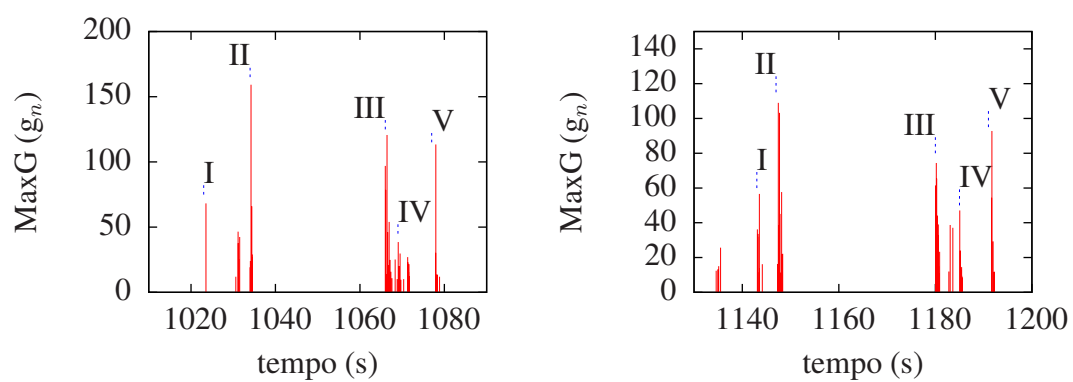


Fig. 5.20: Testes de queda com a IRD. Pontos de impacto indicados na Tab 5.7.



# Capítulo 6

## Conclusões

As principais realizações deste trabalho são:

- Desenvolvimento e caracterização de um instrumento capaz de monitorar os impactos e temperatura durante o processo pós-colheita;
- A medida da temperatura é uma característica que o diferencia dos instrumentos existentes.
- Construção de um protótipo funcional pelo preço de aproximadamente R\$ 1300,00.

Este instrumento pode ser usado como uma ferramenta na identificação sistemática do processo de degradação da qualidade e desperdício dos produtos hortícolas.

A perda na agricultura ainda é um grande problema enfrentado pela maioria dos países, principalmente aqueles em vias de desenvolvimento. Ela afeta boa parte da produção e tem consequências tanto econômicas como sociais. Pesquisas sistemáticas são necessárias para identificar os fatores causadores de perdas de frutas e hortaliças.

Nas últimas quatro décadas têm surgido instrumentos, chamados pseudofrutos, que auxiliam os pesquisadores na identificação dos fatores relacionados ao desperdício. Esses instrumentos limitam-se, em sua maioria, à detecção dos impactos sofridos por frutas e hortaliças durante o processo pós-colheita. Além disso, esses instrumentos apresentam um alto custo e nem sempre possuem uma interface amigável com o usuário, dificultando sua utilização por pesquisadores e agricultores.

Neste trabalho, projetamos, fabricamos, caracterizamos e testamos em campo um novo instrumento chamado Fruta Eletrônica. Este instrumento foi projetado mantendo em foco duas premissas básicas: baixo custo e facilidade de operação.

A Fruta Eletrônica mede e armazena impactos triaxiais na faixa de 0,5  $g_n$  até 250  $g_n$  e temperatura na faixa de 0 °C até 80 °C. Sua autonomia em funcionamento é maior que 2 h. O diâmetro e peso do primeiro protótipo foram respectivamente 98 mm e 346 g.



Testes em campo, realizados em uma linha de beneficiamento de laranjas na cidade de Eng. Coelho, mostraram que este instrumento pode fornecer informações úteis que colaboram na identificação dos pontos de estresse mecânico e térmico ao qual os frutos são submetidos. A aquisição da temperatura mostrou-se bastante útil no auxílio à análise de dados, principalmente na etapa de beneficiamento que envolvia a lavagem, secagem, aspersão de cera e nova secagem da laranja.

Comparamos os resultados obtidos através da Fruta Eletrônica com um instrumento comercial, a IRD400/Techmark, Inc. Os resultados foram bastante satisfatórios, mostrando que a Fruta Eletrônica é capaz de detectar os mesmos impactos que a IRD e, em alguns casos, superar sua autonomia.

A diferença de magnitude entre os impactos medidos pela Fruta Eletrônica e pela IRD, durante o teste em campo, pode ser explicada devido à diferença de tamanho e peso e o material que envolve cada uma das esferas. Com isso, a maneira que cada uma absorve a energia cinética adquirida durante a queda é diferente. Outro fator que deve ser levado em consideração para a comparação das amplitudes dos impactos medidos pelos dois instrumentos é com relação a rota, posição e proximidade das outras frutas no momento em que cada instrumento sofre o impacto.

Com o domínio da tecnologia de fabricação de uma esfera instrumentada podemos adaptá-la às mais diversas aplicações para suprir as necessidades de pesquisadores e produtores a fim de detectar as causas do desperdício dos mais diversos tipos de frutas e hortaliças.

## Referências Bibliográficas

- [1] BALANÇA COMERCIAL DO AGRONEGÓCIO. Tabela, Acesso em: 19 fev. 2009. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/url/ITEM/4DAB85471B802D76E040A8C075023D87>>.
- [2] CHITARRA, Maria Isabel F.; CHITARRA, Adimilson B. *Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio*. Editora UFLA, 2ª edition, 2005.
- [3] SILVA, Eduardo Marcondes Filinto da (Coord.). Estudos sobre o Mercado de Frutas. Relatório, Ago. 1999. Disponível em: ?>.
- [4] FRANCE PRESSE. FAO pede à América Latina que não desperdice comida. Jornal Folha de São Paulo, 01 de ago. 2008. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u428714.shtml>>.
- [5] BBC. Crise pode deixar 100 milhões na miséria, alertam ONU e Bird. Jornal Folha de São Paulo, 07 de jul. 2008. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/bbc/ult272u419888.shtml>>.
- [6] FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS — FAO. Production of fruits and vegetables and share in world. Tabela, Acesso em: 22 jan. 2009. Disponível em: <[http://www.fao.org/es/ess/yearbook/vol\\_1\\_1/pdf/b03.pdf](http://www.fao.org/es/ess/yearbook/vol_1_1/pdf/b03.pdf)>.
- [7] Ibraf - Instituto Brasileiro de Frutas. Página na internet, Jun. 2009. Disponível em: <<http://www.ibraf.org.br/estatisticas/Exporta%C3%A7%C3%A3o/ComparativoExportacoesBrasileiras2008-2007.pdf>>.
- [8] GIOVANNINI, E. Aproveitamento de resíduos da industrialização de frutas. *Agropecuária Catarinense*, 10(2):67, Jun. 1997.
- [9] SACO, I. ONU afirma que preços de alimentos continuarão altos por vários anos. Jornal Folha de São Paulo, 10 de set. 2008. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u443446.shtml>>.

- [10] BOURNE, M. C. *Post harvest food losses: the neglected dimension in increasing the world food supply*. Cornell International Agriculture Mimeograph 53, 1977. 49p.
- [11] FILHO, J. V. C. Transportes de Produtos Agrícolas: Sobre a Questão das Perdas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 34(3 e 4):173–199, ?
- [12] INSTITUTO ETHOS. *O Compromisso das Empresas com o Combate ao Desperdício de Alimentos: Banco de Alimentos, Colheita Urbana e Outras Ações*, Abr. 2005. Disponível em: <[http://www.uniethos.org.br/\\_Uniethos/Documents/compromisso\\_empresas.pdf](http://www.uniethos.org.br/_Uniethos/Documents/compromisso_empresas.pdf)>.
- [13] POST-HARVEST HANDLING LOSSES, July 2005. Disponível em: <[www.fao.org](http://www.fao.org)>.
- [14] HARVEY, J. M. Optimum environments for the transport of fresh fruits and vegetables. *International Journal of Refrigeration*, 4(5):293–298, Sep. 1981.
- [15] Desperdício Fatal. *Jornal A Tarde*, 01 de nov. 2004. Disponível em: <<http://www.atarde.com.br/jornalatarde/cultural/noticia.jsf?id=461202>>.
- [16] FERREIRA, M. D. Galpões de beneficiamento e classificação para tomates de mesa. Página na internet, Universidade Estadual de Campinas, Acesso em: 18 set. 2008. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/tomates/index.htm>>.
- [17] FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS — FAO. Prevention of post-harvest food losses: fruits, vegetables and root crops — a training manual. FAO Training Series, 1989. 157p.
- [18] KADER, A. A. et al. Postharvest technology of horticultural crops. Special Publication 3311, 1985. University of California.
- [19] HEROLD, B. et al. A Pressure Measuring Sphere for monitoring handling of fruit and vegetables. *Computers and Electronics in Agriculture*, 15:73–88, 1996.
- [20] BAGANZ, K.; ZIEMS, K. Untersuchungen zur Beurteilungsmethodik von Kartoffelbeschädigungen. *Arch. Landtech*, (1):21–36, 1967.
- [21] GEYER, M.; HEROLD, B. Methods and Limits for Measurement of Mechanical Load on Fruits and Vegetables on Harvest and Post-Harvest Period. *Acta Horticulturae*, (379):579–586, 1995.
- [22] O'BRIEN, M.; FRIDLEY, R. Telemetry for investigating forces on fruits during handling. *Transactions of the ASAE*, 6(2):245–247, 1973.

- [23] TENNES, B. R. et al. Bruising impact data acquisition and analysis in apple packing and handling systems utilizing the Instrumented Sphere (IS). *ASAE Paper*, (88-6032), 1988.
- [24] ZAPP, H. R. et al. Instrumented Sphere performance: dynamic measurements and demonstration. *ASAE Paper*, (89-0008), 1989.
- [25] VAN CANNEYT, T. et al. Characterisation of a Potato-shaped Instrumented Device. *Biosystems Engineering*, 86(3):275–285, Sep. 2003.
- [26] BOLLEN, A. F. Technological innovations in sensors for assessment of postharvest mechanical handling systems. *Int. J. Postharvest Technology and Innovation*, 1(1):16–31, 2006.
- [27] THOMPSON, Ambler; TAYLOR, Barry N. Guide for the Use of the International System of Units (SI). Special publication, NIST, National Institute of Standards and Technology, Nov. 2008. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/Pubs/SP811/appenB9.html>>.
- [28] TECHMARK. *Impact Recording Device*. Techmarc, Inc., Lansing, Michigan USA, 2002.
- [29] TSO, C. P.; STRAUSS, J. H. Quenching of an instrumented sphere in Freon-12 and liquid nitrogen in a vapor explosion study. *Review of Scientific Instruments*, 75:3327–3334, Oct. 2004.
- [30] MERZLYAKOV, M. et al. Instrumented sphere method for measuring thermal pressure in fluids and isotropic stresses and reaction kinetics in thermosetting resins. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 16:943–953, 1983.
- [31] SANCHEZ, A. C. et al. ESTUDO DE IMPACTOS DURANTE TRANSPORTE DE FRUTOS DE TOMATE EM ESTEIRA ELEVATÓRIA. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 02 a 04 de ago. 2004. São Pedro - SP.
- [32] MIKOŠ, M.; ESCORZA, M. S. DEVELOPMENT OF THE SPY-COBBLE: AN INSTRUMENTED TRACER FOR MEASURING DYNAMICS OF SEDIMENT TRANSPORT IN TURBULENT FLOWS. Página na internet, University of Ljubljana, Acesso em: 14 sep. 2008. Disponível em: <[http://ksh.fgg.uni-lj.si/KSH\\_ANG/spy\\_cobble/index.htm](http://ksh.fgg.uni-lj.si/KSH_ANG/spy_cobble/index.htm)>.
- [33] ? Página na internet, Techmark Inc., Acesso em: 8 dez. 2007. Disponível em: <<http://www.techmark-inc.com>>.
- [34] TECHMARK, INC. *Impact Recording Device*. Brochure, Acesso em: 12 jan. 2009. Disponível em: <<http://www.techmark-inc.com/pdf/Brochure4.pdf>>.

- [35] EXPIDO, J.; BUENO, J.; VAN CANNEYT, T. Impact Detection in Potato Handling Lines with Sensors Based on Triaxial Accelerometers. In P. Tonutti F. Mencarelli, editor, *5<sup>th</sup> International Postharvest Symposium*, pages 1125–1131, 2005.
- [36] Frequently Asked Questions. Technical report, Honeywell, 2003. Disponível em: <<http://www.honeywell.com/sensotec>>.
- [37] WILSON, Jon S., editor. *Sensor Technology Handbook*. Newnes, 2005.
- [38] Charles S. SMITH. Piezoresistance effect in germanium and silicon. *Phys. Rev.*, 94(1):42–49, Apr. 1954.
- [39] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. AIP Press, 2nd edition, 1997.
- [40] SZE, S. M., editor. *Semiconductor Sensors*. John Wiley & Sons, 1994.
- [41] PALLÁS-ARENY, Ramón; WEBSTER, John G. *Sensors and signal conditioning*, chapter Reactance variation and electromagnetic sensors, pages 140–152. Wiley-Interscience, 1991.
- [42] RISTIC, Ljubisa, editor. *Sensor Technology and Devices*. Artech House, 1994.
- [43] JARÉN, C.; ARAZURI, S.; ARANA, I. Electronic Fruits and Other Sensors. *Chronica Horticulturae*, 48(4), Dec. 2008.
- [44] National Semiconductor. *LM135/LM235/LM335 Precision Temperature Sensors*, Nov. 2000.
- [45] JUNIOR, Paulo Zambrozi. Sensor de Umidade Microeletrônico Baseado em Capacitor com Dielétrico Higroscópico. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, Ago. 2005.
- [46] STRANGIO, Christopher E. The RS232 Standard. Página na internet, CAMI Research Inc., 2006. Disponível em: <[http://www.camiresearch.com/Data\\_Com\\_Basics/RS232\\_standard.html](http://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html)>.
- [47] CadSoft Online: Home of the EAGLE Layout Editor. Página na internet, CadSoft, Acesso em: 12 jan. 2009. Disponível em: <<http://www.cadsoftusa.com>>.
- [48] GLENEWINKEL, Mark. *System Design and Layout Techniques for Noise Reduction in MCU-Based Systems*. Freescale Semiconductor, Inc., Austin, Texas EUA, 1995.

- [49] PAPE, Scott. How to extend the battery life of your microcontroller based design. Página na internet, Embeeded.com, Acesso em: 7 July 2006. Disponível em: <<http://www.embeeded.com/showArticle.jhtml?articleID=190900568>>.
- [50] DALTRINI, Beatriz Mascia; JINO, Mario; MAGALHÃES, Léo Pini. *Introdução a Sistemas de Computação Digital*. Makron Books do Brasil, São Paulo, 1999.
- [51] MOTOROLA. *MC68HC908AP64 Data Sheet*. Freescale Semiconductor, Inc., Austin, Texas EUA, Oct. 2003. Rev. 2.5.
- [52] TRAVIS, Jeffrey; KRING, Jim. *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*. Prentice Hall, 3rd edition, July 2006.
- [53] BITTER, Rick; MOHIUDDIN, Taqi; NAWROCKI, Matt. *LabVIEW Advanced Programming Techniques*. CRC Press, 2001.
- [54] Freescale Semiconductor, Inc., Austin, Texas EUA. *Surface Mount Micromachined Accelerometer*, May 2005. Rev. 3.
- [55] Freescale Semiconductor, Inc., Austin, Texas EUA. *Surface Mount Micromachined Accelerometer*, Maio 2005. Rev. 3.
- [56] CAMARGO, Gustavo Garcia Toledo; FERREIRA, Marcos David; ANDREUCCETTI, Caroline. TESTES DE IMPACTO EM LABORATÓRIO PARA TOMATE DE MESA (LYCOPERSICON ESCULENTUM MILL.) CULTIVAR DÉBORA. *Horticultura brasileira*, 22(2), jul 2004. Suplemento CD-ROM.
- [57] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*, chapter Oscilações, pages 25–27. LTC, 4th edition, 1996.
- [58] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. *Microeletrônica*. MAKRON Books, 4<sup>a</sup> edition, 2000.
- [59] LR Informática Industrial®. *Guia LRI*, 2006.
- [60] MALVINO, Albert Paul. *Eletrônica*, volume 1. McGraw-Hill, 1987.
- [61] NEWTON, Isaac, Sir. *The mathematical principles of natural philosophy*, volume 1, chapter Definitions, page 8. Middle-Temple-Gate, 1729.
- [62] HOROWITZ, Paul; HILL, Winfield. *The Art of Electronics*, chapter Transistors, pages 65, 94–95. Cambridge University Press, 2nd edition, 1989.

- [63] OPPENHEIM, Alan V.; WILLSKY, Alan S. *Signals and Systems*. Prentice Hall, 2nd edition, 1996.
- [64] MAGALHÃES, Ana Maria de. Superfícies protetoras na diminuição de danos mecânicos em tomate de mesa. *Ciência Rural*, 37(3):878–881, mai-jun 2007.
- [65] MAGALHÃES, Ana Maria; FERREIRA, Marcos David. Qualidade dos frutos de tomate de mesa quando submetidos a impacto por ocasião de beneficiamento. *Horticultura Brasileira*, 24(4):481–484, out.-dez. 2006.
- [66] FERREIRA, Marcos David et al. Pontos Críticos de Impacto em Linhas de Beneficiamento Utilizadas para Citros no Estado de São Paulo. *Rev. Bras. Frutic.*, 28(3):523–525, Dez. 2006.
- [67] CRUZ, Carlos Henrique Brito et al. F-129: Física experimental I, apêndices e complementos. Instituto de Física, UNICAMP, 1998.
- [68] LEON-GARCIA, Alberto. *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*. Addison-Wesley, 2<sup>a</sup> edition, 1994.



# Apêndice A

## Segundo protótipo da Fruta Eletrônica

O primeiro protótipo da FE não tem seu tamanho compatível com a maioria das frutas e hortaliças. Montamos esse protótipo para testar o funcionamento do hardware e software da FE. Os resultados que obtivemos com os testes da FE confirmaram o funcionamento correto da FE.

A próxima etapa do desenvolvimento da FE foi miniaturizar o hardware do primeiro protótipo. Reduzimos o tamanho da PCB da FE em 26 %, diminuindo a distância entre componentes e utilizando componentes menores. A maior parte dos componentes utilizados nesse segundo protótipo é do tipo SMD, diferentemente dos componentes do primeiro protótipo. O diâmetro final dessa segunda PCB é de 58 mm. A Fig. A.1 mostra as PCB's do primeiro e segundo protótipos lado a lado.

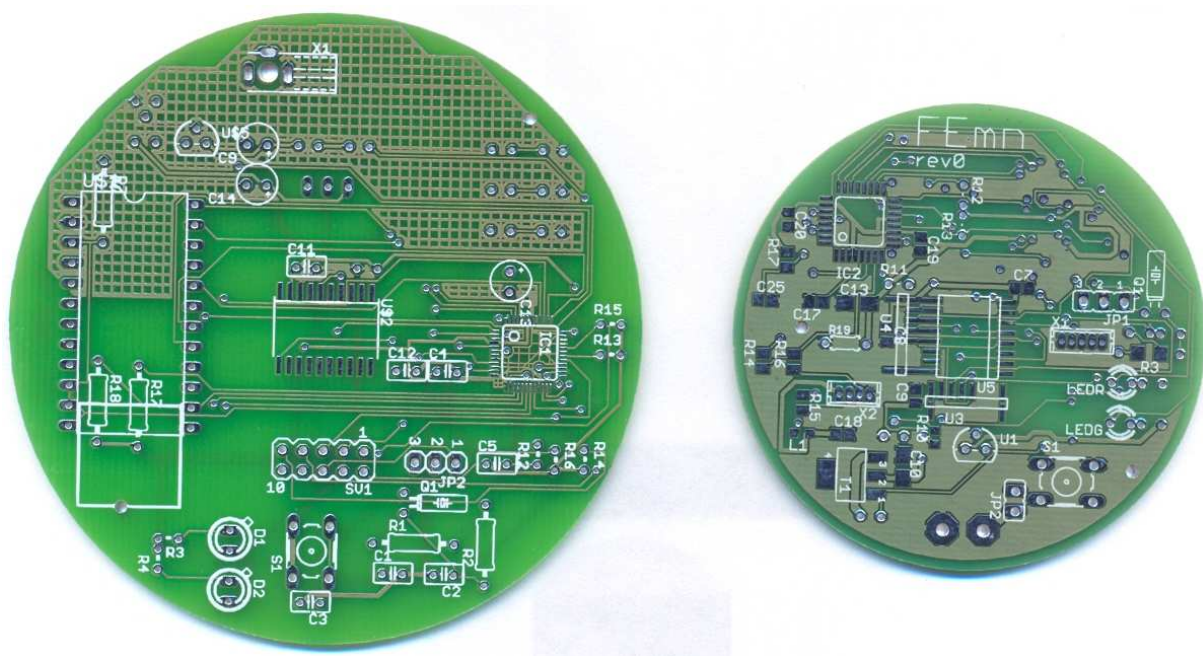


Fig. A.1: Comparação entre as PCB's do primeiro e segundo protótipos da FE.



Com essa redução no diâmetro, conseguimos reduzir o volume da FE em 59 %. Essa diminuição do tamanho também colabora para uma diminuição no peso da FE, tornando-a compatível com uma variedade maior de frutas e hortaliças. A Fig. A.2 mostra uma foto da PCB do segundo protótipo com os componentes eletrônicos montados.

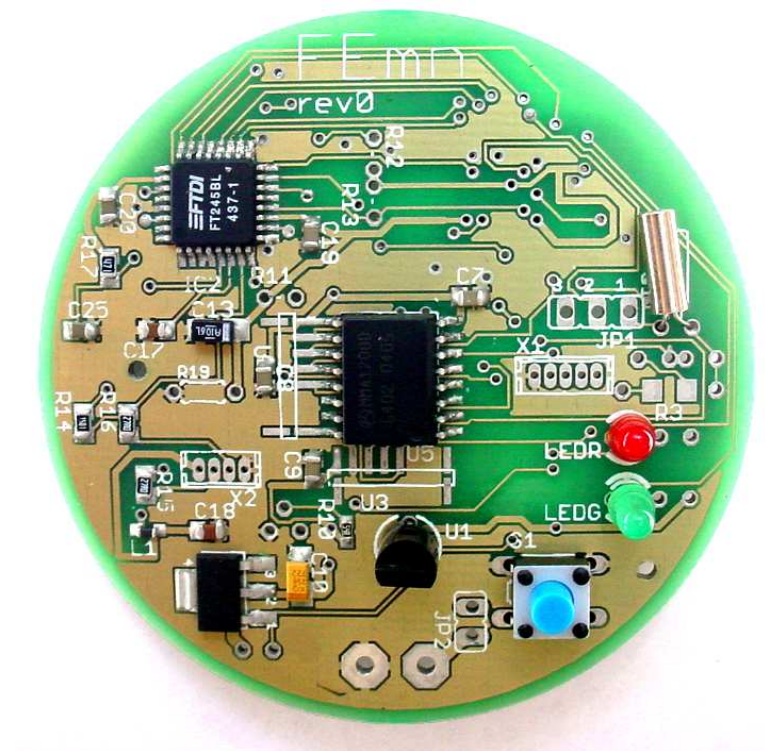


Fig. A.2: Foto da PCB do segundo protótipo da FE com os componentes eletrônicos.

Esse segundo protótipo ainda não está completo. Faltava desenvolver uma casca esférica compatível com o tamanho dessa segunda PCB. Portanto os resultados dos testes apresentados nesse trabalho são referentes ao primeiro protótipo da FE.

# Apêndice B

## Análise Estatística

Neste apêndice apresentamos alguns conceitos estatísticos, suas definições matemáticas e a importância desses no tratamento dos dados experimentais deste trabalho.

### B.1 Análise dos dados experimentais

Erros de medida são inerentes aos dados experimentais. Esses erros são basicamente de dois tipos: erros sistemáticos e erros aleatórios [67].

Erros sistemáticos são causados por fontes identificáveis e podem ser minimizados. Estes erros podem ser causados por: falta de calibração do equipamento, adoção de métodos de medida incorretos, luminosidade, temperatura, umidade ambiente, etc.

Já os erros aleatórios: ruído, limite de precisão dos instrumentos, etc. não podem ser controlados, porém podem ser tratados através de métodos estatísticos. Esse tratamento nos fornece uma estimativa da confiabilidade dos resultados obtidos.

Como qualquer medida experimental  $Y_i$  é composta por seu valor real  $y$  mais um erro aleatório  $e_i$  ( $Y_i = y + e_i$ ) então essa medida pode ser considerada uma variável aleatória.

Para podermos descrever completamente o comportamento de uma variável aleatória devemos conhecer sua função densidade de probabilidade  $f_Y(y)$  ou a função cumulativa da distribuição  $F_Y(y)$ . Na maioria das vezes estamos interessados em parâmetros que resumem as informações contidas nessas funções.

Os dois parâmetros mais importantes usados para resumir a função densidade de probabilidade (fdp) de uma variável aleatória são a média e a variância.

### B.1.1 Média

A média ou valor médio é conhecido na estatística como valor esperado. Esse nome advém do fato de que esse parâmetro corresponde ao valor real da medida, ou seja, o valor que esperamos obter quando fazemos a medida de certa variável. O valor esperado é definido por:

$$E[Y] = \int_{-\infty}^{+\infty} t f_Y(t) dt \quad (\text{B.1})$$

para uma variável contínua.

Quando uma fdp é simétrica em torno de um valor  $\mu$ , então  $E[Y] = \mu$ . Isto é, se

$$f_Y(m - y) = f_Y(m + y) \quad \text{para todo } y.$$

### B.1.2 Variância

O valor esperado por si só nos dá uma informação muito limitada a respeito da variável aleatória estudada. Por exemplo, uma grandeza medida cujos valores variem entre  $\pm 1$  e outra cujos valores variem entre  $\pm 1000$  têm valor esperado igual a zero para ambos os casos. É necessário, então, conhecer além do valor esperado, o quão dispersas estão as medidas em torno desse valor. A variância é o parâmetro que nos dá essa idéia e é definida por:

$$\text{VAR}[Y] = E[(Y - E[Y])^2] \quad (\text{B.2})$$

Quando efetuamos medidas de uma grandeza física, só faz sentido comparar a dispersão dos valores medidos com essa grandeza se ambos tiverem as mesmas unidades. Como a variância é uma medida quadrática, para podermos compará-la ao valor medido devemos tomar sua raiz quadrada. Esse valor é chamado de desvio padrão da variável  $Y$  e é definido por:

$$\text{STD}[Y] = \text{VAR}[Y]^{1/2} \quad (\text{B.3})$$

O  $\text{STD}[Y]$  é usado como uma medida da “largura” ou do “espalhamento” da distribuição.

Mas quando realizamos medidas experimentais de dada variável que não se conhece ao menos sua fdp nem o tipo de distribuição da variável aleatória com que estamos lidando (exponencial, Gaussiana, gamma...), como podemos conhecer sua média e variância?

## B.2 Estimadores

Felizmente existem maneiras de estimarmos esses parâmetros a partir dos dados medidos, independentemente de conhecermos a distribuição à qual a variável aleatória pertence. Veremos a seguir como estimar esses parâmetros a partir dos dados medidos.

### B.2.1 Estimador da média

Supondo  $Y$  uma variável aleatória de média  $E[Y] = \mu$  e  $Y_1, \dots, Y_n$ ,  $n$  medidas independentes de  $Y$ . Então os  $Y_j$ 's são variáveis aleatórias independentes, identicamente distribuídas (iid) com a mesma fdp de  $Y$ . A média amostral da sequência é:

$$M_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_j \quad (\text{B.4})$$

A média amostral sendo uma soma de variáveis aleatórias é uma variável aleatória, então ela apresentará uma certa dispersão em torno de um valor central. É possível provar que uma soma de  $n$  variáveis aleatórias, quando  $n$  é grande, segue uma distribuição Gaussiana de média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$  independentemente do tipo de distribuição de cada variável isoladamente. Essa prova é feita através do teorema central do limite.

Um bom estimador deve ter duas propriedades: (1) Na média, deve apresentar o valor correto do parâmetro estimado, e (2) não pode variar muito em torno do valor correto, isto é, sua variância deve ser pequena.

O valor esperado para a média amostral é:

$$E[M_n] = E\left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_j\right] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E[Y_j] = \mu \quad (\text{B.5})$$

sendo  $E[Y_j] = E[Y] = \mu$  para todo  $j$ . Então a média amostral, na média, é igual a média da variável  $Y$ . Dizemos que a média amostral é um estimador não viciado para  $\mu$ .

É possível demonstrar que a variância da média amostral vale:

$$\text{VAR}[M_n] = E[(M_n - \mu)^2] = \frac{\text{VAR}[Y]}{n} \quad (\text{B.6})$$

Pela equação (B.6) notamos que a variância da média amostral tende a zero se  $n$  é muito grande. Isso quer dizer que a probabilidade da média amostral ser igual a  $\mu$  tende a 1 quando  $n$  cresce. Isso justifica o fato de realizarmos muitas repetições em um experimento, pois quanto mais repetimos o experimento, mais a média dos valores se aproxima do valor real da grandeza medida.

A partir da equação (B.6) e utilizando a equação (B.3) podemos calcular o desvio padrão da média amostral como:

$$\text{STD}[M_n] = \frac{\text{STD}[Y]}{\sqrt{n}} \quad (\text{B.7})$$

### B.2.2 Estimador da variância

Assim como no caso do estimador da média, vamos calcular a variância amostral  $S^2$  como sendo a dispersão dos valores medidos em torno de  $M_n$ :

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Y_j - M_n)^2 \quad (\text{B.8})$$

O valor esperado para  $S^2$  é:

$$E[S^2] = \text{VAR}[Y] = \text{STD}[Y]^2 \quad (\text{B.9})$$

Como  $E[S^2] = \text{VAR}[Y]$ ,  $S^2$  é um bom estimador para a variância.

### B.2.3 Estimador do desvio padrão

Como o leitor pode notar, algumas das equações anteriores dependem do valor do desvio padrão da distribuição que até agora é desconhecido. Devemos então achar uma maneira de estimarmos esse valor.

Note que a equação (B.6) depende de  $\text{VAR}[Y]$  e que  $S^2$  é um estimador de  $\text{VAR}[Y]$ . Utilizando esse resultado juntamente com (B.3) podemos estimar o desvio padrão da média como:

$$\text{STD}[M_n] = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{B.10})$$

Esse resultado é chamado de erro padrão. Também podemos estimar o desvio padrão do desvio padrão de cada medida do mesmo modo, assim

$$\text{STD}[S] = S \sqrt{\frac{2}{n-1}} \quad (\text{B.11})$$

### B.2.4 Resumo

De todos os estimadores vistos anteriormente, destacamos alguns deles por sua maior utilização na apresentação de análises de medidas experimentais. A Tab. B.1 mostra esses estimadores, e sua

utilização está exemplificada na seção B.4.

Tab. B.1: Resumo dos estimadores utilizados no tratamento dos dados dos testes de queda.

| Equação                                               | Descrição                                       |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $M_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_j$                  | Média amostral                                  |
| $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Y_j - M_n)^2}$ | Desvio padrão de cada medida                    |
| $\text{STD}[M_n] = \frac{S}{\sqrt{n}}$                | Erro padrão                                     |
| $\text{STD}[S] = S \sqrt{\frac{2}{n-1}}$              | Desvio padrão do estimador para o desvio padrão |

## B.3 Intervalo de confiança

Até agora vimos como estimar alguns valores que nos dêem idéia dos parâmetros da distribuição. Com esses valores podemos estimar a média e a variância da distribuição e o quão próximos esses valores estão do valor real.

Os intervalos de confiança tratam o problema de estimar parâmetros da distribuição de uma forma diferente. Podemos estimar um intervalo de valores que tem uma grande chance de conter o parâmetro estimado, por exemplo,  $E[Y]$ . Esse intervalo pode ser definido como:

$$P[l(Y) \leq \mu \leq u(Y)] = p \quad (\text{B.12})$$

isto é, a média  $\mu$  tem probabilidade de  $p \times 100 \%$  de estar no intervalo  $[l(Y), u(Y)]$ . Esse tipo de abordagem garante ao mesmo tempo a precisão e a confiança da estimativa.

É importante frisar que esse intervalo de confiança diz respeito ao parâmetro estimado e não aos valores medidos. Um intervalo de confiança de 90 % para a média quer dizer que com uma probabilidade de 90 % a média está dentro desse intervalo. Isso não quer dizer que 90 % dos valores medidos estarão dentro desse intervalo.

Esse intervalo de confiança depende da distribuição da variável aleatória. Veremos como calcular esses intervalos de confiança para o caso das variáveis aleatórias serem Gaussianas, pois como vimos anteriormente  $M_n$  é Gaussiana.

Para uma Gaussiana com média desconhecida e variância conhecida podemos calcular o intervalo de confiança como sendo:

$$\begin{aligned}
 p &= P \left[ -z \leq \frac{M_n - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \leq z \right] \\
 &= P \left[ M_n - \frac{z\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq M_n + \frac{z\sigma}{\sqrt{n}} \right]
 \end{aligned}
 \tag{B.13}$$

Essa equação afirma que o intervalo  $(M_n - z\sigma/\sqrt{n}, M_n + z\sigma/\sqrt{n})$  contém  $\mu$  com uma probabilidade  $p$ . Para calcularmos esse intervalo existem tabelas que relacionam o valor de  $z$  com a probabilidade  $p$ . A Tab. B.2 contém alguns valores típicos para  $p$  e o valor de  $z$  correspondente.

Tab. B.2: Valores de  $z$  para cálculo de intervalos de confiança [68].

| $p$ | 0,90  | 0,95  | 0,99  |
|-----|-------|-------|-------|
| $z$ | 1,645 | 1,960 | 2,576 |

Quando não se conhece a média nem a variância, o intervalo de confiança pode ser obtido como:

$$\left( M_n - \frac{z_{n-1}S}{\sqrt{n}}, M_n + \frac{z_{n-1}S}{\sqrt{n}} \right)$$

É provado que esse novo intervalo de confiança segue uma distribuição chamada *t* de *Student*. Essa distribuição assemelha-se a distribuição normal para  $n$  muito grande. Para obter os valores de  $z_{n-1}$  é necessário recorrer à uma tabela dessa distribuição. A Tab. B.3 mostra alguns valores de  $z_{n-1}$  para intervalos de confiança e  $n$  típicos.

Tab. B.3: Valores de  $z_{n-1}$  para cálculo de intervalos de confiança [68].

| $n - 1$  | $p$   |        |        |
|----------|-------|--------|--------|
|          | 0,90  | 0,95   | 0,99   |
| 1        | 6,314 | 12,706 | 63,657 |
| 10       | 1,812 | 2,228  | 3,169  |
| 20       | 1,725 | 2,086  | 2,845  |
| 40       | 1,684 | 2,021  | 2,704  |
| 60       | 1,671 | 2,000  | 2,660  |
| $\infty$ | 1,645 | 1,960  | 2,576  |

## B.4 Análise dos dados de queda livre

Para analisar os dados medidos pela FE durante os testes de queda livre foram utilizados os parâmetros e métodos discutidos no começo desse apêndice. A Tab. B.4 mostra os valores medidos pela FE durante um desses testes feitos com a FE.

Tab. B.4: Valores medidos para quedas de 11 cm.

| Queda | Aceleração ( $g_n$ ) | Queda | Aceleração ( $g_n$ ) | Queda | Aceleração ( $g_n$ ) |
|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|
| 1     | 19,39                | 21    | 20,47                | 41    | 20,03                |
| 2     | 19,72                | 22    | 20,32                | 42    | 20,59                |
| 3     | 19,36                | 23    | 19,42                | 43    | 20,62                |
| 4     | 19,87                | 24    | 19,34                | 44    | 19,63                |
| 5     | 19,00                | 25    | 18,32                | 45    | 19,49                |
| 6     | 19,52                | 26    | 20,33                | 46    | 19,37                |
| 7     | 18,34                | 27    | 20,55                | 47    | 20,50                |
| 8     | 19,27                | 28    | 19,36                | 48    | 20,46                |
| 9     | 20,18                | 29    | 19,21                | 49    | 20,81                |
| 10    | 19,88                | 30    | 19,02                | 50    | 19,43                |
| 11    | 20,40                | 31    | 20,07                | 51    | 20,29                |
| 12    | 19,01                | 32    | 20,32                | 52    | 18,97                |
| 13    | 19,94                | 33    | 20,33                | 53    | 20,22                |
| 14    | 19,58                | 34    | 19,28                | 54    | 20,54                |
| 15    | 20,29                | 35    | 19,49                | 55    | 20,57                |
| 16    | 19,64                | 36    | 19,79                | 56    | 19,78                |
| 17    | 20,74                | 37    | 19,03                | 57    | 21,08                |
| 18    | 19,69                | 38    | 19,95                | 58    | 19,90                |
| 19    | 20,60                | 39    | 20,81                | 59    | 20,14                |
| 20    | 18,91                | 40    | 20,06                |       |                      |

Para estimarmos o valor real da medida e o quão próxima essa estimativa está do valor real calculamos a média amostral utilizando (B.4) e seu desvio padrão utilizando (B.10). Para calcularmos o erro padrão precisamos estimar o valor de  $S$  através de (B.8) e também confirmar o quão próximo ele está do valor real utilizando (B.11). A Tab. B.5 apresenta esses resultados para os dados da Tab. B.4.

Tab. B.5: Parâmetros estimados a partir dos dados medidos pela FE para quedas de 11 cm.

| média   | desvio | erro    | erro-desvio |
|---------|--------|---------|-------------|
| 19,8511 | 0,6275 | 0,08169 | 0,2704      |

Conhecendo a média e o desvio padrão da amostra, podemos plotar o histograma dos dados medidos pela FE juntamente com a fdp de uma distribuição  $t$  de *Student* com  $n - 1$  graus de liberdade. A Fig. B.1 apresenta esse histograma com as frequências de ocorrência de cada valor normalizadas, isto é, o número de vezes que cada valor de aceleração se repete dividido pelo número total de quedas. Desse modo a escala das ordenadas dá a idéia da probabilidade de cada faixa de aceleração.

Para podermos plotar juntamente com o histograma dos dados a distribuição  $t$  de *Student*, tivemos que fazer um ajuste na média e no desvio padrão dessa distribuição. A distribuição  $t$  é uma distribuição de média nula e desvio padrão um. Assim para fazer a correspondência entre os valores  $y$  da



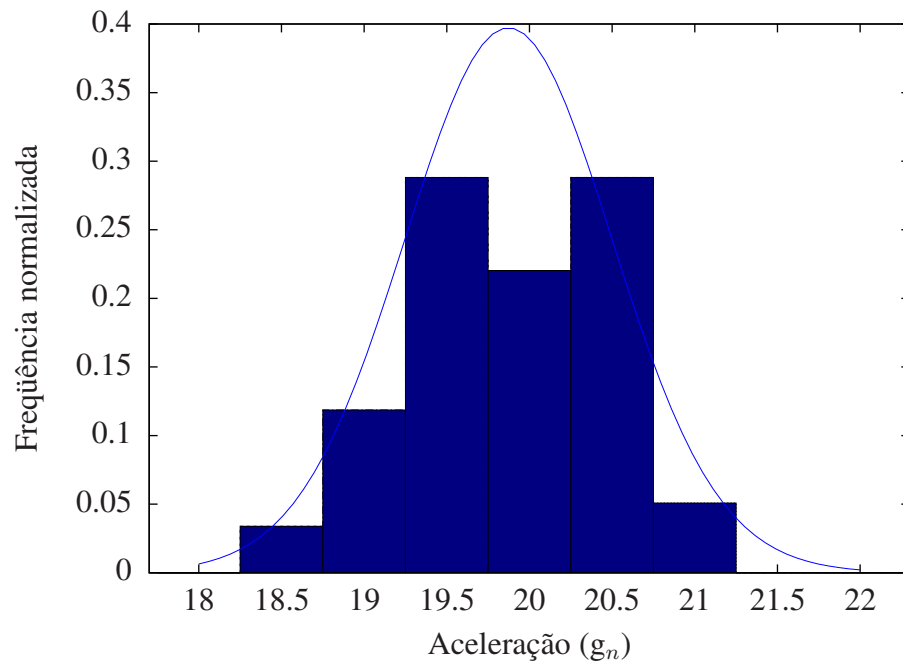


Fig. B.1: Histograma do teste de quedas com  $h = 11$  cm e fdp da distribuição t de Student com  $n - 1$  graus de liberdade, média e desvio padrão dados pela Tab. B.5.

distribuição t com os valores de aceleração do histograma fizemos a seguinte operação:  $y \times S + M_n$ , que é o inverso de quando se quer normalizar uma função para compará-la com a distribuição t onde se aplica a transformação  $(Y_i - M_n)/S$ .

O mesmo procedimento de análise dos dados realizado para as quedas de 11 cm também foram feitos para os testes de queda de 13 cm de altura. Apresentamos esses resultados na Tab. B.6 e no gráfico da Fig. B.2.

Tab. B.6: Parâmetros estimados a partir dos dados medidos pela FE para quedas de 13 cm.

| média   | desvio  | erro    | erro-desvio |
|---------|---------|---------|-------------|
| 25,0009 | 1,45185 | 0,18148 | 0,61283     |

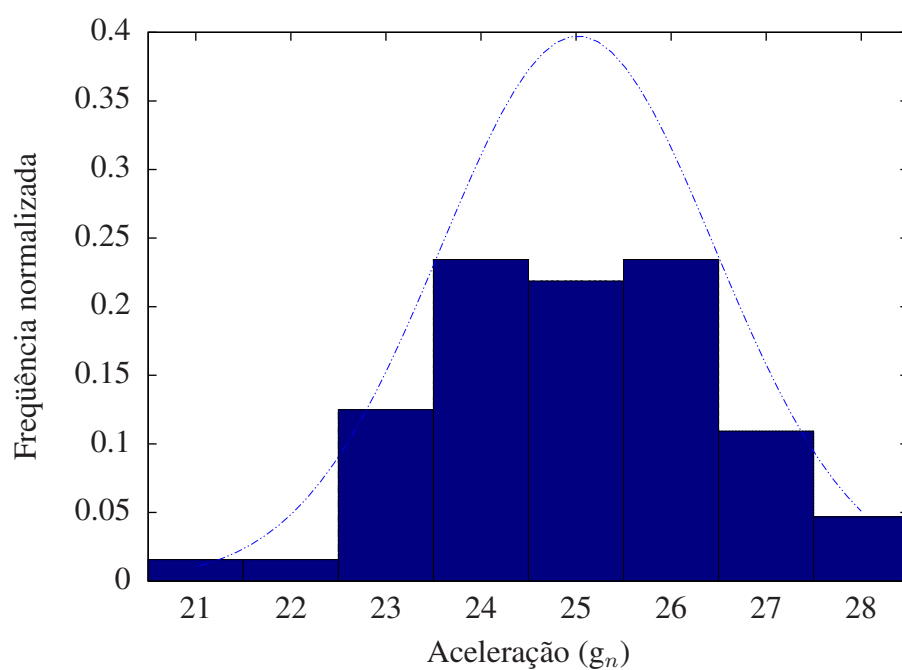


Fig. B.2: Histograma do teste de quedas com  $h = 13$  cm e fdp da distribuição t de Student com  $n - 1$  graus de liberdade, média e desvio padrão dados pela Tab. B.6.



## Apêndice C

### Fotos dos testes em campo

Este apêndice apresenta diversas fotos tiradas durante os testes feitos com a FE e a IRD em campo. Os teste foram feitos em uma linha de beneficiamento de laranjas no interior de São Paulo.



Fig. C.1: Etapa de recebimento das laranjas na linha 1.



Fig. C.2: Etapa de recebimento das laranjas na linha 2.



Fig. C.3: Etapa de pré-classificação na linha 1.



Fig. C.4: Etapa de lavagem na linha 1.



Fig. C.5: Etapa de lavagem na linha 2.





Fig. C.6: Esteira entre a lavagem da linha 2 e a linha 1.



Fig. C.7: Esteira antes do primeiro secador.



Fig. C.8: Entrada do primeiro secador.



Fig. C.9: Saída do primeiro secador.



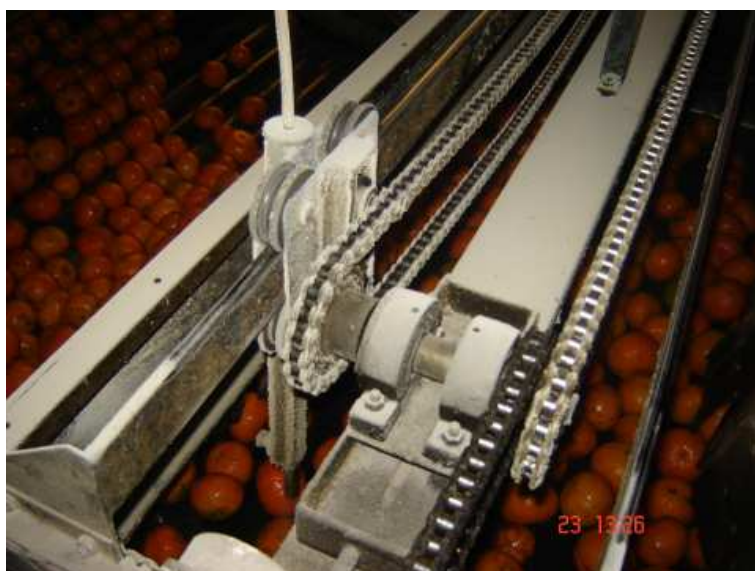


Fig. C.10: Enceramento.



Fig. C.11: Entrada do segundo secador.



Fig. C.12: Saída do segundo secador.



Fig. C.13: Classificação automática.



Fig. C.14: Classificação manual.