

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

FUSÃO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO APLICADA À SELEÇÃO E
CLASSIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DE MANGAS PARA EXPORTAÇÃO

Autor:

FRANCISCO FECHINE BORGES

Orientadores:

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Prof^a. Dr^a. Maria Elita Martins Duarte

Campina Grande – PB – Brasil

Agosto, 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

FUSÃO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO APLICADA À SELEÇÃO E
CLASSIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DE MANGAS PARA EXPORTAÇÃO

FRANCISCO FECHINE BORGES

Tese apresentada ao Programa de
Doutorado em Engenharia de
Processos da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento às
exigências para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia de Processos.

Orientadores:

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Prof^a. Dr^a. Maria Elita Martins Duarte

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

Campina Grande – PB – Brasil

Agosto, 2011



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

B732f

Borges, Francisco Fechine.

Fusão de sensores de baixo custo aplicada à seleção e classificação automatizada de mangas para exportação / Francisco Fechine Borges. — Campina Grande, 2011.

213 f. : il.; col.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadores: Prof^o. Dr^o. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata, Prof^o. Dr^o. Maria Elita M. Duarte.

1. Mangas Tommy Atkins. 2. Fusão de sensores. 3. Métodos não-destrutivos. 4. Processamento de imagens. I. Título.

CDU 66.012:634.441

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS


PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE DE DOUTORADO DE

FRANCISCO FECHINE BORGES

FUSÃO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO APLICADA À SELEÇÃO E
CLASSIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DE MANGAS PARA EXPORTAÇÃO

BANCA EXAMINADORA

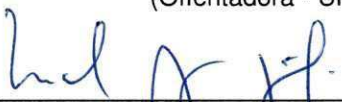
PARECER


Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata
(Orientador - UFCG/CTRN/UAEAg)

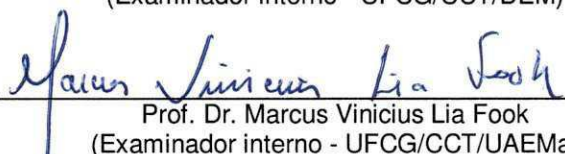
APROVADO COM DISTINÇÃO


Profª Drª Maria Elita Martins Duarte
(Orientadora - UFCG/CTRN/UAEAg)

Aprovado com distinção


Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo
(Examinador interno - UFCG/CCT/DEM)

Aprovado com distinção


Prof. Dr. Marcus Vinicius Lia Fook
(Examinador interno - UFCG/CCT/UAEMA)

Aprovado com distinção


Dr. Renato Fonseca Aragão
(Examinador interno - UFCG/CTRN/UAEAg)

APROVADO COM DISTINÇÃO


Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto
(Examinador externo - IFPB/CEE)

Aprovado com distinção

Campina Grande – PB – Brasil

Agosto, 2011

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Francisco Fachine Borges e aprovada pela banca examinadora em 19 de agosto de 2011.

Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata
(Orientador - UFCG/CTRN/UAEAg)

DEDICATÓRIA

À minha Família: meu pai José Elias (in memorian), minha mãe Neuma Fachine (in memorian), minha esposa Nicéa, meu filho Iago, minha cunhada Nildene e meus irmãos Eduardo e Guilherme.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata e Prof^a. Dr^a. Maria Elita Martins Duarte, o meu agradecimento particular por terem me aceitado como orientando, ainda antes do início do doutorado, quando conversamos sobre temas de tese e resolvemos encarar o desafio de estudar técnicas de automação aplicadas à análise de qualidade de frutas, praticamente uma nova linha de pesquisa que se iniciava no LAPPA. Obrigado pelo incentivo e motivação para o trabalho, sempre. Além da paciência que tiveram comigo, durante todo este tempo de convivência, entendendo os momentos difíceis por que passei ao longo destes anos. O apoio total dos meus orientadores foi a razão principal de eu ter continuado a caminhada. Meu muito obrigado, de coração!

Aos meus amigos Ilton Barbacena e Sabiniano Araújo, colegas de apartamento em Campina Grande, mais que isso, companheiros de luta de doutorado. Ajudaram-me muito, no dia-a-dia de “carregar o piano”, no apoio, na amizade presente. Ilton, com sua *expertise* no Matlab®, foi parceiro em artigos científicos e no desenvolvimento de programas fundamentais para a análise dos dados. Muito obrigado a vocês! Agradeço também ao amigo Aléssio, pelo apoio; a Augusto, por toda a ajuda e amizade.

Agradeço aos meus amigos de doutorado, em especial José Carlos, companheiro desde o início, a quem admiro muito pela dedicação que ele tem pelos estudos. Agradeço a todos eles, Flávia, Hermeval, Paulinho, Rildo, Renato, Marcondes, todos!

Às minhas amigas Heloíza e Fabiana, conhecedoras, como ninguém, das mangas e seus defeitos. À Diretoria da Fazenda Agrodan, pelo apoio. À Capes e ao CNPq, pelo suporte financeiro.

Enfim, a todos e todas que me ajudaram e contribuíram, de uma maneira ou de outra, para a realização deste trabalho. Muito, mas muito obrigado!

EPÍGRAFE

... estamos vivendo tempos de 'obesidade da informação' e 'anorexia de reflexão'.

(GERALDI, 2007).

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	1
OBJETIVO GERAL	5
CAPÍTULO 1: DEFEITOS EM MANGAS <i>TOMMY ATKINS</i>	6
1.1. INTRODUÇÃO	6
1.2. OBJETIVOS	9
1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
1.3.1. PRODUÇÃO E MERCADO DE FRUTAS TROPICAIS	10
1.3.2. OS FRUTOS E SUAS CLASSIFICAÇÕES BÁSICAS	13
1.3.2.1. Classificações básicas dos frutos.....	14
1.3.3. O FRUTO MANGA	14
1.3.4. A VARIEDADE <i>TOMMY ATKINS</i>	19
1.3.5. ESTADO DA ARTE DA AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE FRUTAS ...	22
1.3.6. PRINCIPAIS DEFEITOS EM MANGAS	24
1.3.6.1. Principais danos físicos e mecânicos.....	24
1.3.6.2. Principais desordens fisiológicas.....	25
1.3.6.3. Principais desordens patológicas (doenças).....	32
1.3.6.4. Principais pragas (insetos).....	36
1.4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
1.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
1.5.1. Defeitos encontrados.....	45
1.5.2. Defeitos simultâneos.....	48
1.5.3. Coloração.....	49
1.6. CONCLUSÃO	51
1.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
CAPÍTULO 2: ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE IMAGENS APLICADAS À ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE MANGAS <i>TOMMY ATKINS</i>	56
2.1. INTRODUÇÃO	56
2.2. OBJETIVOS	57
2.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	57
2.3.1. Etapas de pré-processamento de imagens	57
2.3.2. Segmentação da imagem	57
2.3.2.1. Segmentação baseada em limiar.....	58
2.3.2.2. Segmentação baseada em regiões.....	58
2.3.2.3. Segmentação baseada em gradientes.....	58
2.3.2.4. Segmentação baseada em classificação.....	58
2.3.3. Segmentação de imagens em tons de cinza com Matlab®	59
2.3.4. Trabalhos de análise e processamento de imagens	59
2.4. MATERIAIS E MÉTODOS	61
2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
2.6. CONCLUSÃO	71
2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

CAPÍTULO 3: ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE IMAGENS COLORIDAS APLICADAS À ESTIMATIVA DE PESO DE MANGAS TOMMY ATKINS	74
3.1. INTRODUÇÃO	74
3.2. OBJETIVO	74
3.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	75
3.3.1. Pré-processamento de imagens	76
3.3.1.1. Remoção ou redução de ruído.....	76
3.3.1.2. Melhoria de contraste.....	77
3.3.2. Segmentação de imagens coloridas com Matlab®	78
3.3.2.1. Eficiência da segmentação com Matlab®.....	78
3.4. MATERIAIS E MÉTODOS	79
3.4.1. O algoritmo proposto.....	80
3.4.2. O programa desenvolvido.....	80
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
3.5.1. Testes e validação do algoritmo proposto.....	85
3.6. CONCLUSÃO	90
3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
CAPÍTULO 4: SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA ESTIMATIVA DE FIRMEZA DE MANGAS TOMMY ATKINS	91
4.1. INTRODUÇÃO	91
4.2. OBJETIVOS	92
4.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	92
4.3.1. Métodos não-destrutivos de avaliação de qualidade de frutas.....	92
4.3.2. Técnicas de estimativa de firmeza de frutas.....	93
4.3.2.1. Técnicas de impacto e vibração mecânica.....	95
4.3.2.2. Técnica de resposta acústica.....	97
4.3.3. Sensores MEMS.....	98
4.3.4. Teoria das Cores.....	99
4.4. MATERIAIS E MÉTODOS – PRIMEIRA ETAPA	100
4.4.1. O acelerômetro MEMS utilizado – primeira etapa.....	101
4.4.2. O microfone de eletreto utilizado – primeira etapa.....	101
4.4.3. A placa de aquisição de dados desenvolvida.....	103
4.4.4. Caracterização das placas de som utilizadas nos experimentos.....	110
4.4.5. Dispositivo Sensor 1 (DS1): microfone capturando som do impacto.....	113
4.4.5.1. Grandeza medida: som emitido pelo impacto de um bastão com a fruta.....	113
4.4.5.2. Descrição do DS1.....	113
4.4.5.3. Registro do sinal do DS1.....	114
4.4.5.4. Hipótese para DS1.....	115
4.4.5.5. Vantagens do DS1.....	116
4.4.5.6. Possíveis desvantagens do DS1.....	116
4.4.6. Dispositivo Sensor 2 (DS2): acelerômetro MEMS.....	116
4.4.6.1. Grandeza a ser medida: desaceleração do bastão.....	117

4.4.6.2.	Descrição do DS2	117
4.4.6.3.	Hipótese 2.....	118
4.4.6.4.	Vantagens do DS2.....	119
4.4.6.5.	Possíveis desvantagens do DS2.....	119
4.4.7.	Dispositivo Sensor 3 (DS3): microfone como acelerômetro.....	120
4.4.7.1.	Grandeza a ser medida: desaceleração do bastão	120
4.4.7.2.	Descrição do DS3	120
4.4.7.3.	Hipótese 3.....	121
4.4.7.4.	Vantagens do DS3.....	122
4.4.7.5.	Possíveis desvantagens do DS3.....	122
4.4.8.	Dispositivos Sensores 4 (DS4): microfones acoplados à fruta	123
4.4.8.1.	Grandeza a ser medida: velocidade do som na fruta	123
4.4.8.2.	Descrição dos sensores DS4.....	123
4.4.8.3.	Hipótese 4.....	124
4.4.8.4.	Vantagens dos sensores DS4.....	125
4.4.8.5.	Possíveis desvantagens dos sensores DS4.....	125
4.4.9.	Utilização do conjunto FACS1 mais placa de som	125
4.4.10.	Parâmetros de referência do estágio de maturação da fruta.....	128
4.4.10.1.	Metodologia de medição da cor da polpa.....	128
4.4.10.2.	Metodologia de medição de firmeza com o texturômetro	130
4.5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO – PRIMEIRA ETAPA.....	130
4.5.1.	Resultados da primeira etapa: fruta apoiada	131
4.5.1.1.	Parâmetros extraídos de curva do acelerômetro – 1ª etapa.....	132
4.5.1.2.	Parâmetros extraídos da curva do microfone de eletreto – 1ª etapa	136
4.5.1.3.	Parâmetro destrutivo de referência: cor da polpa – 1ª etapa	141
4.5.1.4.	Parâmetro destrutivo de referência: força de penetração – 1ª etapa	142
4.5.1.5.	Correlações entre os parâmetros de referência – 1ª etapa	146
4.5.1.6.	Correlação entre área da curva de penetração e acelerômetro – 1ª etapa	147
4.5.1.7.	Correlação entre área da curva de penetração e microfone – 1ª etapa ...	148
4.5.1.8.	Resultados preliminares - primeira etapa	149
4.6.	MATERIAIS E MÉTODOS – SEGUNDA ETAPA.....	150
4.6.1.	Acelerômetro, microfone, FACS1 e placas de som – 2ª etapa.....	151
4.6.2.	Dispositivo Sensor 1 (DS1): microfone capturando som do impacto.....	151
4.6.3.	Dispositivo Sensor 2 (DS2): acelerômetro MEMS – 2ª etapa	151
4.6.4.	Dispositivo Sensor 3 (DS3): microfone como acelerômetro – 2ª etapa	152
4.6.5.	Dispositivos Sensores 4 (DS4): microfones acoplados à fruta	152
4.6.6.	Métodos de referência do estágio de maturação da fruta.....	152
4.6.6.1.	Cor da Polpa.....	152
4.6.6.2.	Metodologia de medição de firmeza com o texturômetro	152
4.6.7.	Espectro de Resposta ao Choque (SRS - Shock Response Spectrum)	153
4.7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO – SEGUNDA ETAPA	156
4.7.1.	Desempenho dos parâmetros de referência combinados	157
4.7.2.	Resultados do acelerômetro – 2ª etapa.....	159
4.7.3.	Resultados do microfone – 2ª etapa.....	168

4.8.	CONCLUSÃO	175
4.9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	178
CAPÍTULO 5: FUSÃO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA SELEÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MANGAS PARA EXPORTAÇÃO		182
5.1.	INTRODUÇÃO	182
5.2.	OBJETIVO	182
5.3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	182
5.3.1.	Motivação para utilização da fusão de sensores	184
5.3.2.	Desvantagens da utilização da fusão de sensores	186
5.3.3.	Arquitetura de um sistema de fusão de sensores	186
5.3.4.	Configuração da fusão de sensores	187
5.3.4.1.	Configuração complementar	187
5.3.4.2.	Configuração competitiva	187
5.3.4.3.	Configuração cooperativa	188
5.3.5.	Redes neurais	188
5.3.5.1.	Conceitos básicos	188
5.3.5.2.	Tipos de RNA's	191
5.3.5.3.	Algoritmos de treinamento	191
5.4.	MATERIAIS E MÉTODOS	192
5.4.1.	Estimativa de peso da fruta	193
5.4.2.	Estimativa de firmeza a partir dos sinais do acelerômetro/ microfone	194
5.4.3.	Conjunto de dados de entrada e saída (alvo) da rede neural	194
5.4.4.	Programa e parâmetros utilizados para treinamento	195
5.5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	195
5.6.	CONCLUSÃO	198
5.7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
CONSIDERAÇÕES FINAIS		200
ANEXOS		203

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Produção mundial das chamadas frutas tropicais principais	10
Figura 2 -	Principais regiões produtoras de manga, abacaxi e mamão	11
Figura 3 -	Evolução das exportações de manga do Brasil (2004-2009)	13
Figura 4 -	O fruto manga.....	14
Figura 5 -	Mangueira centenária	15
Figura 6 -	Mangueira em fazenda produtora	16
Figura 7 -	Representação de um fruto típico de manga.....	19
Figura 8 -	Mangas Tommy Atkins embaladas para exportação.....	20
Figura 9 -	Algumas das principais variedades de manga produzidas no Brasil	21
Figura 10 -	Exemplos de danos por abrasão e por compressão	25
Figura 11 -	Exemplos de danos por frio	26
Figura 12 -	Exemplos de danos por calor.....	26
Figura 13 -	Exemplos de malformação.....	27
Figura 14 -	Queimaduras por látex.....	27
Figura 15 -	Queimaduras pelo Sol	28
Figura 16 -	Colapso interno.....	29
Figura 17 -	Semente gelatinosa	30
Figura 18 -	Cavidade na extremidade do pedúnculo	31
Figura 19 -	Escurecimento de lenticelas	32
Figura 20 -	Exemplos de mangas afetadas por antracnose	33
Figura 21 -	Podridão peduncular.....	34
Figura 22 -	Verrugose	35
Figura 23 -	Adulto de Ceratitis e adulto de Anastrepha	36
Figura 24 -	Danos causados pela mosca-da-fruta.....	37
Figura 25 -	Tripes.....	37
Figura 26 -	Danos causados por tripes	37
Figura 27 -	Danos causados por cochonilhas	38
Figura 28 -	Danos causados por ácaros	39
Figura 29 -	Ficha de seleção de mangas	43
Figura 30 -	Aparato construído para captura das imagens das mangas.....	44
Figura 31 -	Imagens típicas de frutas cujos defeitos foram catalogados	45
Figura 32 -	Defeitos encontrados em mangas do mercado local de C. Grande (PB).....	46
Figura 33 -	Exemplos de imagens de mangas	47
Figura 34 -	Ocorrências de defeitos simultâneos	48
Figura 35 -	Faixas de coloração das mangas Tommy Atkins	50

Figura 36 - Sistema de aquisição de imagens.....	62
Figura 37 - Câmera de baixo custo	63
Figura 38 - Placa de captura de vídeo	63
Figura 39 - Representação do aparato montado para captura de imagens.....	64
Figura 40 - Exemplos de imagens de mangas capturadas com aparato montado.....	65
Figura 41 - Imagens de frutas e segmentações com algoritmo-padrão do Matlab®.....	67
Figura 42 - Exemplos de segmentações de imagens.....	70
Figura 43 - Sistema típico, de baixo custo, para seleção e classificação de frutas.....	75
Figura 44 - Técnicas típicas de remoção ou redução de ruídos em imagens.....	77
Figura 45 - Técnicas típicas de melhoria de contraste de imagens	77
Figura 46 - Exemplo de imagens e segmentações com algoritmo-padrão do Matlab® ...	79
Figura 47 - Tela inicial do programa, em Matlab®, para segmentação de imagens	81
Figura 48 - Fluxograma simplificado do algoritmo proposto	82
Figura 49 - Comparativo de desempenho de segmentação de imagens de mangas	83
Figura 50 - Segmentações com algoritmo-padrão e algoritmo proposto	84
Figura 51 - Possíveis diâmetros máximos e mínimos, medidos manualmente.....	86
Figura 52 - Coeficientes de correlação entre parâmetros dimensionais e massas reais..	87
Figura 53 - Correlação entre área segmentada e massa (algoritmo-padrão)	88
Figura 54 - Correlação entre área segmentada e massa (algoritmo proposto)	88
Figura 55 - Equação que representa massas em função da área projetada.....	89
Figura 56 - Correlação entre massas reais e massas estimadas (método proposto)	89
Figura 57 - Penetrômetro Magness-Taylor.....	94
Figura 58 - Resistores sensíveis a força e strain-gages.....	96
Figura 59 - Acelerômetros piezoelétricos e MEMS.....	96
Figura 60 - Microfones de eletreto e dinâmicos.....	97
Figura 61 - Medidor de firmeza portátil.....	98
Figura 62 - Circuitos integrados sensores MEMS	99
Figura 63 - Representação gráfica do espaço de cor tridimensional Hunter L,a,b.....	100
Figura 64 - Algumas características técnicas do acelerômetro utilizado.....	102
Figura 65 - Direções, sentidos de sensibilidade e funções dos pinos do acelerômetro ...	102
Figura 66 - Microfone de eletreto utilizado nos experimentos	103
Figura 67 - Resposta em frequência do microfone de eletreto	103
Figura 68 - Protótipo da placa de interface FACS1	106
Figura 69 - Esquema elétrico da interface FACS1	108
Figura 70 - Layout da placa de circuito impresso (pci), lado solda, da FACS1	109
Figura 71 - Layout da pci (serigrafia e lado componentes) da FACS1.....	109

Figura 72 - Gráficos relativos aos testes da placa de som de um dos notebooks.....	112
Figura 73 - Aparato construído para captura do som de percussão da fruta	114
Figura 74 - Registros típicos de sons dos impactos do bastão com a fruta	115
Figura 75 - Acelerômetro MEMS ADXL250.....	117
Figura 76 - Posição do acelerômetro para registro da desaceleração do bastão	118
Figura 77 - Registros típicos de acelerações do bastão no ponto de percussão	118
Figura 78 - Posições do acelerômetro e do microfone de eletreto modificado.....	121
Figura 79 - Registros típicos de acelerações do bastão no ponto de percussão	121
Figura 80 - Aparato construído para captura de sons de percussão	123
Figura 81 - Registros típicos de sons do impacto do bastão com a fruta.....	124
Figura 82 - Sinais de áudio em dois canais, capturados com o programa Audacity	126
Figura 83 - Técnica de conversão de nível implementada pela placa FACS1	127
Figura 84 - Planos de corte das frutas, para medição de cor e força de penetração	128
Figura 85 - Exemplos de mangas cortadas.....	129
Figura 86 - Colorímetro Miniscan XE Plus (Hunterlab)	129
Figura 87 - Analisador de Textura (TA-XT2, da <i>Stable Microsystem</i>)	131
Figura 88 - Curva típica do acelerômetro no momento do impacto do bastão.....	133
Figura 89 - Forma de onda típica do microfone no momento do impacto do bastão	137
Figura 90 - Comparativo entre formas de onda típicas do acelerômetro e microfone.....	139
Figura 91 - Comparativo entre as amplitudes das transformadas rápidas de Fourier.....	140
Figura 92 - Correlação entre amplitudes das curvas do acelerômetro e microfone	141
Figura 93 - Exemplos de registro de medição de firmeza com o analisador de textura...	144
Figura 94 - Exemplo de registro de medição de firmeza (parâmetros calculados)	145
Figura 95 - Aparato utilizado na segunda etapa de experimentos.....	151
Figura 96 - Espectro de resposta ao choque um sinal típico do acelerômetro.....	155
Figura 97 - Espectro de resposta ao choque de um sinal típico do microfone.....	155
Figura 98 - Heterocedasticidades observadas nos gráficos	158
Figura 99 - Correlação da amplitude com o parâmetro combinado TA/FC4mm	159
Figura 100 - Correlação entre Amp-m e FC4mm, acelerômetro, 40°	164
Figura 101 - Correlação linear entre Amp-1 e TA/FC4mm, acelerômetro, 40°	167
Figura 102 - Correlação linear entre Amp+1 do acelerômetro e do microfone	168
Figura 103 - Correlação não-linear entre Amp-m e FC4mm do microfone, 40°.....	169
Figura 104 - Correlação linear entre Amp1 e o TA/FC4mm, microfone, 40°.....	173
Figura 105 - Ilustração de um dos “sistemas de fusão de sensores” humanos	183
Figura 106 - Arquitetura centralizada	186
Figura 107 - Arquitetura distribuída.....	187

Figura 108 - Neurônio e modelo em uma RNA	190
Figura 109 - Exemplo de uma rede neural direta	190
Figura 110 - Proposta de fusão de sensores.....	193

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção brasileira de frutas (2009).....	6
Tabela 2 - Produção brasileira de manga por Estado (2007).....	7
Tabela 3 - Principais frutas frescas exportadas pelo Brasil (2010/2009).....	12
Tabela 4 - Principais classificações dos frutos.....	15
Tabela 5 - Principais tipos de frutos simples.....	17
Tabela 6 - Componentes para um padrão de qualidade para frutas e verduras.....	23
Tabela 7 - Características do lote de mangas e condições do experimento.....	42
Tabela 8 - Faixas de coloração tipicamente utilizadas.....	49
Tabela 9 - Etapas do programa de segmentação das imagens.....	69
Tabela 10 - Métodos não-destrutivos de avaliação da qualidade de frutas.....	93
Tabela 11 - Características das placas de som dos notebooks utilizados.....	111
Tabela 12 - Parâmetros e condições do experimento.....	130
Tabela 13 - Parâmetros calculados das curvas do acelerômetro, 15°, primeira etapa.....	133
Tabela 14 - Parâmetros calculados das curvas do acelerômetro, 30°, primeira etapa.....	134
Tabela 15 - Parâmetros calculados das curvas do acelerômetro, 45°, primeira etapa.....	135
Tabela 16 - Parâmetros calculados das ondas do microfone, 15°, primeira etapa.....	137
Tabela 17 - Parâmetros calculados das ondas do microfone, 30°, primeira etapa.....	138
Tabela 18 - Parâmetros calculados das ondas do microfone, 45°, primeira etapa.....	139
Tabela 19 - Cores: Tristimulus Values XYZ D65/10° e Color Plot L*a*b* D65/10°.....	143
Tabela 20 - Cores: Colorimeter Color L*a*b* C/10° e Colorant Strenght L*a*b* D65/10°.....	143
Tabela 21 - Parâmetros relativos à firmeza, método destrutivo.....	146
Tabela 22 - Coeficientes de correlação entre parâmetros de referência – 1ª etapa.....	147
Tabela 23 - Coeficientes de correlação entre referência e acelerômetro – 1ª etapa.....	148
Tabela 24 - Coeficientes de correlação referência e microfone – 1ª etapa.....	149
Tabela 25 - Parâmetros e condições do experimento.....	153
Tabela 26 - Parâmetros obtidos das curvas do acelerômetro – 15°, 2ª etapa.....	160
Tabela 27 - Parâmetros obtidos das curvas do acelerômetro – 30°, 2ª etapa.....	161
Tabela 28 - Parâmetros obtidos das curvas do acelerômetro – 40°, 2ª etapa.....	162
Tabela 29 - Parâmetros de referência para cálculos das correlações lineares.....	165
Tabela 30 - Coeficientes de correlação entre referência e acelerômetro, 15°, 2ª etapa.....	166
Tabela 31 - Coeficientes de correlação entre referência e acelerômetro, 30°, 2ª etapa.....	166
Tabela 32 - Coeficientes de correlação entre referência e acelerômetro, 40°, 2ª etapa.....	167
Tabela 33 - Parâmetros obtidos das curvas do microfone – 15°, 2ª etapa.....	170
Tabela 34 - Parâmetros obtidos das curvas do microfone – 30°, 2ª etapa.....	171
Tabela 35 - Parâmetros obtidos das curvas do microfone – 40°, 2ª etapa.....	172

Tabela 36 - Coeficientes de correlação entre referência e microfone, 15°, 2ª etapa	173
Tabela 37 - Coeficientes de correlação entre referência e microfone, 30°, 2ª etapa	174
Tabela 38 - Coeficientes de correlação entre referência e microfone, 40°, 2ª etapa	174
Tabela 39 - Dados de entrada e de saída (alvo) da RNA.....	195
Tabela 40 - Parâmetros de treinamento da RNA	196
Tabela 41 - Redes neurais geradas com 3 entradas (sem a massa da fruta)	196
Tabela 42 - Redes neurais geradas com 4 entradas, incluída a massa da fruta	197

LISTA DE ABREVIATURAS

BFGS	Método (algoritmo) para resolução de problemas de otimização não-linear (<i>Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno</i>).
CCD	Dispositivo de carga acoplada (<i>Charge-Coupled Device</i>). Tecnologia de construções de sensores de imagem.
CEASA	Central de Abastecimento de Hortifrutigranjeiros (Campina Grande – PB)
CIELAB	Sistema (espaço) de cor proposto pela Comissão Internacional de Iluminação (<i>Commision Internationale L'Eclairage – CIE</i>).
dB	Decibel. Unidade logarítmica que indica a razão entre uma quantidade física (geralmente potência ou intensidade) e um nível de referência especificado.
DSP	Processador digital de sinais (<i>Digital Signal Processor</i>).
ERC	Espectro de Resposta ao Choque.
EV	Unidade de exposição (<i>Exposure Value</i>), parâmetro existente em câmeras de vídeo e câmeras fotográficas digitais.
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
LAPPA	Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agroindustriais
LED	Diodo emisso de luz (<i>Light-Emitting Diode</i>).
MDF	Placa de fibra de madeira de média densidade (<i>Medium-Density Fiberboard</i>).
MEMS	Sistemas micro-eletromecânicos (<i>Micro Eletro-Mechanical Systems</i>).
MLP	Perceptron multicamadas (<i>MultiLayer Perceptron</i>). Modelo de rede neural artificial de múltiplas camadas.
NTSC	Padrão de televisão analógica largamente utilizado no mundo (<i>National Television System(s) Committee</i>).
ONU	Organização das Nações Unidas.
PCI	Barramento de comunicação de dados para interfaceamento de periféricos (<i>Peripheral Component Interconnect</i>).
PL	Padrão para lâmpadas fluorescentes compactas.
RBF	Rede de função de base radial (<i>Radial Basis Function</i>). Rede neural artificial que usa funções de base radial como funções de ativação.
RGB	Sistema de cores R (<i>red</i>), G (<i>green</i>) e B (<i>blue</i>) em dispositivos de vídeo.
ROI	Região de interesse de uma imagem (<i>Region Of Interest</i>).
SRS	<i>Shock Response Spectrum</i> . O mesmo que Espectro de Resposta ao Choque.
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UN	United Nation (Organização das Nações Unidas)
XYZ	Sistema (espaço) de cor também criado pela <i>CIE</i> .

RESUMO

Produtos agrícolas, em especial frutas e hortaliças, estão sujeitos a danos físicos e fisiológicos durante praticamente todas as fases do processo produtivo: plantio, crescimento, colheita, transporte para galpões de processamento, lavagem e limpeza, seleção e classificação, embalagem e transporte até o consumidor final. Um dos fatores decisivos para a garantia de competitividade, em mercados cada vez mais globalizados, é a capacidade de uma determinada cadeia de produção de fornecer produtos de alta qualidade, baixo custo e adequados ao consumidor final, além de reduzir custos, perdas e danos aos menores níveis possíveis, compatíveis com os obtidos pelos produtores concorrentes. Neste contexto, diversas pesquisas têm sido realizadas, no mundo inteiro, objetivando o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias, incluindo sensores e sistemas de automação, para avaliação da qualidade, seleção e classificação de frutas e produtos hortícolas em geral. Progressos significantes têm sido obtidos na avaliação de parâmetros qualitativos internos e externos, principalmente em nível de laboratório. No entanto, a real automação, a baixo custo, das linhas de processamento pós-colheita ainda é um desafio, devido à complexidade do problema da seleção: as frutas e produtos hortícolas possuem, intrinsecamente, uma maior variabilidade do que os produtos equivalentes processados, devido às próprias características particulares durante as diversas etapas da produção. Todas estas etapas, desde o plantio, passando pelo crescimento, colheita e pós-colheita, além do clima e eventuais doenças e pragas, afetam diretamente a variabilidade e a qualidade do produto final, elevando os investimentos em automação necessários para uma adequada seleção e classificação com foco no consumidor final. Além da pesquisa com vistas à automação destes processos, é necessário o desenvolvimento de equipamentos de classificação por volume/peso com tecnologia nacional, mais acessível, de baixo custo de aquisição e com menores custos de operação e manutenção, para que possam ser utilizados por pequenas cooperativas de produtores rurais. O Capítulo 1 teve como objetivo identificar as características morfológicas e os principais defeitos encontrados em mangas *Tommy Atkins*. No Capítulo 2 o objetivo foi obter estimativas de parâmetros dimensionais dos frutos por meio de imagens em preto e branco, utilizando câmeras de vídeo de baixo custo. No Capítulo 3, a pesquisa destinou-se a estimar a massa (peso) das mangas por meio de imagens coloridas, capturadas com câmera fotográfica digital comercial. O objetivo do Capítulo 4 foi o de utilizar tecnologias sensoriais mecânicas diferentes, de baixo custo, simultâneas e integradas, para estimativa de firmeza das frutas. O Capítulo 5 teve por finalidade desenvolver uma metodologia de fusão de sensores visando uma melhor estimativa não-destrutiva de firmeza, demonstrando a viabilidade de utilização desta técnica para a determinação de um índice de firmeza de mangas *Tommy Atkins* a partir de parâmetros extraídos de dados de 3 sensores diferentes, sendo uma câmera de vídeo e dois sensores de aceleração, todos de baixo custo. Para a integração dos dados destes sensores foram utilizadas redes neurais artificiais. As considerações finais descrevem as seguintes principais contribuições diretas: modificações em algoritmo-padrão (método Otsu do *Matlab®*) de processamento de imagens de mangas, de modo a melhorar a segmentação da imagem da fruta; identificação do parâmetro *área projetada superior* como melhor estimador de massa de mangas *Tommy Atkins*, via processamento de imagens capturadas com câmeras de baixo custo; proposição de um novo parâmetro combinado de referência para estimativa de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, na técnica de impacto de pequena massa; demonstração da viabilidade de utilização de acelerômetro *MEMS* e microfone de eletreto vedado, ambos de baixo custo, para estimativa de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, na técnica de impacto de pequena massa; utilização do Espectro de Resposta ao Choque de um acelerômetro *MEMS* e da amplitude (pico) do sinal de um microfone de eletreto vedado, como estimadores não-destrutivos de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, na técnica de impacto de pequena massa; uso do centro de percussão para posicionamento dos sensores de aceleração na técnica de impacto de pequena massa; desenvolvimento de uma placa de conversão de nível (FACS1), de baixo custo, para interfaceamento direto de sensores de aceleração com placas de som de microcomputadores; a utilização de redes neurais artificiais como técnica de fusão de sensores melhorou significativamente (19,5%) as correlações dos estimadores não-destrutivos de firmeza com relação ao(s) parâmetro(s) de referência, em comparação com os estimadores isolados.

Palavras-chave: mangas *Tommy Atkins*, firmeza, fusão de sensores, métodos não-destrutivos, processamento de imagens.

ABSTRACT

Agricultural products, especially fruits and vegetables, are subject to physical and physiological damage during all production steps: planting, growing, harvesting, transport to packing houses, washing and cleaning, sorting and classification, packaging and transportation to the final consumer. A key factor to ensuring competitiveness in globalized markets is the ability of a given production chain to provide high quality products, with low cost and suitable for the final consumer, while reducing costs, losses and damage to the lowest possible levels, compatible with those obtained by competitive producers. In this context, many studies have been carried out worldwide, aiming at the development and application of new technologies, including sensors and automation systems, for quality assessment, selection and classification of fruits and vegetables in general. Significant progress has been achieved in the evaluation of internal and external qualitative parameters, especially at laboratory level. However, real automation of post-harvest processing lines, at low cost, is still a challenge, due to the complexity of sorting: fruits and vegetables have variability inherently greater than the equivalent processed products, especially as a result of their own particular characteristics during the production stages. All of these stages, from planting through growth, harvest and post-harvest, including climate, pests and diseases, affect directly the variability and the final quality of the product, increasing investments in automation for a proper selection and classification with focus on the final consumer. In addition to research aimed at automation of these processes, it is necessary to develop grading equipment by volume / weight with national (Brazilian) technology. Such equipments should be more accessible, have low cost and present lower operation and maintenance costs, so they can be used by small farmer cooperatives. In Chapter 1, the morphological characteristics and the main defects in *Tommy Atkins* mangoes were identified. In Chapter 2, the goal was to assess the dimensional parameters of the fruit, using b&w images and low cost video cameras. In Chapter 3, the work aimed to estimate the mass of mangoes using color images captured with a commercial digital camera. The objective of Chapter 4 was to use different mechanical sensor technologies, of low cost, simultaneous and integrated ones, for fruit firmness assessment. The purpose of Chapter 5 was to develop a methodology for sensor fusion for a better estimate of non-destructive firmness, demonstrating this technique feasibility for the determination of a maturity index by means of parameters extracted from data of three different sensors, a video camera and two acceleration sensors, all at low cost. Artificial neural networks were used for sensor fusion. Final considerations describe the main contributions of this work: modification in the Matlab® standard algorithm (Otsu's method) for image processing, in order to improve the segmentation of fruit images; identification of the projected area parameter as the best estimator of the mass of *Tommy Atkins* mangoes, through captured image processing with low cost cameras; proposition of a new combined reference parameter for estimating the firmness of *Tommy Atkins* mangoes, when using the low-mass impact technique; demonstration of the feasibility of *MEMS* accelerometer use and a sealed microphone electret, both of low cost, to estimate the firmness of *Tommy Atkins* mangoes, when using the low-mass impact technique; use of the Shock Response Spectrum of a *MEMS* accelerometer and the signal amplitude (peak) of a sealed electret microphone as non-destructive firmness estimators of *Tommy Atkins* mangoes, when using the low-mass impact technique; use of percussion point for positioning the acceleration sensors when using the low-mass impact technique; development of a level conversion board (FACS1), of low cost, for direct interfacing between acceleration sensors and computer sound cards; use of artificial neural networks, as sensor fusion technique, improved significantly (about 19.5%) the correlations of non-destructive firmness estimators in relation to the reference parameters, in comparison with the estimators used in separate.

Keywords: *Tommy Atkins* mangoes, firmness, sensor fusion, non-destructive methods, image processing.

APRESENTAÇÃO

Produtos agrícolas, em especial frutas e hortícolas, estão sujeitos a danos físicos e fisiológicos durante praticamente todas as fases do processo produtivo: plantio, crescimento, colheita, transporte para galpões de processamento, lavagem e limpeza, seleção e classificação, embalagem e transporte até o consumidor final. Um dos fatores decisivos para a garantia de competitividade, em mercados cada vez mais globalizados, é a capacidade de uma determinada cadeia de produção de fornecer produtos de qualidade, baixo custo e adequados ao consumidor final, além de reduzir custos, perdas e danos aos menores níveis possíveis, compatíveis com os obtidos pelos produtores concorrentes.

Além destes fatores, é cada vez maior a necessidade de se ofertar à população produtos mais saudáveis, evitando-se doenças e riscos à saúde decorrentes da ingestão de elevados níveis de agrotóxicos, de fungos, bactérias, pragas ou de produtos excessivamente maduros ou podres.

Neste contexto, diversas pesquisas têm sido realizadas, no mundo inteiro, objetivando o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias, incluindo sensores e sistemas de automação, para avaliação da qualidade, seleção e classificação de frutas e produtos hortícolas em geral. Progressos significantes têm sido obtidos na avaliação de parâmetros qualitativos internos e externos, principalmente em nível de laboratório. No entanto, a real automação, **a baixo custo**, das linhas de processamento pós-colheita ainda é um desafio, devido à complexidade do problema da seleção: as frutas e produtos hortícolas possuem, intrinsecamente, uma maior variabilidade do que os produtos equivalentes processados, devido às próprias características particulares durante as diversas etapas da produção. Todas estas etapas, desde o plantio, passando pelo crescimento, colheita e pós-colheita, além do clima e eventuais doenças e pragas, afetam diretamente a variabilidade e a qualidade do produto final, elevando os investimentos em automação necessários para uma adequada seleção e classificação com foco no consumidor final.

No caso específico da manga brasileira para exportação, oriunda principalmente do Vale do São Francisco, além das diversas etapas manuais que ocorrem no campo, parte significativa dos processos de avaliação de qualidade, seleção e classificação pós-colheita ainda são executadas da forma visual/manual, sujeitos a aspectos subjetivos e à variabilidade de conceitos e decisões dos(as) operários(as) selecionadores(as).

Estes processos de avaliação da qualidade, seleção e classificação de frutas e hortícolas em geral e, em particular, da manga brasileira para exportação, executados em galpões de processamento, constituem um desafio de grandes proporções, devido à complexidade das variáveis envolvidas. Para citar somente alguns dos problemas existentes:

- tamanhos e colorações diferentes dos frutos;
- grande número de defeitos externos potenciais;
- defeitos internos potenciais de difícil identificação;
- variabilidade intrínseca dos produtos naturais;
- variações climáticas durante plantio/crescimento;
- incidência de fungos, bactérias e pragas;
- deficiências nutricionais de solos;
- escassez ou excesso de água;
- escassez ou excesso de radiação solar no ciclo produtivo;
- plantio, colheita e manuseio incorretos;
- má uso de defensivos agrícolas, com impactos na qualidade;
- contaminações em toda a cadeia produtiva.

A evolução tecnológica das últimas décadas, por outro lado, está permitindo um incremento significativo da automação nos grandes galpões de processamento (*packing houses*), cujos procedimentos eram totalmente manuais e baseados unicamente nos sentidos humanos - extremamente complexos - que avaliam simultaneamente uma série de características dos produtos: tamanho, peso, coloração, firmeza, odor, defeitos externos, má formação, arranhões, machucaduras, esmagamentos, sujeiras, sinais de doenças e pragas, além da

comparação imediata com outros produtos do mesmo lote nas esteiras de seleção. Por outro lado, muitas pesquisas ainda são necessárias, pois a maioria destas características ainda não está sendo avaliada de maneira automática.

Exemplos de processos pós-colheita ainda não automatizados em galpões de processamento de mangas para exportação, no Vale do São Francisco, são:

- seleção por defeitos externos;
- seleção por defeitos internos;
- seleção por níveis de maturação/firmeza;
- embalagem em caixas-padrão.

Além da pesquisa com vistas à automação destes processos, é necessário o desenvolvimento de equipamentos de classificação por volume/peso com tecnologia nacional, mais acessível, de baixo custo de aquisição e com menores custos de operação e manutenção, para que possam ser utilizados por pequenas cooperativas de produtores rurais.

Dentro do esforço de desenvolvimento de novos equipamentos de seleção e classificação, os sensores ocupam importante papel, uma vez que a metodologia a ser adotada depende fundamentalmente dos dispositivos a serem utilizados. Por outro lado, apesar da instalação de um único sensor ser a configuração mais simples para a realização de uma tarefa de medição, pode ser necessário adicionar outros sensores para executar a compensação e correção de informações erradas ou incertas, o que leva ao conceito de *fusão de sensores*. Por definição, a fusão de sensores usa dois ou mais sensores para executar uma tarefa comum (RUHM, 2007).

Em outras palavras, a “fusão de sensores é o processo de integração de dados de diferentes sensores, visando obter estimativas para uma determinada grandeza medida, cuja precisão e confiabilidade sejam superiores às aquelas obtidas utilizando cada sensor isoladamente” (MEDEIROS, 2006).

A fusão de sensores combina dados de sensores, ou derivados destes, de modo que a informação resultante é, de algum modo, mais completa ou mais precisa do que a obtida quando os sensores são usados individualmente. A fusão de sensores:

- é uma abordagem colaborativa;
- não possui uma metodologia única, consolidada;
- não é necessariamente mais cara;
- não é a simples acumulação de vários sensores;
- caracteriza-se pela dificuldade em se escolher a técnica - definir o modelo - de fusão adequada.

Por outro lado, a despeito dos diversos métodos não-destrutivos utilizados para seleção e classificação de frutas, poucas linhas de pesquisa utilizam tecnologias sensoriais diferentes, simultaneamente, configurando uma metodologia de fusão de sensores que poderia fornecer melhores resultados e melhor relação custo-benefício do que uma única tecnologia sensorial complexa e de alto custo (STEINMETZ et. al., 1999; ENGEL, 2007).

Assim, este trabalho se propõe a contribuir para o desenvolvimento de tecnologia nacional de seleção e classificação automática de frutas para exportação. A necessária delimitação do escopo foi definida a partir de um estudo de caso com a manga *Tommy Atkins*, a variedade mais exportada, analisando-se previamente diversas alternativas de sensores e propondo-se metodologias para a fusão de dados destes sensores, sempre com foco em uma abordagem de baixos custos de implantação, operação e manutenção de possíveis sistemas automatizados baseados nesta proposta.

Em outras palavras, a idéia, neste trabalho, é integrar (no sentido da “fusão”) os dados dos diferentes sensores propostos para promover uma melhor seleção e classificação da manga, a baixo custo. Dentro deste contexto, este trabalho tem os seguintes objetivos:

OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o de propor metodologias para o desenvolvimento de um sistema de baixo custo, baseado em fusão de sensores, para automatização da seleção e classificação de mangas (*Mangifera indica* L., variedade *Tommy Atkins*) para exportação.

Para melhor estudar e organizar esta pesquisa, a Tese foi dividida em 5 capítulos, que podem ser considerados como objetivos específicos.

O **Capítulo 1** teve como objetivo identificar as características morfológicas e os principais defeitos encontrados na manga *Tommy Atkins*, como subsídio ao desenvolvimento das tecnologias e metodologias propostas. No **Capítulo 2** o objetivo foi o de obter estimativas de parâmetros dimensionais dos frutos, por meio de imagens em preto e branco, utilizando câmeras de vídeo de baixo custo.

No **Capítulo 3**, a pesquisa destinou-se a estimar a massa (peso) das mangas, também por meio de imagens, desta vez coloridas, capturadas com câmera fotográfica digital comercial. O objetivo do **Capítulo 4** foi o de utilizar tecnologias sensoriais mecânicas diferentes, de baixo custo, simultâneas e integradas, para estimativas de firmeza das frutas.

O **Capítulo 5** teve por finalidade desenvolver uma metodologia de fusão de sensores visando uma melhor estimativa não-destrutiva de firmeza, demonstrando a viabilidade de utilização desta técnica para a determinação de um índice de firmeza de mangas *Tommy Atkins* a partir de parâmetros extraídos de dados de 3 sensores diferentes, sendo uma câmera de vídeo e dois sensores de aceleração, todos de baixo custo. Para a integração dos dados destes sensores foram utilizadas redes neurais artificiais. As considerações finais descrevem as principais contribuições do trabalho.

CAPÍTULO 1

DEFEITOS EM MANGAS *TOMMY ATKINS*

1.1. INTRODUÇÃO

A produção brasileira de frutas, em 2009, é mostrada na Tabela 1. Foram produzidas cerca de 1,2 milhão de toneladas de mangas, em cerca de 75,4 mil hectares (INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS, 2009a).

Tabela 1 - Produção brasileira de frutas (2009)

Produção Brasileira de Frutas 2009				
Frutas	Área (ha)	Volume (Ton)	Valor (Mil Reais)	% Partic. Vol.
Laranja	802.528	17.618.450	4.695.049	42,93
Banana	483.562	6.783.482	3.160.040	16,53
Abacaxi*	61.990	2.978.256	1.076.305	7,26
Melancia	94.871	2.056.309	707.217	5,01
Coco-da-baía	284.951	1.973.366	755.883	4,81
Mamão	34.379	1.792.594	1.348.294	4,37
Uva	81.677	1.365.491	1.612.043	3,33
Maçã	39.081	1.222.885	943.761	2,98
Manga	75.416	1.197.694	602.125	2,92
Tangerina	54.909	1.094.429	524.944	2,67
Limão	41.388	972.437	435.330	2,37
Maracujá	50.853	718.798	674.002	1,75
Melão	17.559	402.959	269.379	0,98
Goiaba	15.048	297.377	213.482	0,72
Pêssego	19.102	216.236	244.359	0,53
Caqui	8.740	171.555	146.674	0,42
Abacate	8.509	139.089	66.158	0,34
Figo	3.072	24.146	37.692	0,06
Pera	1.404	14.856	18.317	0,04
Marmelo	211	975	1.614	0,00
Total	2.179.250	41.041.384	17.532.668	100,00

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS (2009a).

A produção brasileira de mangas em 2007, por Estado, é mostrada na Tabela 2. Pode-se observar que a Bahia foi o maior produtor, respondendo por quase 50% da produção nacional naquele ano (INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS, 2009a).

De acordo com CHOUDHRY & COSTA (2001):

...a manga talvez seja a fruta brasileira com maior potencial de crescimento de suas exportações no curto prazo. As potencialidades decorrem do fato de o produto ser competitivo no comércio internacional, tanto em termos de preços/custos de produção, como em termos de qualidade. Beneficia ainda a fruta de origem brasileira o fato de ser possível, com o recurso de técnicas de indução floral, explorar brechas de mercado, quando a oferta dos países concorrentes se reduz por problemas de entressafra.

Tabela 2 - Produção brasileira de manga por Estado (2007).

Produção Brasileira de Manga por Estado 2007			
Estados	Área (ha)	Volume (Ton)	Valor (Mil R\$)
Bahia	30.420	634.715	354.592
São Paulo	13.843	193.151	72.074
Pernambuco	9.963	183.496	99.329
Minas Gerais	7.350	76.515	58.516
Ceará	4.918	40.948	14.416
Rio Grande do Norte	2.984	37.516	19.148
Sergipe	1.243	27.681	13.104
Paraíba	2.681	22.669	5.872
Piauí	1.331	12.156	3.328
Paraná	673	10.509	4.916
Alagoas	1.014	8.109	1.370
Espírito Santo	447	6.629	2.003
Rio de Janeiro	272	4.899	1.915
Maranhão	743	3.496	2.056
Tocantins	344	2.102	823
Mato Grosso	150	1.767	686
Rondônia	180	1.656	807
Amazonas	314	859	112
Rio Grande do Sul	150	854	817
Distrito Federal	73	819	899
Goiás	73	792	395
Acre	48	480	48
Mato Grosso do Sul	32	366	225
Total	79.246	1.272.184	657.451

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS (2009a).

Na situação atual, a seleção e embalagem manuais limitam a competitividade brasileira no mercado mundial de frutas e produtos hortícolas. Concorrentes diretos, como os países do extremo-orient (Índia, China, Tailândia e Paquistão, entre outros), estão realizando grandes investimentos em P&D para automação dos processos de seleção enquanto que, no Brasil, pouquíssimas pesquisas têm sido realizadas neste sentido, prevalecendo a importação de praticamente todos os principais equipamentos de processamento e classificação atualmente utilizados: esteiras transportadoras, balanças contínuas (dinâmicas), tanques de banhos térmicos, máquinas de corte de pedúnculo, entre outros. Os

altos investimentos necessários para aquisição, instalação, operação e manutenção destes equipamentos, muitas vezes, inviabilizam a sua utilização, reduzindo a nossa competitividade frente aos processos automatizados dos concorrentes internacionais, uma vez que os custos da pós-colheita “representam cerca de 50% dos custos totais de produção” (MOURA, 2009).

Neste contexto, o desenvolvimento de pesquisas e aplicação de tecnologias nacionais adaptadas à realidade local, que objetivem a melhoria da qualidade, seja no campo ou na fase de pós-colheita, são fatores primordiais para a otimização de processos, redução de custos, melhoria da qualidade e aumento da competitividade de nossas frutas tropicais, que são exportadas para países desenvolvidos, que impõem, cada vez mais, rígidos padrões de aceitabilidade, qualidade e segurança alimentar.

Considerando o caso particular das frutas tropicais, o desenvolvimento e aplicação de sensores na avaliação da qualidade têm significativa importância para o Brasil, na medida em que somos um dos maiores exportadores de frutas tropicais do mundo. Especial atenção tem sido dada às chamadas frutas tropicais principais – manga, abacaxi, abacate, mamão - além da uva, banana, melão, melancia, goiaba e maracujá.

Se, por um lado, as frutas tropicais representam importante papel nas exportações brasileiras, por outro, os consumidores, tanto do mercado internacional quanto do mercado nacional, estão, cada vez mais, cuidadosos com sua saúde e atentos à importância das frutas e verduras na sua dieta, como fonte de provimento de melhorias nutricionais. Estes consumidores estão demandando por qualidade destes produtos em várias características, como consistência, firmeza, estado de maturação, textura, valores nutricionais, inexistência de agrotóxicos, inexistência de danos e machucados, aparência e frescor.

O entendimento prévio das características morfológicas da variedade sob estudo e dos principais defeitos que ocorrem no fruto são fundamentais para a definição das metodologias a serem aplicadas com vistas à seleção e

classificação automatizadas. Este capítulo descreve os experimentos realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agroindustriais (LAPPA/UFCG) com os objetivos de se conhecer melhor aquelas características, quantificarem-se os defeitos comumente encontrados e a simultaneidade de ocorrências destes defeitos.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta etapa foi a familiarização com as características morfológicas e com os principais defeitos que ocorrem na variedade *Tommy Atkins*. Para a consecução do objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- identificar as características visuais dos principais defeitos em mangas *Tommy Atkins* vendidas no mercado local de Campina Grande;
- identificar os principais defeitos, em ordem de importância (percentual de ocorrências);
- identificar o percentual de ocorrências de defeitos simultâneos (múltiplos) em uma mesma fruta, permitindo uma melhor estimativa da complexidade das técnicas de processamento de imagens necessárias para possível seleção automatizada por defeitos;
- identificar as faixas de coloração das frutas, ou seja, o percentual da área superficial com coloração vermelho púrpura intenso, que é um dos indicadores importantes para decisão se uma fruta será selecionada para o mercado local ou para exportação;
- criar um banco de imagens, juntamente com os respectivos pesos das mangas, que pudesse subsidiar estudos posteriores de estimativa de massa (peso) por processamento de imagens.

1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3.1. Produção e mercado de frutas tropicais

A produção mundial de frutas tropicais foi de cerca de 67,6 milhões de toneladas em 2005 (Figura 1). A manga é a fruta dominante neste mercado, com uma produção global de 24,3 milhões de toneladas, correspondendo a 35,9% da produção mundial de frutas tropicais. O abacaxi atingiu 15,5 milhões de toneladas, (22,9%), seguido do mamão (8,5 milhões de toneladas, 12,6%) e do abacate (3,3 milhões de toneladas, 4,9%). As frutas tropicais que foram negociadas em volumes menores, como as lichias, duriã, rambotã, goiaba e maracujá, registraram uma produção de 16 milhões de toneladas em 2005, correspondendo a cerca de 23,7% da produção total de frutos tropicais (FAO/UN, 2006).

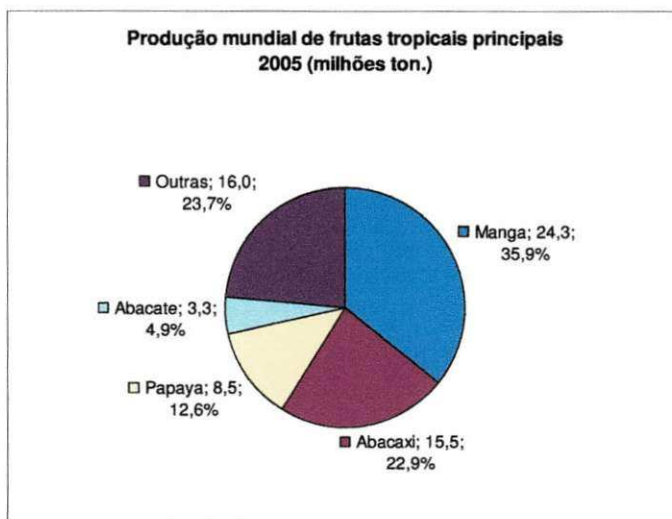


Figura 1 - Produção mundial das chamadas frutas tropicais principais.
Fonte: Adaptado de FAO/UN (2006).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO/UN, 2006), a produção e o comércio mundial de frutas tropicais frescas deverão expandir-se durante a próxima década (2010-2019). Os países em desenvolvimento respondiam, em 2005, por 98% da produção total, enquanto os países desenvolvidos eram responsáveis por 80% da importação. As frutas

tropicais principais (manga, abacaxi, mamão e abacate) eram responsáveis, naquele ano, por cerca de 75% da produção mundial de frutas frescas tropicais. A manga continuava sendo a fruta tropical de maior produção, a nível mundial (FAO/ONU, 2004).

Países do extremo-orientes, principalmente a Índia, China, Tailândia e Paquistão dominavam a produção, em 2005, de manga, abacaxi e mamão, respondendo por cerca de 72%, 52% e 46% da produção mundial, respectivamente (Figura 2). O extremo-orientes também tinha a maior diversidade de frutas tropicais de menor mercado. Por outro lado, a América Latina e o Caribe formavam a segunda maior região produtora do mundo, respondendo por 62% da produção global de abacate, 37% do mamão, 29% do abacaxi e 17% da manga. A África estava num distante terceiro lugar, com 16%, 11% e 10% da produção mundial de abacaxi, manga e abacate, respectivamente, todos dados de 2005. (FAO/UN, 2006). Em relação à situação atual, não houve mudanças significativas deste cenário (FAO/UN, 2006).

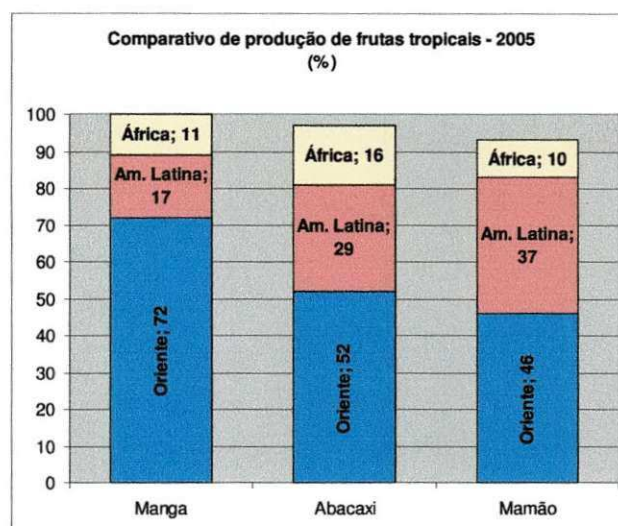


Figura 2 - Principais regiões produtoras de manga, abacaxi e mamão.
Fonte: Adaptado de FAO/UN (2006).

As frutas tropicais são muito importantes para a segurança alimentar de países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, tanto do ponto de vista nutricional quanto por sua contribuição às receitas advindas das exportações.

Ainda de acordo com a FAO/UN (2006), “a maioria das frutas tropicais era consumida no próprio país produtor (em torno de 90%, média mundial); outros 5% eram exportados como frutas frescas e os 5% restantes exportados na forma de produtos industrializados (processados)”.

A despeito da pequena parcela de 5% de frutas tropicais frescas, o valor deste negócio mundial é significativo, com as exportações gerando em torno de 2,3 bilhões de dólares, contra 1,6 bilhão de dólares destas mesmas frutas, processadas. Comparativamente, o mercado mundial, em 2005, foi de 4,8 bilhões, 3,4 bilhões, 2,5 bilhões e 1,1 bilhão de dólares para bananas, maçãs, laranjas e peras, respectivamente (FAO/UN, 2006).

A Tabela 3 apresenta as principais frutas frescas exportadas pelo Brasil no período 2009/2010, com suas respectivas receitas, somando cerca de 760 mil toneladas e gerando uma receita de 610 milhões de dólares, em 2010 (INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS, 2009b). Pode-se observar que, dentre as chamadas frutas tropicais principais – manga, abacaxi, abacate e mamão, apenas o abacate não aparece como de grande importância na pauta de exportações brasileiras de frutas.

Tabela 3 - Principais frutas frescas exportadas pelo Brasil (2009/2010)

Frutas	Variação 2010/2009		2010		2009	
	Valor (%)	Volume (%)	Valor (US\$FOB)	Volume (Kg)	Valor (US\$FOB)	Volume (Kg)
Melões	0,10	-3,31	121.969.814	177.828.525	122.094.698	183.911.976
Bananas	15,24	-3,00	45.398.183	139.553.134	30.394.960	143.871.503
Mangas	23,15	13,15	119.929.762	124.694.284	97.388.159	110.202.283
Maçãs	-1,71	-7,58	55.365.805	90.839.409	56.328.134	98.264.010
Limões	15,82	-4,99	50.693.603	63.060.909	43.771.018	66.374.045
Uvas	23,58	11,45	136.648.806	60.805.185	110.574.457	54.559.684
Laranjas	43,49	44,44	18.276.736	37.821.810	11.343.154	26.185.254
Melancias	-21,48	-27,81	12.356.105	28.261.716	15.735.304	39.038.818
Papais	1,93	-1,80	35.121.752	27.057.332	34.457.466	27.554.464
Abacates	-13,30	-7,93	3.126.434	2.699.698	3.606.220	2.932.222
Tangerinas	-43,62	-55,18	1.850.034	1.977.479	3.281.271	4.411.914
Abacaxis	-90,56	-90,46	998.318	1.889.842	10.580.302	19.817.923
Figos	-6,23	-13,31	7.310.886	1.446.458	7.786.246	1.668.583
Outras Frutas	-4,82	-17,53	1.931.663	815.874	2.029.468	989.250
Cocos	-26,95	0,13	121.240	407.737	185.970	407.193
Goiabas	9,60	-3,68	326.364	147.348	297.764	152.972
Pomelos	6961,50	3200,74	42.389	67.335	600	2.040
Peras	-	-	15.819	22.738	-	-
Framboesas/Amoras	-62,17	-65,20	78.874	10.866	206.488	31.222
Outros Citricos	-98,55	-67,33	4.979	4.519	342.275	13.834
Morangos	12,45	19,23	9.675	2.976	8.604	2.496
Aíreas e Mirtilos	-63,31	-61,87	22.239	2.383	60.618	6.249
Mangostões	-	-	9.737	2.208	-	-
Ameixas	3,91	96,67	1.116	354	1.074	180
Pêssegos	-98,54	-98,71	410	174	28.154	13.500
Kiwi	-84,49	-92,11	307	142	1.979	1.800
Damascos	64,56	433,33	1.055	112	641	21
Cerejas	-97,49	-84,00	72	48	2.872	300
Total	8,96	-2,69	609.612.136	759.420.595	559.499.886	780.413.735

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS (2009b).

As exportações brasileiras de manga, no período 2004-2009, são mostradas na Figura 3 (BRASIL, 2010). Pode-se observar a evolução do valor de mercado da fruta para exportação e uma queda no ano de 2009, motivada, certamente, pela crise mundial.

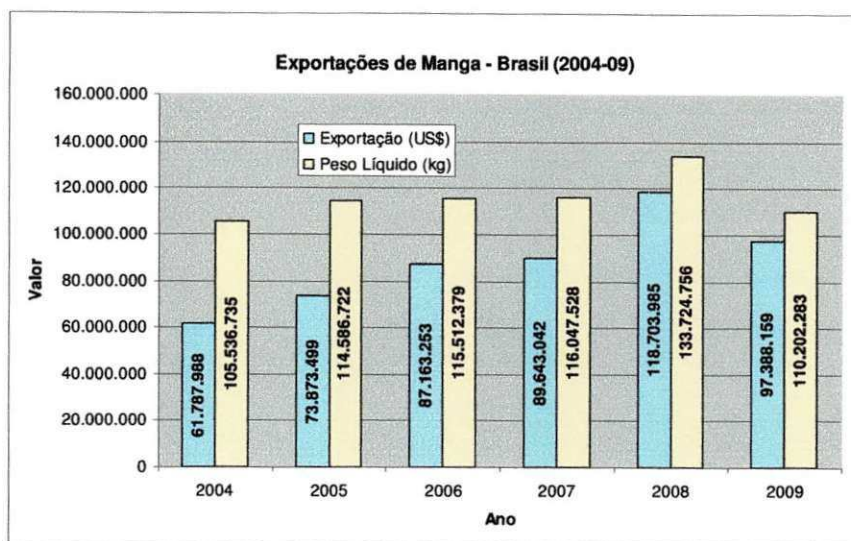


Figura 3 - Evolução das exportações de manga do Brasil (2004-2009)
Fonte: Adaptada de BRASIL (2010).

1.3.2. Os frutos e suas classificações básicas

O fruto, termo botânico científico para o termo coloquial “*fruta*”, de acordo com o Dicionário Michaelis da Língua Portuguesa (WEISZFLOG, 2010), é “o órgão das plantas, resultante do desenvolvimento do ovário após a fecundação, até a maturidade”. De acordo com o Instituto de Biologia da Universidade Federal de Uberlândia:

Biologicamente o fruto funciona como envoltório protetor da semente (ou sementes), assegurando a propagação e perpetuação das espécies. Fruto, segundo a definição clássica, é o ovário desenvolvido e com sementes maduras. Também pode ser conceituado como um órgão formado por um ou mais ovários desenvolvidos, aos quais podem se associar outras estruturas acessórias. A grande diversidade na organização das flores das angiospermas, especialmente a variação do número, arranjo, grau de fusão e estrutura dos pistilos que formam o gineceu, propicia uma ampla gama de variação no tamanho, forma, textura e anatomia dos frutos (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2006)

O fruto é constituído de duas partes fundamentais: o fruto propriamente dito, chamado de pericarpo, originado da parede do ovário, e a semente. Por sua vez, o pericarpo é subdividido em três camadas:

- a) **epicarpo**: revestimento externo (“casca”);
- b) **mesocarpo**: parte intermediária do pericarpo, normalmente a parte mais desenvolvida dos frutos carnosos e a parte mais comestível;
- c) **endocarpo**: parte interior do pericarpo, que normalmente é pouco desenvolvida, reveste a semente e é de difícil separação desta.

A morfologia do fruto manga é mostrada na Figura 4. A parte comestível é o mesocarpo. O “caroço”, na realidade, é o endocarpo, com a semente em seu interior.



Figura 4 - O fruto manga.
Fonte: Adaptado de ARMSTRONG (2009).

1.3.2.1. Classificações básicas dos frutos

Os frutos podem ser classificados segundo vários critérios. Um resumo de algumas classificações comuns é apresentado na Tabela 4.

1.3.3. O fruto manga

A popularmente conhecida *mangueira* (Figuras 5 e 6) tem nome científico *Mangifera indica* L., da família botânica *Anacardiaceae*.

Tabela 4 - Principais classificações dos frutos

Tipo de Classificação	Classe.	Observações / Exemplos
Região de Procedência.	De regiões temperadas.	Pêra, maçã, damasco, pêssego, ameixa, azeitona, figo.
	De regiões subtropicais.	Abacate, laranja, limão, lima, tangerina, figo, kiwi, azeitona e romã. Alguns destes frutos também são produzidos em zonas tropicais e temperadas.
	De regiões tropicais.	Manga , banana, mamão, abacaxi.
Quantidade de água.	Secos.	Noz, castanha, amêndoa, avelã, pinhão.
	Frescos (carnosos).	Manga e todos os outros com maior percentual de água.
Forma de amadurecimento.	Climatéricos.	Têm a capacidade de amadurecer separados da planta, mesmo quando colhidos imaturos. Produzem grandes quantidades de etileno (C ₂ H ₄) durante o amadurecimento. Exemplos: manga , ameixa, banana, damasco, figo, kiwi, maçã, maracujá, nectarina, pêra, pêssego, tomate.
	Não-climatéricos.	Só amadurecem na planta. A produção de etileno não aumenta durante o amadurecimento. Exemplos: abacaxi, azeitona, cereja, laranja, limão, melancia, morango, mirtilo, uva.
Origem.	Simples.	Derivados de um único ovário de uma única flor. Exemplo: cereja, tomate, manga .
	Agregados.	Derivam de um gineceu dialicarpelar de uma só flor. Exemplos: magnólia, framboesa, morango, rosa.
	Múltiplos.	Ovários amadurecidos de muitas flores de uma inflorescência. Exemplos: amora, abacaxi, figo.

Fonte: Adaptado de UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (2006); KWANTLEN (2008).



Figura 5 - Mangueira centenária.

Fonte: ROMÃO (2007).



Figura 6 - Mangueira em fazenda produtora do Vale do São Francisco. Variedade: Haden
Fonte: Arquivo do autor (2009).

É uma árvore de grande porte, originária da Ásia, podendo chegar a 30 metros de altura, com copa densa e frondosa. As folhas são coriáceas, de coloração avermelhada quando jovem e verde-escura, posteriormente. Possui flores pequenas, alvas, róseas ou esverdeadas. Seu fruto tem forma alongada, ovóide ou arredondada, casca esverdeada com manchas pretas, amarelas ou róseas, quando maduro. A polpa (mesocarpo) é de espessura variável, carnosa, suculenta, comestível, de coloração amarela ou amarelo-alaranjada, fibrosa em algumas variedades. A semente é achatada, interna ao caroço (endocarpo), de tamanho variável.

Pela Tabela 4 pode-se perceber que a manga é um fruto simples, fresco, climatérico e procedente de regiões tropicais. Os principais tipos de frutos simples são apresentados na Tabela 5, que classifica adicionalmente a manga como um fruto tipo drupa e carnoso.

De acordo com DONADIO (1996):

De origem indiana, a mangueira foi introduzida no Brasil pelos portugueses no século 16, adaptando-se muito bem em várias regiões brasileiras, sendo muitas vezes confundida como fruteira nativa. Rica em sais minerais, vitaminas, açúcares e de sabor muito agradável, a manga é uma das principais frutas consumidas no país. Sua polpa pode ser consumida ao natural ou utilizada para processamento em suco, geléia, sorvete, néctar, doces, batidas e vários outros produtos.

Tabela 5 - Principais tipos de frutos simples

Categoria.	Subcategoria.	Tipos.	Observações / Exemplos.
Frutos simples secos.	Deiscentes. Abrem-se espontaneamente na maturidade, para liberarem as sementes.	Folículo	Derivado de um único pistilo, apresentando apenas uma linha de deiscência longitudinal. Exemplo: chichá.
		Legume	Derivado de um único pistilo, porém a deiscência se faz por duas linhas longitudinais, a da sutura do carpelo e a da nervura mediana da folha carpelar. Exemplo: feijão.
		Cápsula	Derivada de gineceu sincárpico com dois a muitos carpelos fundidos, ficando seca na maturidade e abrindo de vários modos. Exemplos: papoula, jequitibá, papo-de-peru, açucena amarela, cedro.
		Síliqua	Característico das <i>Brassicaceae</i> , derivado de ovário bicarpelar, cujo pericarpo seco separa-se em 2 valvas laterais deixando um eixo central (replô), ao qual ficam presas as sementes. Exemplos: agrião, ipê.
	Indeiscentes. Não se abrem espontaneamente na maturidade (para liberarem as sementes).	Sâmara	Fruto alado, com expansões da parede do pericarpo em forma de asas. Exemplo: tipuana.
		Cariopse (grão)	Fruto não alado, originado de um ovário unicarpelar. A única semente que ele apresenta está unida, em toda a extensão, às paredes do fruto. Exemplos: milho, arroz.
		Aquênio	Fruto não alado, no qual a semente une-se à parede do fruto (pericarpo coriáceo) por apenas um ponto. Exemplos: girassol, margarida.
		Noz	Apenas um ovário composto amadurece, geralmente com parede dura. Exemplos: carvalho, amêndoa, castanha portuguesa, avelã.
Frutos simples carnosos.	Baga	Epicarpo em geral delgado, mesocarpo e endocarpo carnosos não sendo diferenciados entre si. É derivado de um gineceu pluricarpelar, geralmente polispérmico. Exemplo: uva, tomate. Baga Hesperídio: o epicarpo é coriáceo com numerosas glândulas oleíferas e o endocarpo é membranáceo e dividido em gomos, revestidos de pêlos sucosos na porção interna. Ex: laranja. Baga Pepônio: o fruto não apresenta septos e a camada externa (epicarpo) apresenta-se de coriácea até lenhosa. Exemplos: abóbora, melancia, melão, pepino.	
	Drupa	Apresenta o pericarpo com uma camada externa carnosa e uma pêtrea. Geralmente é oriundo de ovário unicarpelar e monospérmico. O epicarpo é delgado, o mesocarpo carnosos e o endocarpo lenhoso, este último envolve a semente, estando fortemente aderido a ela, formando o chamado "caroço". Exemplos: azeitona (<i>Olea europaea</i> - <i>Oleaceae</i>), coco (<i>Cocos nucifera</i> - <i>Arecaceae</i>) e manga (<i>Mangifera indica</i> , <i>Anacardiaceae</i>)	
Outros tipos de frutos carnosos.	Pomo	Derivado de um hipanto que envolve os carpelos (dois ou mais) e de ovário ínfero. O hipanto forma a porção carnosa e comestível. Exemplos: maçã e pêra.	
	Pseudo-fruto	O pistilo é composto de dois ou mais carpelos, o ovário é súpero e o receptáculo ou o pedúnculo tornam-se carnosos. Exemplo: caju	

Fontes: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (2006); KWANTLEN (2008); SPJUT (1994).

A introdução e a propagação por sementes originaram muitos tipos de mangas com diferentes sabores e qualidades, que só foram fixadas como variedades muito depois. Houve também a introdução, no Brasil, de variedades selecionadas em outros países, o que trouxe novo alento à cultura. Para atender às exigências dos importadores, a produção e a pós-colheita de manga no Brasil sofreram grandes transformações que se refletiram no mercado interno, que é o grande consumidor da manga brasileira (DONADIO, 2004).

Há estimativas de cerca de 500 variedades existentes no mundo. No Brasil, atualmente, são cultivadas diversas variedades, estando entre as principais: *Alfa*, *Bourbon*, *Coração de Boi*, *Espada*, *Haden*, *Keitt*, *Kent*, *Palmer*, *Rosa* e *Tommy Atkins*. Algumas nasceram e se desenvolveram no País, principalmente fruto do trabalho da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); outras são de origem estrangeira, especialmente dos Estados Unidos (BIBLIOTECA VIRTUAL DO ESTUDANTE DE LÍNGUA PORTUGUESA, 2009)

De acordo com LITZ & MUKHERJEE (2009), a manga é um fruto simples, contendo um mesocarpo comestível de espessura variável. Este mesocarpo é variável no que diz respeito à forma, tamanho, cor, presença de fibras e sabor, dependendo da variedade. A casca (epicarpo) é grossa e glandular. Há um bico lateral, característica que se desenvolve na extremidade proximal do fruto. Um seio está sempre presente acima do bico. O formato dos frutos é variável, incluindo os alongados, oblongos e ovais ou formas intermediárias envolvendo duas dessas formas. O comprimento pode variar de 2,5 cm a mais do que 30 cm, dependendo da variedade. O endocarpo é lenhoso, grosso e fibroso, com as fibras do mesocarpo surgindo a partir do endocarpo.

A manga é climatérica, ocorrendo um aumento da produção de etileno durante o amadurecimento. Estão presentes na fruta a clorofila, carotenos, antocianinas e xantofilas. A coloração da casca dependente da variedade, sendo geralmente uma mistura de pigmentos verde, vermelho e amarelo. A cor dos frutos maduros depende do genótipo. Durante a maturação, os cloroplastos da casca tornam-se cromoplastos, com pigmentos amarelos e vermelhos. Por exemplo, *Tommy Atkins*, *Haden* e *Keitt* têm uma área vermelha ou vermelhidão devido à presença de antocianinas. Os carotenóides na polpa de frutos maduros também variam de acordo com o cultivo (LITZ & MUKHERJEE, 2009).

As principais estruturas morfológicas externas da manga são mostradas na Figura 7.

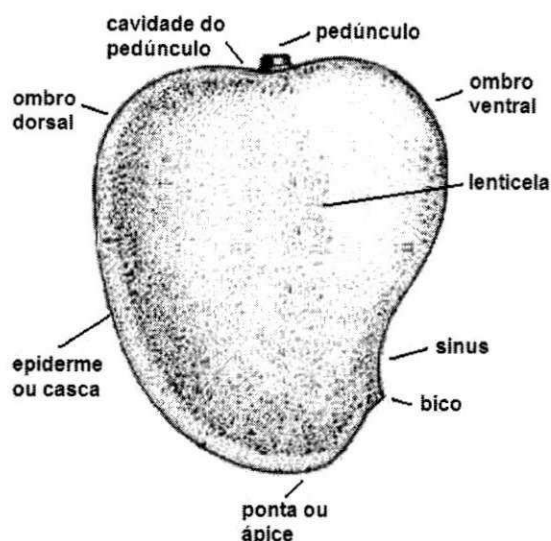


Figura 7 - Representação de um fruto típico de manga e suas principais estruturas morfológicas externas.
Fonte: Adaptado de VALENTE et al.(2009).

1.3.4. A variedade *Tommy Atkins*

A variedade *Tommy Atkins* é originária da Flórida (EUA). É um fruto de tamanho médio para grande (12-14,5 cm de comprimento; 10–13 cm de largura; 8,5–10 cm de espessura), pesando entre 400 e 700 g. e de formato oval. A casca é espessa, apresentando coloração atraente (laranja-amarela coberta com áreas vermelhas e púrpuras intensas), com numerosos pequenos pontos brancos. A polpa é firme, medianamente succulenta e com teor de fibra médio, com coloração variando do limão ao amarelo profundo, sabor suave e doce, com um agradável aroma forte. A semente da *Tommy Atkins* é monoembriônica. É uma variedade resistente à antracnose e a danos mecânicos (estresse de manuseio e transporte). Possui bom período de conservação. Precoce, amadurece bem se colhida imatura.

A *Tommy Atkins* apresenta problemas de colapso interno do fruto, malformação floral e baixo teor de sabor e de *Brix* (aprox. 16º *Brix*), quando comparado com *Palmer* e *Haden*, por exemplo. É uma das variedades mais cultivadas mundialmente, para exportação. Apresenta facilidade para indução floral em época quente, alta produtividade e boa vida de prateleira. Representa,

atualmente, cerca de 90% das exportações de mangas do Brasil (COSTA & SANTOS, 2004; LITZ & MUKHERJEE, 2009).

Na Figura 8 são mostradas mangas *Tommy Atkins*, embaladas para exportação, num galpão de processamento de uma fazenda produtora em Petrolina (PE), no Vale do São Francisco.



Figura 8 - Mangas *Tommy Atkins* embaladas para exportação
(Fazenda Fruit Fort – Petrolina - PE)
Fonte: Arquivo do autor (jul/2008 e ago/2009)

Algumas das principais variedades de manga cultivadas no Brasil são mostradas na Figura 9.

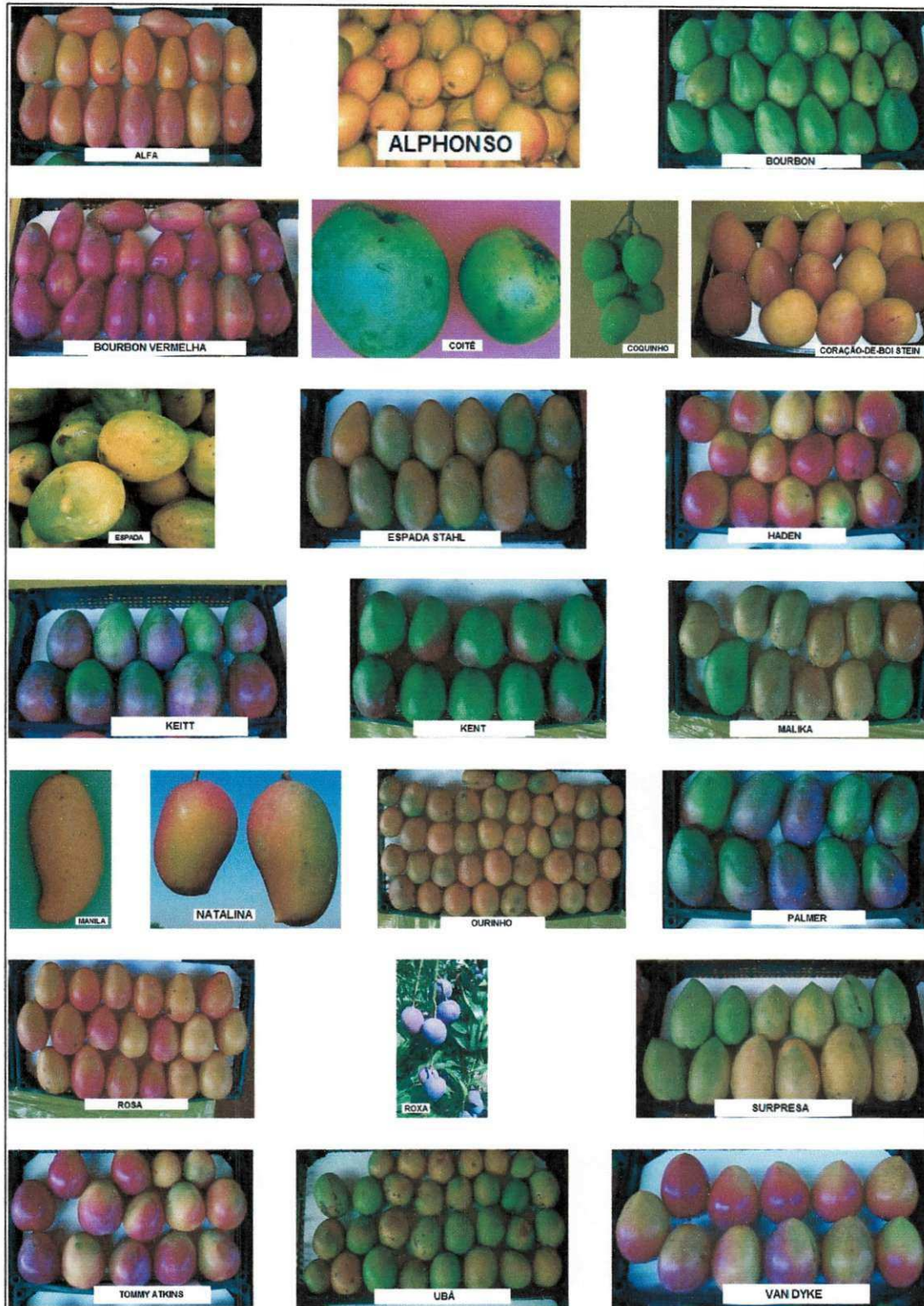


Figura 9 - Algumas das principais variedades de manga produzidas no Brasil.
Fonte: ROSSETO (2008).

1.3.5. Estado da arte da avaliação de qualidade de frutas

A qualidade de uma fruta pode ser definida como o conjunto de características intrínsecas que diferenciam uma unidade de outra. Segundo ABBOTT & HARKER (2004), textura é um atributo de qualidade que é crítico na determinação da aceitabilidade de frutas e verduras. Embora seja um termo largamente utilizado, a textura não é um atributo bem definido e sim um termo geral que representa as propriedades mecânicas e estruturais de um alimento e sua percepção sensorial na mão ou na boca. Alguns termos usados para descrever a textura de frutas e verduras são “duro”, “firme”, “mole”, “enrugado”, “macio”, “farinhento”, “consistente”, “coriáceo (semelhante a couro)”, “seco”, “arenoso”, “lanuginoso (semelhante a lã)”, “fibroso”, “suculento”.

Estes atributos estão relacionados às características estruturais, fisiológicas e bioquímicas das células vivas, suas mudanças ao longo do tempo e suas alterações por processos como congelamento e cocção. As contínuas mudanças fisiológicas das células, adicionada à variabilidade inerente a cada indivíduo, torna muito difícil a avaliação automatizada da qualidade de uma fruta. Devido às constantes mudanças ao longo do tempo, a medida da textura de uma fruta é, freqüentemente, relevante somente no momento da avaliação. Atualmente, não existem instrumentos ou métodos completamente efetivos para a medição de cada um dos atributos que qualificam uma determinada fruta.

Instrumentos podem ser projetados para imitar os métodos de avaliação humanos ou para realizar medidas mecânicas fundamentais - peso, tamanho, densidade, entre outras - que podem ser relacionadas, estatisticamente, à percepção e julgamento humanos, na tentativa de se avaliar a qualidade. Somente os seres humanos podem julgar a qualidade, embora instrumentos que meçam atributos relacionados à qualidade sejam muito importantes para a pesquisa e para as tarefas de inspeção e seleção em linhas de processamento (ABBOTT & HARKER, 2004).

PIÑEIRO & RÍOS (2004) relacionam os componentes necessários para um padrão da qualidade para frutas e verduras frescas. Na Tabela 6 pode-se observar o quanto são complexas estas exigências.

Tabela 6 - Componentes para um padrão de qualidade para frutas e verduras frescas.

1. Requisitos Gerais	
Requisitos	Exemplos
Forma.	As frutas que formam um determinado conjunto (embalagem) devem ter tamanho e formas semelhantes.
Consistência.	Aparência de frescor e consistência firme.
Higiene e limpeza.	Livre de insetos ou doenças que afetam sua qualidade interna.
Integridade.	Livre de cortes, livre de danos mecânicos e livre de umidade externa anormal.
Frescor.	Não deve indicar sinais de desidratação.
Cheiro e sabor.	Livre de odores ou de sabores desagradáveis.
Sujeira.	Livre de sujeira.
Segurança.	Livre de contaminadores.
2. Requisitos de Maturação	
Requisitos	Exemplos
Tabela de cores.	Gradação de cores de acordo com diferentes graus de maturidade.
Requisitos mínimos em relação a critérios específicos.	Consistência mínima, TSS, pH, acidez, etc., relacionados a cada índice de maturidade.
3. Requisitos de Classificação	
Requisitos	Exemplos
Critérios de classificação de produtos em diferentes categorias.	Tamanho e peso da fruta.
	Sem considerar tamanho, peso e cor, as mangas são classificadas em: Classe Extra: Livre de defeitos e com até 5% de unidades fora do padrão (em número ou peso).
	Classe I: Com defeitos, desde que não cubram mais do que 10% da superfície.
	Classe II: Com defeitos, desde que não cubram mais do que 15% da superfície.
4. Requisitos de Tolerância	
Requisitos	Exemplos
Tolerâncias admissíveis.	Classe Extra: Admissível até 5% (em número ou peso) fora dos padrões para esta categoria, mas pertencentes à Classe I.
	Classe I: Admissível até 10% (em número ou peso) fora dos padrões para esta categoria, mas pertencentes à Classe II.
	Classe II Admissível até 10% (em número ou peso) fora dos padrões para esta categoria, exceto frutas com danos severos.
5. Requisitos de Apresentação	
Requisitos	Exemplos
Uniformidade.	O conteúdo de cada caixa deve ser uniforme.
Embalagem.	A embalagem deve proteger adequadamente as frutas.
6. Requisitos de Etiquetamento	
Requisitos	Exemplos
Empacotamento para grosso ou varejo.	Etiquetas devem atender aos padrões estabelecidos.
7. Contaminantes	
Requisitos	Exemplos
Metais Pesados.	Deve atender aos requisitos de níveis máximos de metais pesados.
Resíduos Pesticidas.	Deve atender aos requisitos de níveis máximos de resíduos.
8. Higiene	
É desejável que os produtos sejam preparados de acordo com os códigos de recomendação internacionais e em conformidade com os princípios de higiene para alimentos.	

Fonte: Adaptado de PIÑEIRO & RÍOS (2004).

1.3.6. Principais defeitos em mangas

As mangas, como, de resto, todas as frutas e produtos hortícolas em geral, idealmente, deveriam ser produzidas – e consumidas - sem defeitos intrínsecos e extrínsecos, com altos padrões de qualidade, do ponto de vista do consumidor. No entanto, a realidade é que os frutos que chegam ao consumidor final possuem defeitos que variam tanto em severidade quanto em quantidade (área ou volume afetados) e simultaneidade. Estes defeitos podem ser classificados em quatro grandes grupos:

- danos físicos e mecânicos;
- desordens fisiológicas;
- patologias (doenças); e
- pragas.

1.3.6.1. Principais danos físicos e mecânicos

Os danos físicos e mecânicos são aqueles originados principalmente de choques, impactos e pressões mecânicas diretas sobre o fruto. Os principais danos destes tipos encontrados nas mangas são:

1.3.6.1.1. Abrasão da pele

Desgaste devido ao contato entre frutas ou contra superfícies rugosas (areia no caixote de transporte, por exemplo), o que produz arranhões, mudanças na coloração da pele e uma perda acelerada de água (Figura 10, esquerda). A abrasão é freqüentemente ocasionada pela presença de areia no caixote plástico de transporte do campo para o galpão de processamento.

1.3.6.1.2. Impacto/compressão

Os danos por impacto/compressão ocorrem devido ao contato entre frutas ou pancadas contra superfícies rígidas, principalmente durante o transporte em caixas plásticas ou de madeira, provocando manchas e perda acelerada de

água (Figura 10, direita). Em alguns galpões de processamento, os danos por compressão também são chamados de “escoramentos”.



Figura 10 - Exemplos de danos por abrasão (esquerda) e por compressão (direita).
Fonte: KADER (2006)

1.3.6.2. Principais desordens fisiológicas

Desordens ou distúrbios fisiológicos referem-se a quaisquer danos produzidos nos tecidos do fruto que não foram causados por patógenos ou por danos mecânicos. Os distúrbios fisiológicos ocorrem em resposta a uma condição adversa ou por deficiências nutricionais durante o período de desenvolvimento e crescimento dos frutos. Em alguns casos, patógenos também podem estar presentes nos frutos com distúrbios fisiológicos, no entanto, sua patogenicidade não pode ser comprovada em todos os casos, cientificamente (PRADO, 2004). As principais desordens fisiológicas são descritas a seguir.

1.3.6.2.1. *Dano por frio*

Os sintomas do dano por frio incluem:

- amadurecimento heterogêneo;
- cor esmaecida e perda de sabor;
- pintas (pontos) na superfície;
- cor amarronzada da pele, semelhante a uma queimadura;
- aumento da susceptibilidade ao apodrecimento;
- escurecimento da polpa, em casos graves.

Exemplos de danos por frio são mostrados na Figura 11.



Figura 11 - Exemplos de danos por frio.
Fonte: KADER (2006).

1.3.6.2.2. Dano por calor

A exposição a temperaturas superiores a 30°C por períodos maiores que 10 dias provoca amadurecimento heterogêneo, pele malhada (queimaduras marrons ou pretas) e sabor forte. Em casos severos pode provocar o aparecimento de espaços vazios na polpa. Quando se excede o tempo ou a temperatura recomendada para o controle de insetos (por exemplo, quando a fruta é submetida ao banho térmico fitossanitário por mais do que o tempo especificado), podem ocorrer danos por calor, conforme mostrado na Figura 12.



Figura 12 - Exemplos de danos por calor.
Fonte: KADER (2006).

1.3.6.2.3. Malformação

É um defeito de causa ainda não completamente esclarecida, associado a distúrbios hormonais e genéticos, ataques de fungos (*Fusarium subglutinans*) e pragas (Figura 13).



Figura 13 - Exemplos de malformação.
Fonte: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

1.3.6.2.4. Queimadura por látex

O látex produzido pela mangueira, quando em contato com o fruto, pode causar uma descoloração da pele, com manchas marrom-escuras ou pretas, devido ao dano químico e fisiológico provocado quando escorre, ao se cortar o pedúnculo ou por contato com outra fruta na qual ocorreu o escorrimento. É muito comum quando não são adotadas boas práticas de colheita e seleção no galpão de processamento como, por exemplo, não colocar as frutas com o pedúnculo para baixo quando colhidas, nas caixas plásticas de transporte. Esta queimadura normalmente não afeta a polpa (mesocarpo), ficando limitada à casca (epicarpo). Exemplos de frutas com queimaduras por látex em diversas intensidades (leves, moderadas e severas) são mostrados na Figura 14.

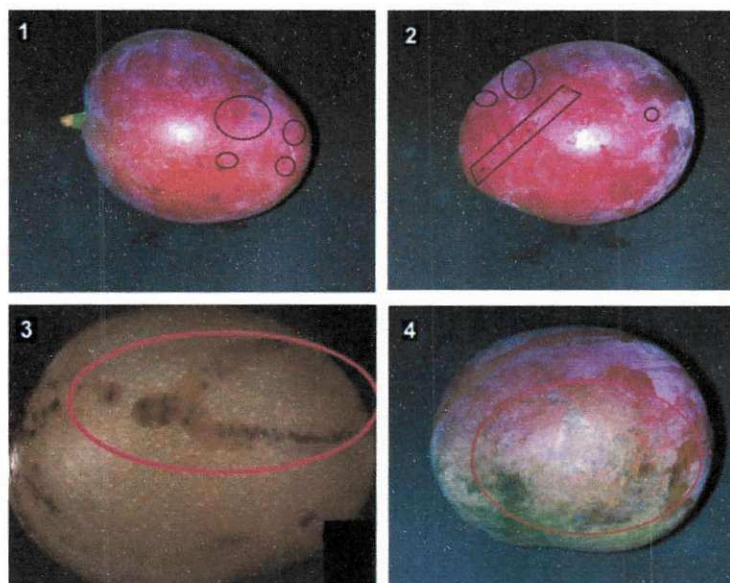


Figura 14 - Queimaduras por látex. Leves (1 e 2); moderada (3) e severa (4).
Fontes: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009); KADER (2006).

1.3.6.2.5. Queimadura pelo Sol (sunburn)

A queimadura pelo Sol é um dano causado pela excessiva exposição do fruto à luz solar. De acordo com LIMA (2007):

A intensa exposição ao sol, principalmente em algumas épocas do ano, resulta em queima da casca da manga. Trata-se da degradação dos pigmentos existentes na casca através da ação do calor e da luz. Dependendo da intensidade, é possível observar uma área amarelada na região superior da fruta, onde inicialmente predominavam pigmentos verdes e/ou vermelhos. Com a evolução do problema, pode-se constatar coloração amarronzada nesta área. O problema atinge os frutos localizados na periferia da copa da planta e expostos ao sol no período da tarde.

Há uma grande ocorrência de queimaduras pelo sol na região do Vale do São Francisco, devido às altas temperaturas e às altas taxas de insolação e radiação solar. Este problema se agrava no final do ano e início do ano seguinte (setembro a janeiro), período onde são mais necessárias medidas preventivas, uma vez que este dano também compromete fortemente a qualidade da fruta. A medida mais utilizada é o pincelamento ou pulverização das frutas com solução de cal, que age como um protetor ou filtro, reduzindo a penetração dos raios solares (LIMA, 2007). Exemplos de frutas com danos pelo Sol são mostrados na Figura 15, com diferentes níveis, tipicamente descritos nos galpões de processamento como danos leves, moderados e severos.

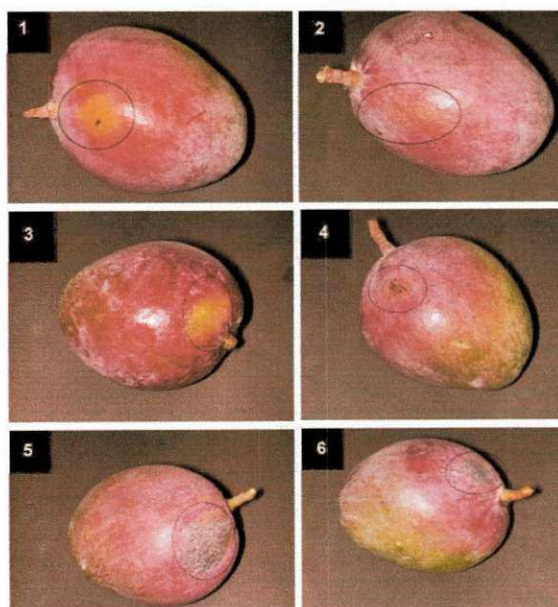


Figura 15 - Queimaduras pelo Sol. Leves (1 e 2); moderadas (3 e 4) e severas (5 e 6).
Fonte: Adaptado de AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

1.3.6.2.6. Colapso interno da polpa

É caracterizado pelo colapso da polpa na região interna próxima à semente. Ocorre decomposição da polpa e o desenvolvimento de cavidades internas entre a semente e o pedúnculo. Esta desordem é mais freqüente em mangas que amadurecem na árvore. Segundo LIMA (2007a):

O colapso interno é um distúrbio fisiológico que tem sido atribuído a um desequilíbrio nutricional. Em geral, tem-se considerado uma associação do colapso interno à ocorrência de teores elevados de nitrogênio com baixos níveis de cálcio na polpa da manga, o que resulta em baixa relação Ca:N. Mas, não há um consenso em relação à causa do problema. Sua ocorrência é generalizada nas regiões produtoras do mundo e algumas variedades são especialmente suscetíveis. No Vale do São Francisco, é comum sua ocorrência em mangas das variedades *Tommy Atkins*, *Kent* e *Keitt*.

O principal sintoma de colapso interno é o amadurecimento prematuro de algumas regiões da polpa. Na fase inicial, inclui a desintegração do sistema vascular na região de ligação entre o pedúnculo e o endocarpo. O avanço do problema resulta na formação de um espaço vazio, que tende a escurecer. Estes sintomas evoluem de dentro para fora, desde o campo e acompanhando o amadurecimento da manga na fase pós-colheita. Exemplos deste defeito são mostrados na Figura 16.

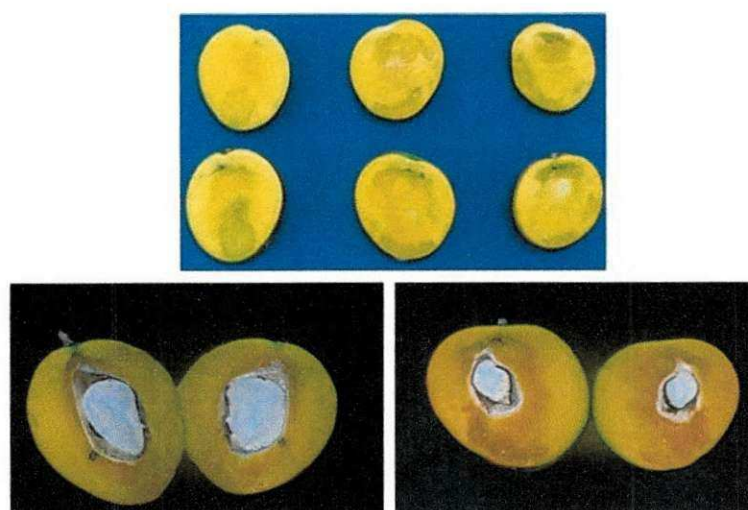


Figura 16 - Colapso interno.
Fontes: LIMA (2007a); AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

O colapso interno é de difícil detecção visual, “constituindo-se em um dos principais distúrbios fisiológicos que causam perdas na pós-colheita, juntamente com os danos por frio” (LIMA, 2007b). O sinal mais comum em mangas *Tommy Atkins*, detectável somente por pessoal experiente - em especial algumas selecionadoras qualificadas que trabalham em galpões de processamento – é uma pigmentação amarela esmaecida em regiões da casca quando o restante da superfície ainda não desenvolveu características de fruta madura. Neste estágio, muito provavelmente já ocorreu elevado comprometimento interno da polpa, que passa a apresentar cor laranja escuro, aspecto aquoso e odor de fermentado (LIMA, 2007a).

O colapso interno da manga pode manifestar-se com outros sintomas (FILGUEIRAS et al., 2000):

- a) Semente gelatinosa: caracterizada pelo amadurecimento prematuro e desintegração da polpa que rodeia a semente, formando uma massa gelatinosa. Exemplos típicos de semente gelatinosa são mostrados na Figura 17.

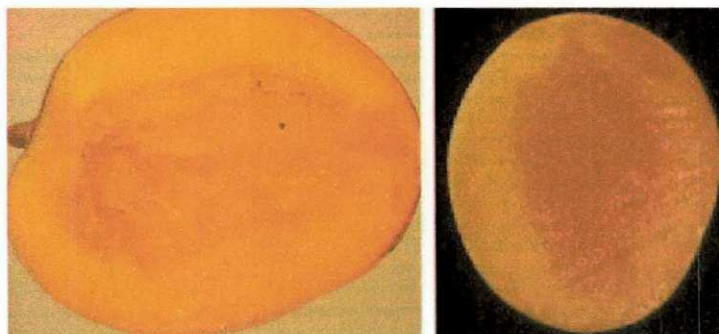


Figura 17 - Semente gelatinosa.
Fonte: KADER (2006).

- b) Amolecimento do “nariz”: amolecimento do tecido do “nariz” (ápice ou ponta floral). A polpa apresenta-se sobremadura, podendo ficar amarelada entre o caroço e o nariz.
- c) Tecido esponjoso: caracteriza-se pelo aparecimento de áreas na polpa que parecem esponja, com coloração acinzentada.

d) Cavidade na extremidade do pedúnculo: exemplo deste defeito é mostrado na Figura 18.



Figura 18 - Cavidade na extremidade do pedúnculo.
Fonte: KADER (2006).

1.3.6.2.7. Escurecimento de lenticelas

Existem dois tipos de escurecimento de lenticelas: o vermelho e o preto. Segundo ASSIS et. al. (2009):

Ambas as manchas de lenticelas vermelhas e pretas reduzem o valor da manga *Tommy Atkins* exportada do Nordeste do Brasil à América do Norte e Europa. Ambos os tipos de manchas de lenticelas são causadas, principalmente, por lavagem de frutas em uma solução de hidróxido de cálcio, para prevenir a queimadura por látex. Sugere-se que as manchas pretas ocorrem, principalmente, através de processos físicos que envolvem a entrada de água na lenticela e o subsequente colapso e descoloração das células sub-lenticelulares. Por outro lado, as manchas vermelhas são processos fisiológicos que envolvem a produção de antocianinas em resposta à baixa temperatura em que a entrada de água para os poros provoca. A natureza dessas mudanças ainda não foi completamente determinada.

Exemplos de escurecimento de lenticelas são mostrados na Figura 19.

1.3.6.2.8. Mancha de cal.

No campo, as mangas são submetidas a banhos de aspersão de solução de cal, com o objetivo de se reduzir a incidência de raios solares em frutos que estão posicionados na parte externa da copa da árvore, reduzindo-se, assim, as queimaduras pelo sol. Por outro lado, este cal pode deixar manchas na casca, gerando outro defeito visual.

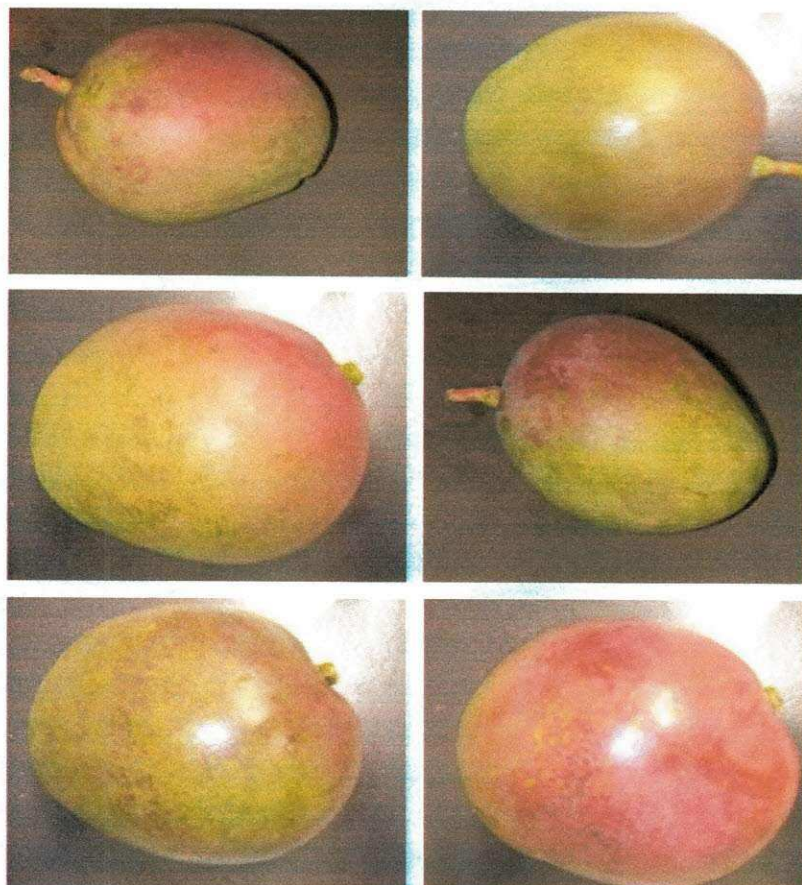


Figura 19 - Escurecimento de lenticelas. Danos leves (primeira linha), moderados (segunda linha) e severos (terceira linha).
 Fonte: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

1.3.6.3. Principais desordens patológicas (doenças)

As desordens patológicas são provenientes de parasitas (nematóides), de bactérias e, principalmente, de fungos.

As principais doenças que afetam a manga estão descritas a seguir.

1.3.6.3.1. *Antracnose*

A antracnose é a maior doença da mangueira causada por fungos, principalmente pelo fungo *Colletotrichum gloeosporioides*. De acordo com PERNEZNY & SIMONE (2000), também pode ser causada por *Glomerella cingulata* e por *Colletotrichum acutatum*. Afeta folhas e flores da mangueira. Os esporos são levados até o fruto por meio da água de chuva ou orvalho, razão pela

qual a disseminação é maior em locais úmidos e em períodos chuvosos. Os esporos germinam e são capazes de penetrar na epiderme, ficando em estado latente até o início do amadurecimento, quando começam a aparecer os sintomas (FILGUEIRAS et al., 2000). As lesões podem se limitar à pele ou invadir e obscurecer a polpa, causando rapidamente o apodrecimento do fruto. A variedade *Tommy Atkins* é mais resistente a esta doença, enquanto que a tradicional *Espada* é mais susceptível. Exemplos de antracnose são mostrados na Figura 20.

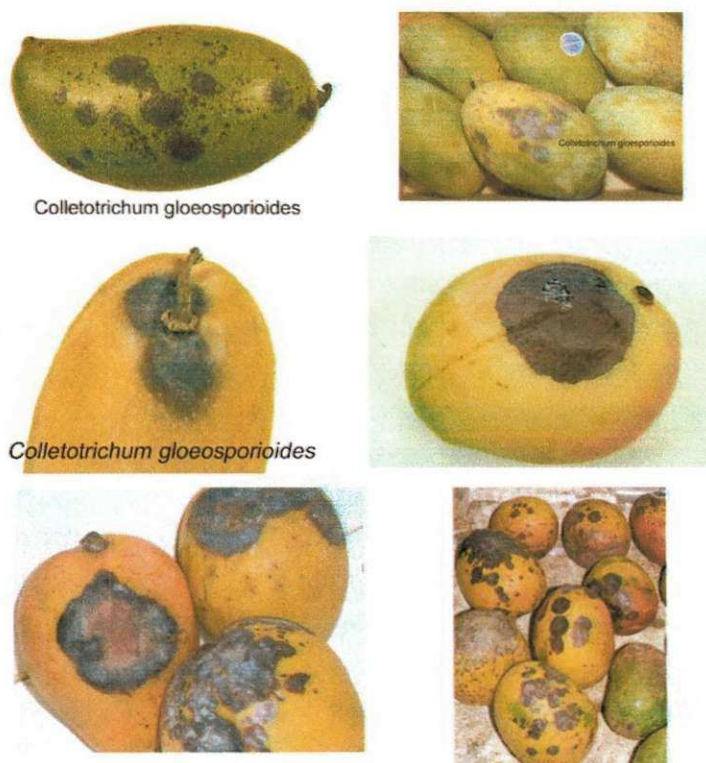


Figura 20 - Exemplos de mangas afetadas por antracnose.
Fonte: KADER (2006).

1.3.6.3.2. Podridão peduncular

Causada principalmente pelo fungo *Lasiodiplodia theobromae*. De acordo com PERNEZNY & SIMONE (2000), também pode ser causada pelos fungos *Botryosphaeria rhodina*, *Dothiorella dominicana* (*Fusicoccum aesculi*), *Botryosphaeria dothidea*, *Hendersonula toruloidea* e *Phomopsis mangiferae*. Afeta áreas machucadas do pedúnculo ou da pele. Cresce a partir do pedúnculo, formando lesões escuras circulares ao redor do mesmo (KADER, 2006). Exemplos de podridão peduncular são mostrados na Figura 21.

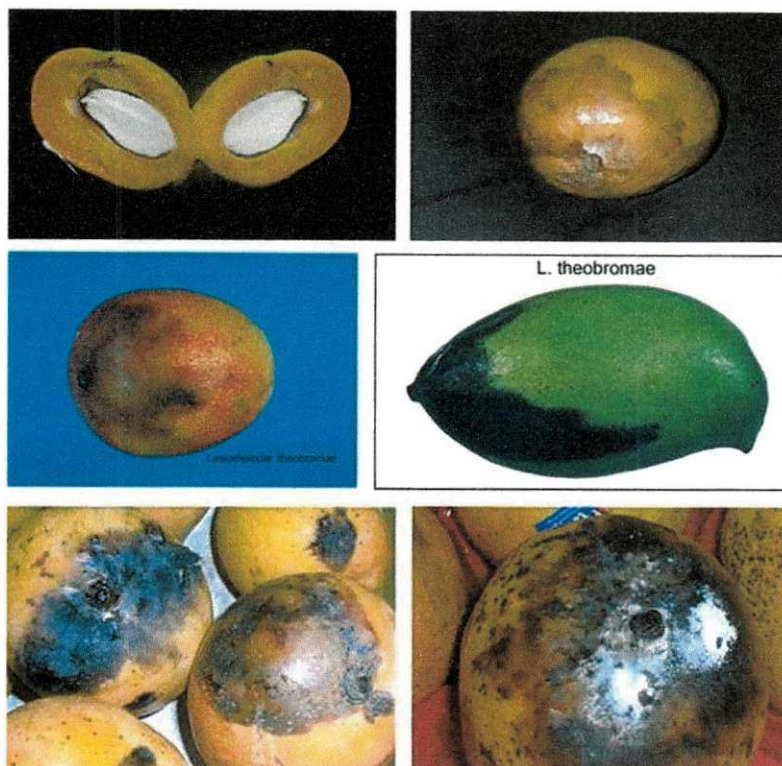


Figura 21 - Podridão peduncular.
 Fonte: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009); KADER (2006).

1.3.6.3.3. Seca da Mangueira

A seca da mangueira é causada pelo fungo *Ceratocystis fimbriata*. Na década de 1940 restringia-se praticamente às cercanias de Recife, Pernambuco, onde era conhecida pelo nome de *mal de Recife*. Atualmente essa doença encontra-se disseminada por muitas regiões brasileiras causando, em algumas, prejuízos expressivos.

É capaz de provocar a morte de plantas suscetíveis em qualquer estágio de desenvolvimento, desde plantas jovens até árvores centenárias. A infecção pode iniciar-se pela copa da árvore, com auxílio de um besouro vetor, o *Hypocryphalus mangiferae* (broca da mangueira). Nesse caso, a doença caracteriza-se pelo secamento de galhos que progride até atingir toda a copa, ocasionando sua morte. É possível, também, que a infecção se inicie pelo sistema radicular. Em condições como essa, a doença pode estabelecer-se sem concurso de vetor, embora todo ferimento seja capaz de favorecê-la (RIBEIRO et al., 2004).

De acordo com TAVARES (2004):

A infecção pode acontecer de duas formas: através da copa e das raízes. Quando através da copa, a seca da planta inicia-se pelos galhos finos da parte externa, progredindo lentamente em direção ao tronco, até atingi-lo, matando toda a planta. O fungo só consegue infectar a copa se for introduzido. Desta forma, o principal disseminador é um coleóptero, normalmente encontrado sob o córtex de galhos e troncos. Os sintomas são amarelecimento, murcha e seca dos galhos, que geralmente têm início num ramo da extremidade da copa. Quando aos sintomas da seca da mangueira (*Ceratocystis fimbriata*) podem ser confundidos com os causados por *Botryodiplodia theobromae* e vice-versa. A diferença está na infecção de fora para dentro do lenho, causada pelo último, e de dentro do lenho para fora, quando causada pelo primeiro.

1.3.6.3.4. Verrugose

A verrugose, também conhecida por sarna da mangueira, é causada pelo fungo *Elsinoe mangiferae* Bitanc. et Jenkins. Exemplos de verrugose são mostrados na Figura 22.

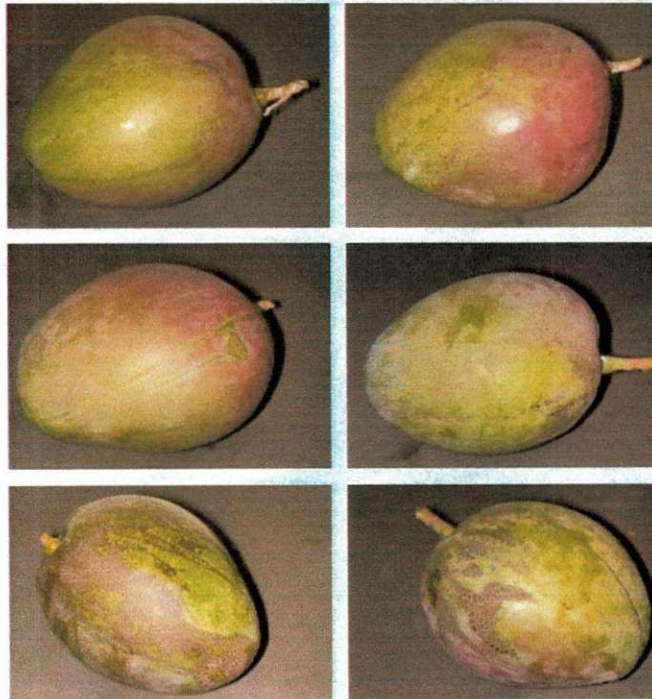


Figura 22 - Verrugose. Danos leves (primeira linha), moderados (segunda linha) e severos (terceira linha).
Fonte: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

1.3.6.3.5. Outras doenças

Outras doenças de importância que afetam a mangueira são:

- Oídio (*Oidium mangiferae*);
- Podridão-parda-do-fruto (*Dothiorella dominicana*);
- Mancha angular (*Xanthomonas campestris* pv. *mangiferae* indica).

1.3.6.4. Principais pragas (insetos)

1.3.6.4.1. Moscas-das-frutas (*Ceratitis capitata* e *Anastrepha* spp.)

As moscas-das-frutas (Figura 23) fazem parte de um grupo de pragas responsável por grandes prejuízos econômicos na cultura da mangueira, tanto pelos danos diretos que causam à produção (Figura 24) como também pelas barreiras quarentenárias impostas pelos países importadores, principalmente EUA e Japão. *A. obliqua* é a principal mosca-da-fruta que ataca a manga. No Vale do São Francisco, *C. capitata* é a espécie mais comum, contudo, além dessa espécie, são relacionadas onze espécies do gênero *Anastrepha* (BARBOSA, 2005).



Figura 23 - Adulto de *Ceratitis* (esq.) e adulto de *Anastrepha* (dir.).
Fonte: BARBOSA (2005)

De acordo com DIAS (2011),

os adultos da mosca-das-frutas do gênero *Anastrepha* medem em torno de 7mm. Seu tórax é marrom, podendo apresentar três faixas longitudinais mais claras. Os ovos, de cor branca leitosa, são introduzidas pelas fêmeas abaixo da casca dos frutos, de preferência ainda imaturos. As larvas, provenientes destes ovos (lagartas afiladas, brancas, sem patas), alimentam-se da polpa do fruto. Desenvolvida a lagarta abandona o fruto, enterra-se no solo de onde emerge o adulto para acasalar-se. No ponto onde a mosca deposita seus ovos pode ocorrer contaminação por fungos ou bactérias, o que resulta no apodrecimento local do fruto.



Figura 24 - Danos causados pela mosca-da-fruta.
Fonte: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

1.3.6.4.2. *Tripes (Selenothrips rubrocinctus (Giard))*

O tripses, uma praga comum da mangueira, é o inseto de nome científico *Selenothrips rubrocinctus* (Giard), mostrado na Figura 25. Exemplos de danos causados por este inseto são mostrados na Figura 26.



Figura 25 - Tripes, o inseto de nome científico *Selenothrips rubrocinctus* (Giard).



Figura 26 - Danos causados por tripses. Danos leves (linha superior), moderados (linha média) e severos (linha inferior).
Fonte: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

1.3.6.4.3. Cochonilhas (*Aulacaspis tubercularis*,)

A principal cochonilha que ataca a mangueira é a *Aulacaspis tubercularis*, conhecida como cochonilha branca, embora ocorram também *Pseudaonidia tritiformis*, *Saissetia coffeae*, *S. oleae*, *Pinnaspis* sp. e *Pseudococcus adonidum*. Normalmente, não é uma praga de importância, mas, se houver descontrole, pode tornar-se um problema maior. Na Figura 27 são mostrados danos causados por cochonilhas.



Figura 27 - Danos causados por cochonilhas. Danos leves (linha superior), moderados (linha média) e severos (linha inferior).
Fonte: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

1.3.6.4.4. Outras pragas

Outras pragas que atacam a mangueira são:

- Formigas cortadeiras: *Atta* spp (saúvas) e *Acromyrmex* spp (quemquéns);
- Irapuá (*Trigona spinipes*);
- Besouro Amarelo (*Costalimaita ferruginea vulgata*);

- Broca da mangueira (*Hypocryphalus mangiferae*);
- O besouro *Chiorida festiva*;
- Besouro-de-limeira (*Sterrocolaspis quattrodecimcortata*);
- Ácaros, em especial *Eriophyes mangiferae* (danos mostrados na Figura 28);
- Lagarta-de-fogo (*Megalopyge lanata*);
- Cigarrinha, conhecida como cigarrinha-das-frutíferas, *Aethalion reticulatum*;
- O bicudo-da-semente, *Sternochetus mangiferae*.

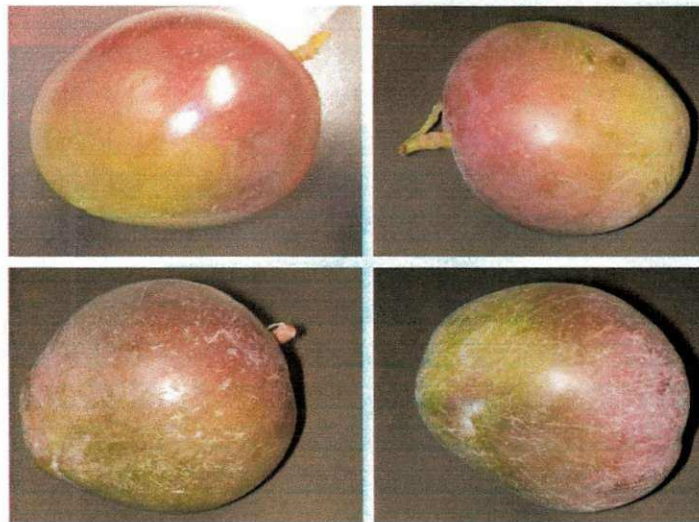


Figura 28 - Danos causados por ácaros. Dano leve (imagem superior esquerda), moderado (superior direita) e severos (linha inferior).
 Fonte: AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. (2009).

1.4. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades foram iniciadas com a procura pelos principais fornecedores de frutas no mercado local de Campina Grande (PB), que atuam no dia-a-dia da comercialização. Após conversas com comerciantes estabelecidos no CEASA (Central de Abastecimento de Hortifrutigranjeiros de Campina Grande), foram identificados os principais fornecedores de mangas para as feiras livres, pequenos mercados e supermercados da região.

Após localização de um destes principais fornecedores, com ponto comercial estabelecido na feira livre da cidade, foi feita uma entrevista com este comerciante e decidiu-se adquirir um lote de mangas para uma análise detalhada de suas características.

A entrevista permitiu a identificação da região de origem e condições de transporte das mangas vendidas no mercado local:

- as mangas *Tommy Atkins* vendidas em Campina Grande são oriundas, em sua quase totalidade, do Vale do São Francisco;
- as mangas são transportadas em caminhões desde a região produtora até a cidade, com periodicidade típica semanal;
- é muito difícil identificar exatamente de qual fazenda produtora vem um determinado lote, pois os caminhões fazem uma rota que passa por diversas fazendas, recolhendo frutos não identificados, em caixas plásticas não identificadas ou misturadas;
- embora feita normalmente por caminhões, em caixas plásticas, não há padronização nas condições de transporte; também não há refrigeração;

- é difícil identificar, com exatidão, o dia da colheita, devido à logística citada, de recolhimento e transporte dos frutos.

Mesmo diante do desconhecimento destas características de produção e transporte, considerou-se importante, para o trabalho, o contato com as mangas do mercado interno, para permitir uma familiarização com as especificidades dos defeitos: formas, severidades e principais ocorrências, além da criação do banco de dados citado.

Neste contexto, seria importante que algumas questões pudessem ser respondidas, nesta fase do trabalho, com as mangas do mercado local:

- a) Quais características visuais são típicas de cada um dos defeitos ?
- b) Quais os defeitos com maior percentual de ocorrências ?
- c) Qual o percentual de frutas com defeitos múltiplos ?
- d) Quais suas colorações típicas ?

Para responder a estas questões, resolveu-se buscar ajuda de especialistas em seleção de mangas. Após diversos contatos com pessoal da área, concluiu-se que funcionárias selecionadoras que trabalham em galpões de processamento da região produtora (Vale do São Francisco) têm grande experiência em seleção visual/manual de frutas e poderiam contribuir para este trabalho. Como toda a seleção de defeitos nestes galpões é realizada ainda de forma visual/manual por estas selecionadoras, foram localizadas duas destas funcionárias, com larga experiência em uma linha de processamento de mangas *Tommy Atkins*, que trabalharam, em média, 2 anos especificamente nesta atividade, em uma fazenda produtora da região.

As especialistas foram convidadas a selecionar um lote de frutas adquirido no mercado local de Campina Grande. As características deste lote e as condições do experimento estão descritas na Tabela 7.

As mangas foram adquiridas de um fornecedor local, na feira livre da cidade, onde estavam armazenadas à temperatura ambiente. Foi adquirida uma grande quantidade de frutos porque não se conhecia, *a priori*, a quantidade e variedade de defeitos que seriam encontrados. Depois de transportadas em caminhonete para o Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da UFCG, foram lavadas com água e sabão neutro, secas manualmente com pano de algodão e armazenadas em caixas (contentores) plásticos semelhantes aos usados tipicamente no transporte de frutas.

Tabela 7 - Características do lote de mangas e condições do experimento

Características do Lote e Condições do Experimento	
Número de caixas (contentores plásticos)	13
Número de mangas adquiridas	730
Número de mangas descartadas após lavagem e seleção prévia (devido à sobrematuração ou defeitos excessivos dos frutos)	31
Número de mangas efetivas para o experimento	699
Temperatura diurna média do ambiente (laboratório)	26 °C
Tempo do experimento (dias)	3
Período de realização do experimento	27 a 29/08/2009
Local	LAPPA/UFCG (Bloco CZ)
Cidade	Campina Grande (PB)

Foram distribuídas fichas de seleção (Figura 29) às duas especialistas, preparadas com base nas informações fornecidas por elas próprias, que citaram os principais defeitos que ocorrem nas mangas *Tommy Atkins*, numa linha de processamento de um galpão de processamento típico da região do Vale do São Francisco.

A cada uma das especialistas coube, aproximadamente, metade das mangas adquiridas, distribuídas aleatoriamente entre elas. As etapas do experimento estão descritas a seguir:

- inicialmente, a especialista etiquetava a manga sob análise, com uma etiqueta de papel contendo um número sequencial idêntico ao número da ficha de seleção;

FICHA DE SELEÇÃO DE MANGAS
 DATA: 28/08/09 SELECIONADORA: Fulvia Nº 04

Manga Nº 19 Manga Nº 20 Manga Nº 21
 Massa: Volume: Massa: Volume: Massa: Volume:

Problema	L	M	S
1 Ácaro			
2 Antracnose			
3 Areia(Caixote)		X	
4 Cal (Mancha)			
5 Calibres (F. da faixa)			
6 Cochonilha			
7 Colapso interno			
8 Coloração <u>25-50%</u>			
9 Colheir/Transp Danos			
10 Danos Mecânicos			
11 Escoramento	X		
12 Fungos (não ident.)			
13 Lenticelas			
14 Látex (Queima)			
15 Má Formação			
16 Maturação			
17 Mocamento			
18 Pedúnculo (Podridão)			
19 Podridão do Carçoço			
20 Panícula			
21 Sol (Queima)			
22 Trips			X
23 Verrugose	X		
24 Outro			

Problema	L	M	S
1 Ácaro			
2 Antracnose			
3 Areia(Caixote)			
4 Cal (Mancha)			
5 Calibres (F. da faixa)			
6 Cochonilha			
7 Colapso interno			
8 Coloração <u>50-75%</u>			
9 Colheir/Transp Danos			
10 Danos Mecânicos			
11 Escoramento	X		
12 Fungos (não ident.)			
13 Lenticelas			
14 Látex (Queima)		X	
15 Má Formação			
16 Maturação			
17 Mocamento			
18 Pedúnculo(Podridão)			
19 Podridão do Carçoço			
20 Panícula			
21 Sol (Queima)			
22 Trips			
23 Verrugose			
24 Outro:			

Problema	L	M	S
1 Ácaro			
2 Antracnose			
3 Areia(Caixote)			
4 Cal (Mancha)			
5 Calibres (F. da faixa)			
6 Cochonilha			
7 Colapso interno			
8 Coloração <u>10-25%</u>			
9 Colheir/Transp Danos			
10 Danos Mecânicos			
11 Escoramento			
12 Fungos (não ident.)			
13 Lenticelas			
14 Látex (Queima)			X
15 Má Formação			X
16 Maturação			
17 Mocamento			
18 Pedúnculo(Podridão)			
19 Podridão do Carçoço			
20 Panícula			
21 Sol (Queima)			
22 Trips			
23 Verrugose			
24 Outro:			

Figura 29 - Ficha de seleção de mangas.

- a cada identificação de um defeito, uma nova etiqueta era colocada na superfície da fruta, contendo o número (código) deste defeito, correspondente ao código da ficha de seleção, para que a fotografia a ser feita posteriormente permitisse associar o defeito ao número da ficha de seleção;
- após o etiquetamento do defeito, a ficha era preenchida com as características daquele defeito específico (L = Leve; M = Moderado; S = Severo);
- o processo de identificação e etiquetamento dos defeitos era repetido até que todos os defeitos julgados de importância pela especialista, naquela fruta, fossem registrados na ficha;
- para a conclusão do preenchimento da ficha, a especialista classificava a fruta segundo sua coloração, em 5 níveis correspondentes a uma estimativa visual do percentual de área superficial da fruta com cor vermelha: (1) 0 a 10%; (2) > 10% a 25%; (3) > 25% a 50%; (4) > 50% a 75%; (5) maior que 75%;

- na etapa seguinte, parte das frutas foi pesada, usando-se uma balança digital com resolução de 1 grama, adicionando dado fundamental para posterior desenvolvimento de técnicas de classificação automatizada por estimativa de peso, via processamento de imagens;
- concluindo o experimento, foram feitas duas fotografias da fruta (fundo branco, em repouso), “frente” e “verso”, ou seja, nas duas posições típicas de repouso da fruta em uma superfície plana horizontal. As imagens foram utilizadas, posteriormente, para o estudo de técnicas de classificação por estimativa de peso, descritas no Capítulo 4.

As fotos foram feitas com uma câmera digital Sony P7, colocada na parte superior de uma caixa de dimensões 50 cm x 50 cm x 50 cm, com todas as paredes internas recobertas por cartolina branca e iluminadas internamente por duas lâmpadas PL de 20 W, conforme mostrado na Figura 30. Os parâmetros de configuração da câmera foram: tipo de imagem: colorida (RGB); tamanho da imagem: 2048 x 1536 pixels; foco: 0,5 m; exposição: 0 EV; balanceamento de brancos: auto; flash: off.

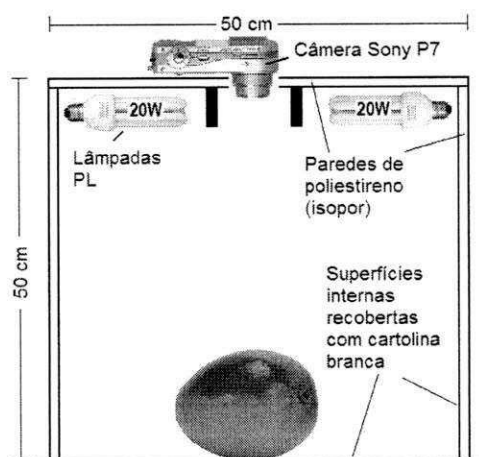


Figura 30 - Aparato construído para captura das imagens das mangas.

Os dados das fichas de seleção foram digitados em uma planilha Excel™ e foram feitas as análises descritas no item seguinte.

Na Figura 31 são mostradas imagens típicas das frutas cujos defeitos foram catalogados. As duas imagens (“lado 1” e “lado 2”) da linha superior são da mesma fruta, de N° 18; as duas imagens da linha inferior são da fruta N° 21.

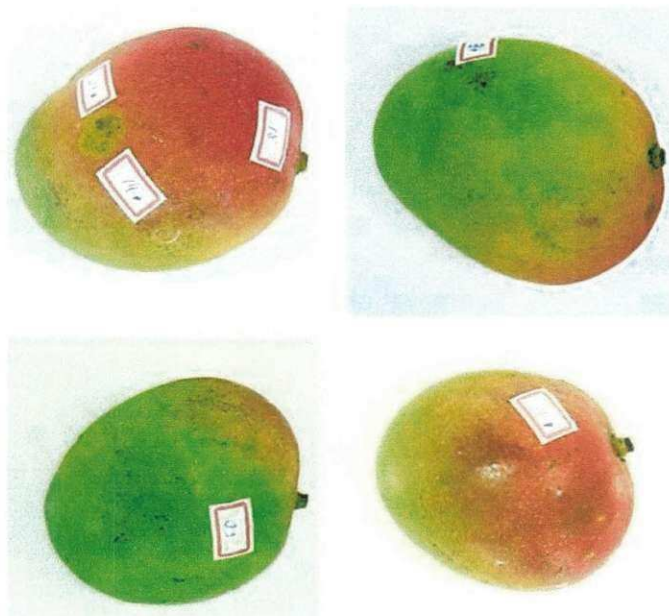


Figura 31 - Imagens típicas de frutas cujos defeitos foram catalogados.

1.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.5.1. Defeitos encontrados

Os defeitos encontrados neste lote de mangas estão mostrados na Figura 32. Pode-se observar que o escurecimento de lenticelas foi o principal defeito catalogado (56,80%), seguido pelos arranhões provocados pela areia na caixa de transporte (45,49%). As manchas por látex também tiveram alta ocorrência, assim como os defeitos causados por tripes e por verrugose. Escoramentos e danos diversos de colheita e transporte completam a lista dos principais defeitos encontrados neste lote. A soma dos percentuais não é 100% devido à ocorrência de defeitos simultâneos (múltiplos) em um mesmo fruto.

A maturação excessiva teve 62 ocorrências (8,87%), devida ao amadurecimento ocorrido durante o tempo do experimento (3 dias), uma vez que

as frutas não estavam refrigeradas e a temperatura ambiente estava relativamente elevada, aumentando a taxa de respiração dos frutos e conseqüente amadurecimento rápido. Assim, este percentual não deve ser considerado como representativo de um lote de mangas típico no momento da compra ao distribuidor, embora se verifique grandes quantidades de frutos maduros nas prateleiras dos supermercados da cidade, uma vez que estes frutos, normalmente, são expostos também sem refrigeração.

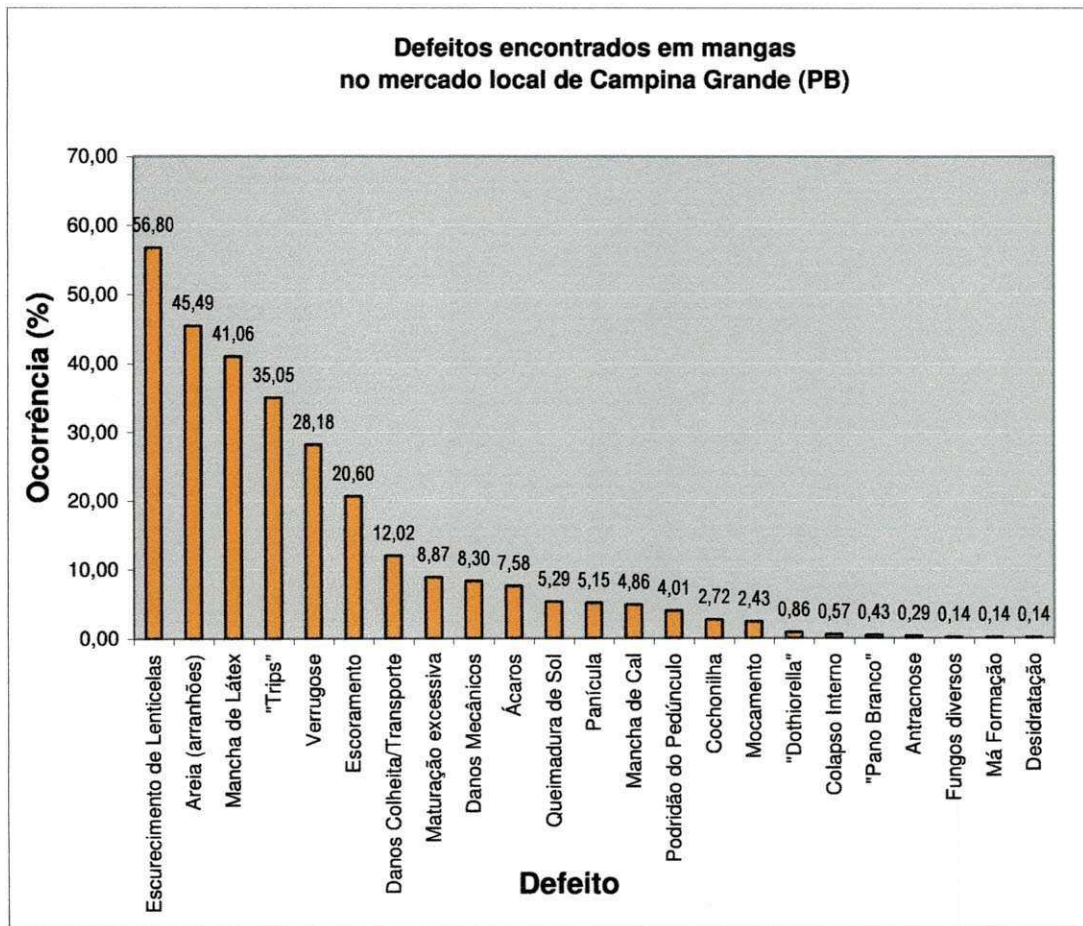


Figura 32 - Defeitos encontrados em mangas do mercado local de Campina Grande (PB)

Diversos outros defeitos e seus causadores típicos tiveram menor importância neste lote. Por outro lado, a ficha de seleção, preparada com base nas ocorrências típicas de defeitos encontrados em galpões de processamento do Vale de São Francisco, mostrou-se adequada para a seleção dos frutos do mercado local de Campina Grande (PB). Somente 1,43% dos defeitos

encontrados não estavam originalmente listados na ficha, pertencendo à classe “Outros” (desidratação, pano branco e *dothiorella*) durante a catalogação.

Um fato importante a destacar é a baixa incidência de antracnose, o que confirma a resistência da variedade *Tommy Atkins* a esta doença. Foram identificadas também, alta incidência de “tripés” e de verrugose.

Os danos mecânicos, de colheita e transporte e as manchas e queimaduras provocadas pelo látex representaram grande percentual dos defeitos encontrados. Boas práticas agrícolas, evitando-se o escorrimento do látex sobre a fruta, no campo, além de pesquisas para o desenvolvimento de técnicas de embalagem e transporte que minimizem os danos mecânicos e arranhões por areia, certamente contribuirão sobremaneira para a melhoria da qualidade das frutas comercializadas.

Na Figura 33 são mostrados alguns exemplos de imagens capturadas das mangas catalogadas nesta etapa.

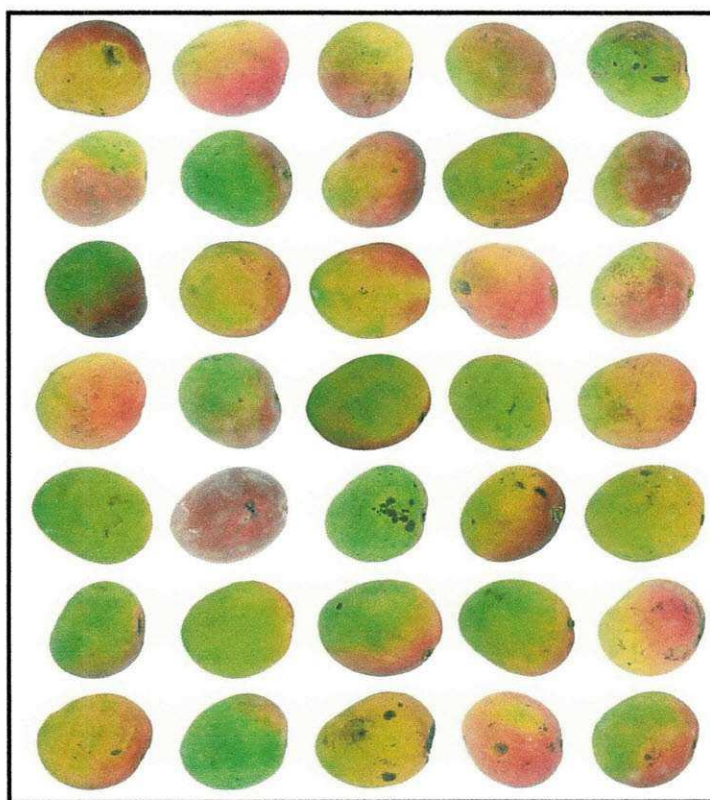


Figura 33 - Exemplos de imagens de mangas capturadas com o aparato da Figura 30.

1.5.2. Defeitos simultâneos

A partir dos dados coletados neste experimento também foi possível calcular o percentual de mangas com defeitos simultâneos, múltiplos. Está fora do escopo deste trabalho a identificação das causas, sejam de produção, fisiológicas ou patológicas, pré ou pós-colheita, que favoreçam a ocorrência de defeitos simultâneos. No entanto, a apresentação destes dados pode contribuir para o entendimento do problema, subsidiando pesquisas futuras que estabeleçam relações entre as causas, tanto na área de fitopatologia quanto no desenvolvimento de novos materiais para embalagem e novas técnicas de produção, colheita e transporte que minimizem a ocorrência de defeitos múltiplos e simultâneos.

Os percentuais de ocorrência de defeitos simultâneos são mostrados na Figura 34. Apenas 37 frutos (5,29%) apresentaram somente um defeito. Aproximadamente 70% das mangas apresentaram dois ou três defeitos. Em um mesmo fruto, foram catalogados, no máximo, seis defeitos.

Um fato importante a destacar é que, embora, tenham sido especificadas, durante a catalogação dos defeitos pelas especialistas, as extensões (severidades) dos defeitos em cada manga - na escala "Leve, Moderada e Severa" - estes dados não foram considerados nesta análise inicial.

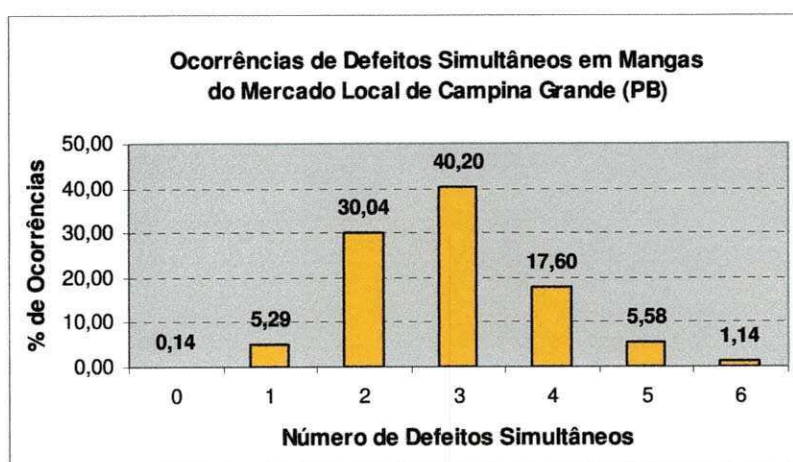


Figura 34 - Ocorrências de defeitos simultâneos em mangas do mercado local de Campina Grande (PB).

A extensão dos defeitos normalmente tem relação direta com o estágio de maturação, ocorrendo um agravamento ao longo do período de maturação do fruto. Como não foi possível determinar, com precisão, a data de colheita do lote sob estudo e considerando ainda que, certamente, os frutos não foram colhidos no mesmo dia, sob as mesmas condições, pelas razões comerciais e logísticas explicadas anteriormente, estes dados relativos à severidade dos defeitos só podem ser considerados, em alguma análise, de forma relativa. Embora não tenham sido considerados no presente estudo, os dados de severidade dos defeitos podem contribuir para pesquisas futuras.

1.5.3. Coloração

A coloração externa das mangas *Tommy Atkins* é um importante atributo de qualidade desta variedade. Para o mercado externo, são selecionados somente frutos que possuem um determinado percentual mínimo de área superficial com cor púrpura intensa, que são mais atrativos ao consumidor final, nas prateleiras dos supermercados. Uma fruta com a superfície completamente verde possui "coloração zero". À medida que a fruta apresenta mais e mais área superficial com coloração vermelha, o enquadramento nas faixas de coloração vai mudando, conforme mostrado na Tabela 8. As cinco faixas de coloração mostradas nesta tabela são as tipicamente usadas para a seleção manual nos galpões de processamento, na região do Vale do São Francisco.

Tabela 8 - Faixas de coloração tipicamente utilizadas em galpões de processamento da região do Vale do São Francisco.

Faixa	Percentual aproximado da área superficial com coloração vermelha púrpura intenso
1	0% – 10%
2	> 10% a 25%
3	> 25% a 50%
4	> 50% a 75%
5	>75%

Em épocas de safra (outubro a janeiro), a seleção para exportação é mais rigorosa em relação ao atributo coloração. Já na entressafra (fevereiro a

setembro), a seleção não é tão rigorosa, podendo ser exportadas frutas com menor área de coloração.

Vale ressaltar que as selecionadoras fazem uma estimativa visual, aproximada, do percentual da superfície da fruta com coloração vermelha. Ao tempo da realização das visitas aos galpões de processamento pós-colheita da região do Vale do São Francisco, no segundo semestre de 2009, como parte deste trabalho de pesquisa, não existia nenhum tipo de equipamento ou tecnologia em funcionamento que realizasse a seleção automatizada por coloração.

Os percentuais de coloração catalogados pelas selecionadoras, no lote de mangas descrito neste capítulo, estão mostrados na Figura 35. Percebe-se que cerca de 39% das frutas catalogadas possuía coloração na faixa “>25% a 50%” e que cerca de 71% possuía coloração menor ou igual a 50%.

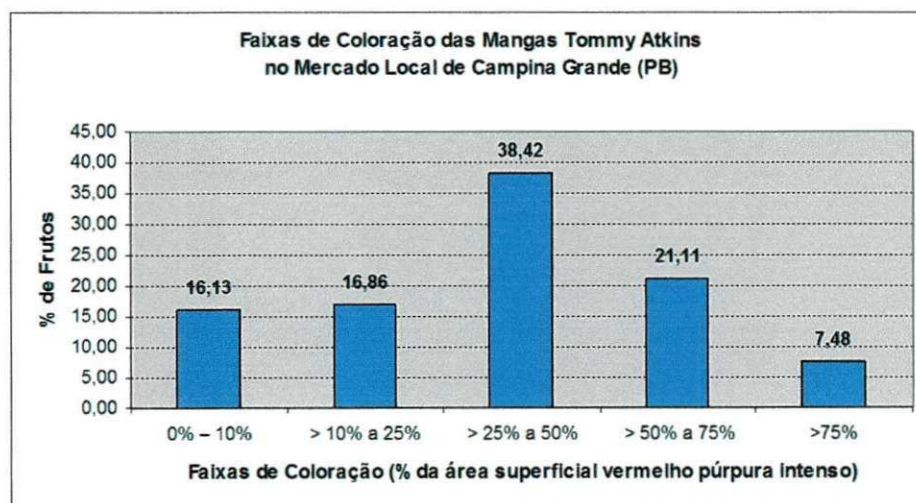


Figura 35 - Faixas de coloração das mangas *Tommy Atkins* no mercado local de Campina Grande (PB).

1.6. CONCLUSÃO

A catalogação de defeitos em mangas *Tommy Atkins* do mercado local de Campina Grande (PB), descrita neste capítulo, foi de fundamental importância para uma melhor compreensão das características visuais dos principais defeitos encontrados. Para aquele lote específico, também foram identificados os principais defeitos em ordem de importância (percentual de ocorrências, os percentuais de ocorrências de defeitos simultâneos em uma mesma fruta e os níveis de coloração típicos. Todas estas informações contribuíram para os estudos posteriores, descritos nos capítulos seguintes, relativos às técnicas de processamento de imagens aplicadas à seleção e classificação automatizada destas frutas.

As imagens coletadas nesta etapa permitiram a criação de um banco de dados de imagens de mangas *Tommy Atkins*, com os respectivos defeitos catalogados por especialistas. Embora possíveis estudos quantitativos de determinação de extensões de áreas com defeitos estejam comprometidos pela impossibilidade de determinação precisa do tempo de colheita e condições de transporte daqueles frutos, estas imagens, conjuntamente com os dados de coloração e medidas de peso, constituem-se numa valiosa fonte de informações qualitativas das características visuais dos defeitos típicos. Este banco poderá ser utilizado em trabalhos posteriores, principalmente no desenvolvimento de metodologias para seleção e classificação com base em processamento de imagens.

1.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, J.A.; HARKER, R.F. **Texture**. Auckland, New Zealand: Albert Research Centre, 2004. 19p. Disponível em: <www.ba.ars.usda.gov/hb66/021texture.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2010.

AGROPECUÁRIA RORIZ DANTAS LTDA. **Catálogo de defeitos**. Controle de Qualidade. Belém do São Francisco, PE, 2009. 33p.

ARMSTRONG, W.P. **Fruits called nuts**. 2009, 11p. Disponível em: <<http://waynesword.palomar.edu/ecoph8.htm>>. Acesso em: 30 jan. 2010.

ASSIS, J.S. de; SELF, G.; CARON, V.C. Effects of postharvest handling on lenticel spotting of '*Tommy Atkins*' mangoes from northeast Brazil. In: INTERNATIONAL MANGO SYMPOSIUM, 8, 2009, África do Sul, **Annals...** Africa do Sul: Oosthuyse, S.A. 2009.

BARBOSA, F.R. Manejo integrado de pragas da mangueira. In: SIMPÓSIO DE MANGA DO VALE DO SÃO FRANCISCO, 1, 2005, Juazeiro, **Anais...** Juazeiro: Embrapa Semi-Árido. 2005, p.147-184. ISBN/ISSN: 1806-7476.

BIBLIOTECA VIRTUAL DO ESTUDANTE DE LÍNGUA PORTUGUESA. **Manga**: textos didáticos e temáticos. São Paulo: USP, 2009. Disponível em: <http://www.bibvirt.futuro.usp.br/index.php/textos/didaticos_e_tematicos/frutas_no_brasil/manga>. Acesso em: 01 abr. 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **ALICE-Web**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>>. Acesso em: 28 jan. 2010.

CHOUDHURY, M.M.; COSTA, T.S. da. **Mercado da manga**: situação atual e perspectivas. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2001. 8p. (Embrapa Semi-Árido. Comunicado técnico, 97).

COSTA, J.G. da; SANTOS, C.A.F. **Cultivo da mangueira: CULTIVARES**. Petrolina: Embrapa Semi-árido, 2004. 3p. (Embrapa Semi-Árido. Sistemas de Produção, 2). ISSN 1807-0027. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Manga/CultivodaMangueira/cultivares.htm>>. Acesso em: 01 fev. 2010.

DIAS, G. **Mangueira (*Mangifera indica* L.)**. [S.l.]: Fruticultura Tropical Brasileira. [2011]. Disponível em <<http://www.frutiferas.com.br/htm/manga.htm>>. Acesso em 29 jan. 2010.

DONADIO, L.C. (Org). **Variedades brasileiras de manga**. ed. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1996. 74p. (Natura naturata).

FAO/ONU. **Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas: proyecciones al año 2010**. Itália: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO, 2004. (Série Documentos de la FAO sobre Productos Básicos y Comercio, 1). ISBN: 9253050772. Disponível em <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/y5143s/y5143s00.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2010.

FAO/UN. **Current situation and medium-term outlook for tropical fruits**. 2006. Disponível em: <http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/218/en/Sit_web_e.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2010.

FILGUEIRAS, H.A.C.; MENEZES, J.B.; AMORIM, T.B.F.; ALVES, R.E.; CASTRO, E.B. de. **Características da fruta para exportação**. In: FILGUEIRAS, H. A. C. (Org.). **Manga: Pós-colheita**. ed. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2000. Cap. 2, p. 14-22. (Série Frutas do Brasil, 2).

INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS. **Produção brasileira de frutas por Estado - 2007**. [São Paulo], 2009a. Disponível em: <<http://www.ibraf.org.br/estatisticas/ProducaoBrasileiradeFrutasporEstado2007.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS. **Comparativo das exportações de frutas frescas 2008-2007 (dados da SECEX/MDIC)**. [São Paulo], 2009b. Disponível em: <<http://www.ibraf.org.br/estatisticas/Exporta%C3%A7%C3%A3o/ComparativoExportacoesBrasileiras2008-2007.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2010.

KADER, A.A. **Mango: recomendaciones para mantener la calidad postcosecha**. Tradução de Clara Pelayo. México: Asociación para el Desarrollo Rural de El Hierro, 2006. Disponível em: <<http://www.ashero.org/Post%20Cosecha%20Mango.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2010.

KWANTLEN, Polytechnic University. **Fruit types & introduction to selected flowering plant families**. Surrey: School of Horticulture, 2008 (Botany Lab Review), 33 p. Disponível em: <www.kwantlen.ca/horticulture/resources/labreviews/botany/ppt_06/lab3_06.pdf>. Acesso em: 31/01/2010.

LIMA, M.A.C. de. **Manga: Queima pelo Sol**. Brasília: Agência de Informação EMBRAPA. 2007, 1p. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia22/AG01/arvore/AG01_123_24112005115226.html>. Acesso em: 01 fev. 2010.

LIMA, M.A.C. de. **Manga: colapso interno**. Brasília: Agência de Informação EMBRAPA. 2007a, 1p. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia22/AG01/arvore/AG01_122_24112005115226.html>. Acesso em: 01 fev. 2010.

LIMA, M.A.C. de. **Manga: distúrbios fisiológicos**. Brasília: Agência de Informação EMBRAPA. 2007b, 1p. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia22/AG01/arvore/AG01_34_24112005115221.html>. Acesso em: 02 fev. 2010.

LITZ, R.E.; MUKHERJEE, S.K. **The mango: botany, production and use**. 2nd ed. USA: CAB International. 2009, 696p. ISBN: 184593489X.

MEDEIROS, F.P.A. **Arquitetura de hardware e software distribuída para fusão de sensores e atuadores**. Rio Grande do Norte. Universidade Federal do rio Grande do Norte. 2006. (Plano de Tese de Doutorado). Disponível em: <<http://www.dca.ufrn.br/~petronio/Plano.doc>>. Acesso em: 15/12/2006.

MOURA, R. **Pós-colheita de frutas: a ciência da conservação**. Brasília: EMBRAPA, 2009. Entrevista concedida pelo pesquisador Ricardo Elesbão, da Embrapa Agroindústria Tropical, em 28.04.2009. Disponível em: <<http://www.embrapa.gov.br/imprensa/noticias/2009/abril/4-semana/pos-colheita-de-frutas-a-ciencia-da-conservacao/>>. Acesso em: 28 jan. 2010.

PERNEZNY, K.; SIMONE, G.W. Diseases of Mango (*Mangifera indica* L.). **American Phytopathological Society (APS)**, 2000, 03p. Disponível em: <<http://www.apsnet.org/publications/commonnames/Pages/Mango.aspx>>. Acesso em: 02 fev. 2010.

PIÑEIRO, M.; RÍOS, L.B.D. Material 3.4: Components of a quality standard for fresh horticultural produce. In: _____. **Improving the quality and safety of fresh fruits and vegetables: a practical approach**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004. Part I, Section III, p. 12-13. Disponível em <http://s3.esoft.com.mx/esofthands/include/upload_files/4/Archivos/16%20Improving%20the%20quality%20and%20safety%20of%20fresh%20fruits%20and%20vegetables%20I.pdf>. Acesso em 20 jan. 2009.

PRADO, R. de M. Nutrição e desordens fisiológicas na cultura da manga. In: ROZANE, D.E.; DAREZZO, R.J.; AGUIAR, R.L.; AGUILERA, G.H.A.; ZAMBOLIM, L. (Org.). **Manga: produção integrada, industrialização e comercialização**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004, p. 199-231. Disponível em <http://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/nutr_des_fisio_cult_manga.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2010.

RIBEIRO, I.J.A.; ROSSETTO, C.J.; GALLO, P.B.; BORTOLETTO, N.; SOARES, N.B.; CARVALHO, L.H.; SABINO, J.C.; MARTINS, A.L.M.; SILVEIRA, L.C.P.

Seca-da-mangueira: importância do porta-enxerto resistente à seca-da-mangueira causada por *ceratocystis fimbriata*. Campinas: Instituto Agronômico. 2004. Disponível em:

<<http://www.iac.sp.gov.br/Cultivares/Folders/Manga/IAC104Dura.htm>>. Acesso em: 18 out. 2010.

ROMÃO. **Mangueira centenária - Goiás - Brasil**. 2007. 1 fotografia, color.

Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/6110258>>. Acesso em: 31 jan. 2010.

ROSSETTO, C.J. **Variedades de mangas**. Votuporanga: TodaFruta. 2008.

Disponível em:

<http://www.todafruta.com.br/todafruta/mostra_conteudo.asp?conteudo=18323>. Acesso em: 31 jan. 2010.

RUHM, K.H. Sensor fusion and data fusion: mapping and reconstruction.

Measurement, v. 40, n. 2, p. 145-157, 2007.

SPJUT, R.W. A systematic treatment of fruit types. **The New York Botanical Garden**, Bronx, v. 70, n. 21, Jan. 1994. Disponível em:

<http://www.worldbotanical.com/fruit_types.htm>. Acesso em: 31 jan. 2010.

STEINMETZ, V.; SEVILA, F.; BELLON-MAUREL, V. A methodology for sensor fusion design: application to fruit quality assessment. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 74, n. 1, p. 21-31. Sept. 1999. ISSN: 0021-8634

TAVARES, S.C.C. de H. **Cultivo da mangueira - manejo integrado de doenças**.

Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2004. (Sistemas de Produção, 2). Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Manga/CultivodaMangueira/doencas.htm>>. Acesso em: 18 out. 2010. ISSN 1807-0027.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. Instituto de Biologia. **Morfologia vegetal - Organografia - FRUTO**. Uberlândia, 2006. 5p. Disponível em:

<<http://www.anatomiavegetal.ib.ufu.br/pdf-recursos-didaticos/morfvegetalorgaFRUTO.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2010.

VALENTE, M.; LEARDI, R.; SELFA, G.; LUCIANO, G.; PAIN, J.P. Multivariate calibration of mango firmness using vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method. **Journal of Food Engineering**. London, v. 94, n. 1, p. 7-13. 2009. ISSN: 0260-8774.

WEISZFLOG, W. (Ed.). **Michaelis: Moderno Dicionário da Língua Portuguesa** [online]. São Paulo: Melhoramentos, 2010. Disponível em:

<<http://michaelis.uol.com.br/>>. Acesso em: 29 jan. 2010. ISBN: 8506027594.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE IMAGENS APLICADAS À ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE MANGAS TOMMY ATKINS

2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve processamentos realizados em imagens de mangas *Tommy Atkins*, capturadas com câmeras de vídeo baixo custo, visando o desenvolvimento de técnicas e algoritmos que permitam estimar dimensões e, posteriormente, os pesos das mangas. Esta metodologia poderá ser uma alternativa à utilização de equipamentos de alto custo, importados, como as balanças dinâmicas encontradas em linhas de processamento pós-colheita de frutas.

Nos sistemas de seleção e classificação pós-colheita existentes nos galpões de processamento de empresas da região do Vale do São Francisco, é feita, inicialmente, uma seleção manual por defeitos (internos e externos) e, depois, uma classificação por peso, esta última de forma automatizada, com a utilização de balanças dinâmicas sofisticadas.

A automatização das técnicas de seleção por defeitos ainda é um grande desafio, devido à diversidade dos parâmetros de escolha envolvidos e à complexidade das decisões subjetivas das selecionadoras. Como parte das etapas de desenvolvimento de um sistema automatizado de seleção por defeitos e classificação por peso, baseado em processamento de imagens, é fundamental a utilização de uma técnica adequada de segmentação de imagens, de modo que a região de interesse (a fruta) seja corretamente extraída do fundo da imagem, permitindo que suas características - forma, dimensões, percentual de área com padrões diferentes, o que caracterizaria possíveis defeitos - possam ser devidamente quantificadas na etapa posterior, que é o processamento propriamente dito das imagens.

A segmentação, que é considerada uma etapa de pré-processamento, inclui um cálculo muito importante que é a determinação do limiar, um valor numérico a partir do qual todos os pixels da imagem serão convertidos, por exemplo, em pretos, quando tiverem valores abaixo do limiar; ou em brancos, quando tiverem valores iguais ou acima daquele limiar.

2.2. OBJETIVOS

O objetivo do estudo realizado com imagens de mangas e descrito neste capítulo foi o de estimar as dimensões das frutas pelas imagens obtidas com a utilização de câmeras de vídeo de baixo custo.

2.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.3.1. Etapas de pré-processamento de imagens

Antes da segmentação da imagem, muitas vezes são necessárias etapas adicionais de pré-processamento que, de uma maneira ou de outra, contribuem para a melhoria da qualidade das imagens: aumento da nitidez, melhoria do contraste entre o objeto de interesse e o fundo, redução de ruídos, entre outras transformações que, se aplicadas a imagens capturadas com algum tipo de problema, ajudam sobremaneira na correta segmentação da região de interesse.

2.3.2. Segmentação da imagem

A segmentação corresponde ao reconhecimento automático da região de interesse, no caso, o conjunto de pontos (*pixels*) correspondentes aos produto(s) hortícola(s) presente(s) na imagem total, permitindo sua “extração” da parte da imagem correspondente ao fundo. As quatro principais técnicas de segmentação utilizadas, atualmente, em imagens de alimentos, de acordo com SUN (2007) são:

2.3.2.1. Segmentação baseada em limiar

A segmentação baseada em limiar utiliza, entre outras, as seguintes técnicas:

- seleção manual;
- *isodata*;
- algoritmos de função objetiva (*objective function algorithms*), que podem ser dos tipos “baseados em variância” (*variance-based*) e “baseados em entropia” (*entropy-based*);
- agrupamento de histograma (*histogram clustering*).

2.3.2.2. Segmentação baseada em regiões

A segmentação baseada em regiões utiliza, entre outras, as seguintes técnicas:

- crescimento e fusão (*growing-and-merging*);
- cisão-fusão (*splitting-and-merging*).

2.3.2.3. Segmentação baseada em gradientes

A segmentação baseada em gradientes utiliza, por exemplo, uma das seguintes técnicas:

- algoritmos do operador Gradiente (*Gradient operator algorithm*);
- algoritmos do operador Laplace (*Laplace operator algorithm*).

2.3.2.4. Segmentação baseada em classificação

A segmentação baseada em classificação utiliza, entre outras, as seguintes técnicas:

- redução de dimensão (*dimension reduction*), cujos métodos citados como relevantes são a Análise de Componente Principal (ACP ou *PCA*) e os *SOM* (*self-organizing maps*);

- classificação propriamente dita, cujos métodos citados como relevantes são as técnicas estatísticas, as redes neurais, *SVM* (*support vector machine*) e lógica *fuzzy*.

2.3.3. Segmentação de imagens em tons de cinza com Matlab®

O algoritmo usado pelo Matlab® para segmentação de imagens em tons de cinza é baseado no método clássico de Otsu (OTSU, 1979). É uma segmentação baseada, utilizando a técnica de análise de variância (*variance-based*) citada anteriormente. É um algoritmo consolidado, situação comprovada por sua larga utilização, até hoje, na segmentação de imagens em diversas áreas do conhecimento e como algoritmo-padrão dentro do pacote de processamento de imagens do ambiente Matlab®.

2.3.4. Trabalhos de análise e processamento de imagens aplicados à seleção e classificação de produtos hortícolas

Diversos grupos, em todo o mundo, têm realizado estudos e pesquisas para o desenvolvimento de metodologias, equipamentos e sistemas automatizados de seleção e classificação de produtos hortícolas. Alguns dos principais trabalhos publicados estão descritos a seguir.

AGUILERA et al. (2007) estudaram um caso particular de utilização de processamento de imagens para classificação de grãos. Com o programa de computador desenvolvido, *VisionQ-Lab*, foi possível classificar grãos com um desempenho médio próximo de 95%. Por outro lado, AHMAD et.al. (2005) propuseram uma metodologia de classificação automática de mangas (variedade Harum Manis) infestadas com pragas, utilizando imagens de raios X e uma abordagem chamada de sistemas imunes artificiais.

ATENCIO et al. (2009) desenvolveram um método de classificação de mangas utilizando imagens, para construção de um modelo elipsoidal tridimensional da fruta, análise de componentes principais e também uma estimativa de maturação com base na distribuição de cor da casca, no espaço

HSL. Em outro estudo, CAO et al. (2005) propuseram um método de segmentação de imagens de frutas utilizando redes neurais baseadas na teoria de ressonância adaptativa, obtendo resultados satisfatórios na detecção do pedúnculo e manchas superficiais.

CHALIDABHONGSE et al. (2006) desenvolveram um sistema de visão computacional por múltiplas imagens para extrair parâmetros bi e tridimensionais de mangas (comprimento, largura, altura), área projetada superior, volume e área superficial, para fins de seleção e classificação, com a utilização de redes neurais artificiais. Por outro lado, CHAN et al. (2007) propuseram um sistema baseado em câmeras de baixo custo e programa em Matlab para análise de cor de objetos, no caso, frutas em repouso. Os resultados mostraram que o sistema foi capaz de identificar quatro tipos de frutas tropicais (mangas, bananas, mamão papaya e tomates).

CHAROENPONG et al. (2004) desenvolveram um sistema de estimativa de volume de mangas usando um modelo de elipse bidimensional, a partir de imagens de mangas em repouso, capturadas por duas câmeras ortogonais, obtendo correlação maior que 0,99 entre o volume estimado e o volume medido pelo método referência, de deslocamento de água. Em outro estudo, CUNHA (2003) aplicou processamento de imagens na caracterização de folhas, obtendo erros menores que 3% entre áreas estimadas por imagens e áreas medidas com os instrumentos de referência.

FENG & QIXIN (2004) propuseram um sistema de alta velocidade para seleção de frutas, com base em múltiplos algoritmos para segmentação e remoção de ruído de imagens de maçãs. O sistema foi capaz de selecionar maçãs, variedade *Crystal Fuji*, com uma precisão média de 90%. Por outro lado, FORBES et al. (1999) desenvolveram um método para estimar volume de frutas a partir de duas imagens, propondo um algoritmo invariante do ponto de vista da posição da fruta (ângulo de rotação). Aplicaram redes neurais artificiais em imagens de pêras e obtiveram erros de estimativa de volume entre 1,5 % e 3,2 %.

GAY et al. (2002) propuseram um sistema, para uso em laboratório, de estimativa de cor de frutas com o objetivo de seleção, obtendo projeções cilíndricas aproximadas da superfície de maçãs. Em outro trabalho, GEJIMA et al. (2003) desenvolveram um sistema de processamento de imagens para estimar o nível de maturação de tomates usando o espaço de cor $L^*a^*b^*$, mostrando que a contagem de pontos vermelhos com determinada intensidade (G-36) forneceram melhor correlação com o índice de maturação de referência.

WANG & DONG (2008) propuseram uma modificação no método Otsu de segmentação de imagens, de modo a reduzir o tempo de execução do algoritmo e obter melhor capacidade de remoção de ruídos das imagens. Em outro estudo, IQBAL et al. (2005) desenvolveram um sistema mecânico para seleção e classificação de frutas, em tempo real, utilizando tecnologias de visão computacional.

Em um trabalho pioneiro, JARIMOPAS et al. (1991) desenvolveram uma máquina de classificação de mangas por dimensões, baseada em processamento de imagens, com a utilização do microprocessador *Motorola* 68008, obtendo desempenho de classificação em torno de 90% para uma produção de 1 tonelada por hora. Em outro estudo, YIN et al. (2009) propuseram um novo método de segmentação de imagens de frutas baseado em diferenças de cores, chamado de segmentação por limiar dinâmico, demonstrando que este método tem melhor desempenho do que outros métodos, incluindo o de *Otsu* e variantes deste.

2.4. MATERIAIS E MÉTODOS

A hipótese inicial foi a de que era possível, com câmeras de vídeo tipo *webcam*, largamente utilizadas em conversas *online* na internet, capturar imagens das frutas, inicialmente em tons de cinza, que tivessem alta correlação com as respectivas dimensões físicas dos frutos. A meta é a aplicação de processamento de imagens no desenvolvimento de uma alternativa às balanças dinâmicas de pesagem atualmente utilizadas nos galpões de processamento, que são

importadas e de alto custo, difíceis de serem adquiridas por pequenos produtores rurais ou suas cooperativas.

Para a análise e processamento das imagens coletadas nesta etapa, optou-se pela utilização do ambiente de programação Matlab®, que possui diversas e poderosas ferramentas para manipulação de imagens.

Na Figura 36 é apresentado um esquema simplificado de um sistema de baixo custo típico para aquisição e processamento de imagem, com o objetivo de seleção e avaliação da qualidade de produtos hortícolas. A imagem do produto (a) é obtido por meio de uma câmera (b) e, em seguida, enviados para uma placa de captura de vídeo (c) instalada em um microcomputador (d). Um programa (e) adquire e processa a imagem, extraindo os parâmetros relevantes para a seleção, classificação ou avaliação da qualidade do produto, seja de forma *online* ou *offline*.

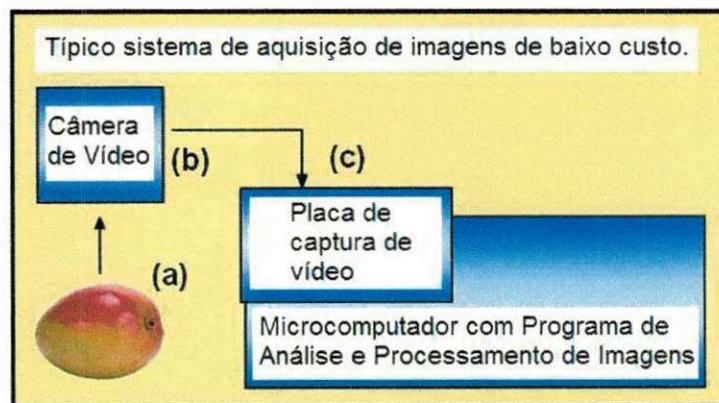


Figura 36 - Sistema de aquisição de imagens, de baixo custo.

Do lote adquirido no mercado local de Campina Grande (PB), 35 mangas foram escolhidas aleatoriamente. Também foi adquirida uma câmera comercial, de baixo custo, do tipo utilizada como câmera de vigilância, semelhante à mostrada na Figura 37, com dispositivo sensível *CCD* (*Charge-Coupled Device*) de um terço de polegada ($1/3''$), saída de vídeo padrão *NTSC* em "preto-e-branco" (tons de cinza). Esta câmera foi instalada na lateral de uma caixa de madeira confeccionada em MDF, de dimensões 50 cm x 30 cm x 20 cm, que foi pintada internamente com tinta na cor preto-fosco.



Figura 37 - Câmera de baixo custo semelhante à utilizada para captura das imagens das mangas.

A câmera digital foi presa à lateral da caixa e conectada a uma placa de captura de vídeo comercial (Figura 38), com 16 canais (apenas um deles foi utilizado), instalada no gabinete de um microcomputador PC-compatível, em um *slot* do barramento PCI. Um programa típico de captura e gravação de vídeos de segurança, que acompanha a placa, permitiu a captura de imagens das mangas, em repouso, colocadas no centro da caixa, como mostrado na Figura 39.

Como o objetivo, nesta etapa, foi o de se estudar a eficiência da segmentação, para estimativa das dimensões da fruta, sem a preocupação com a riqueza de detalhes dos defeitos dos frutos, optou-se por salvar as imagens num formato o mais compacto possível: .jpg, 320 x 240 pixels.

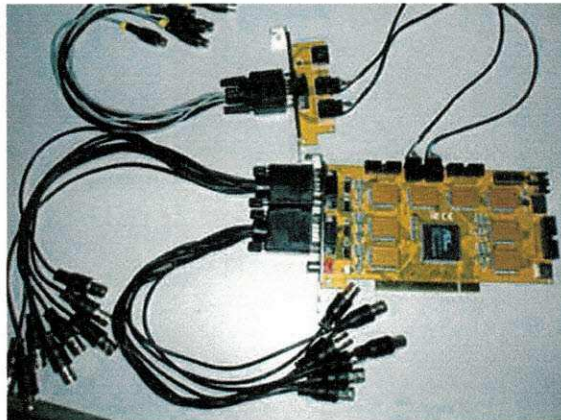


Figura 38 - Placa de captura de vídeo utilizada para transferência das imagens das mangas para um microcomputador PC-compatível.

A iluminação da manga, para obtenção de um melhor contraste entre a fruta e o fundo preto - paredes internas, pintadas, da caixa - mostrou-se um

parâmetro importante e que afetou diretamente a qualidade da imagem capturada.

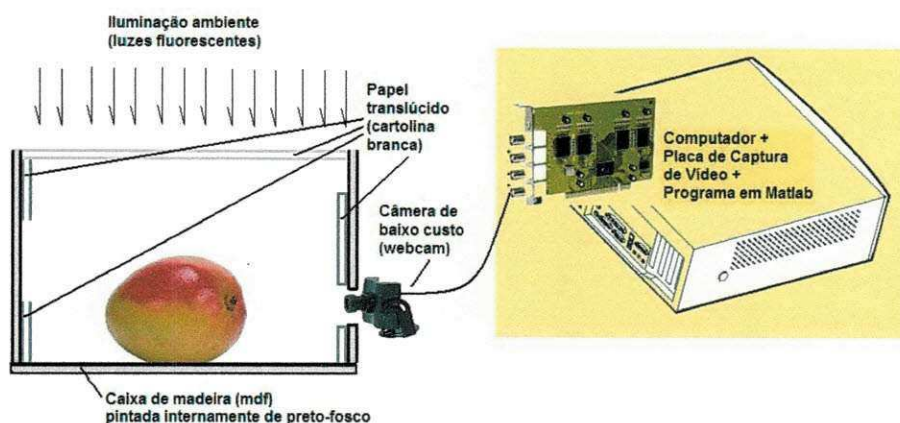


Figura 39 - Representação esquemática do aparato montado para captura de imagens das mangas.

A primeira técnica testada para iluminação da fruta foi a simples colocação de luminárias de lâmpadas fluorescentes (duas lâmpadas tipo PL, de 20W cada) sobre a caixa, de modo a iluminar a manga em sua parte superior. Esta configuração não funcionou adequadamente, uma vez que apareceram sombras na parte inferior da fruta, que foram confundidas, quando da segmentação, com o fundo e com a base da caixa.

A segunda técnica testada foi a de iluminar a manga com diodos emissores de luz (*LED's* ou *Light-emmiting Diodes*) de alto brilho, montados em placas de circuito impresso que foram colocadas nas laterais da caixa. Embora esta alternativa tenha resolvido, em parte, a questão da sombra inferior, a imagem da manga passou a apresentar pequenos focos de alta intensidade luminosa, oriundos dos feixe luminosos concentrados dos *LED's*, devido à relativamente alta reflexão da casca. Para tentar corrigir este problema, foram colocadas placas de acrílico translúcido branco à frente dos *LED's*, o que minimizou o problema citado, embora ainda não o suficiente para a obtenção de imagens adequadas para segmentação.

Após diversos outros testes realizados, a alternativa mais adequada de iluminação da manga foi a retirada da tampa da caixa e a colocação de uma folha

de papel branco (cartolina), que é translúcida, em substituição à própria tampa. Além disso, uma outra providência fundamental foi a colocação de pedaços da mesma cartolina branca nas laterais internas da caixa, em posições estratégicas não vistas diretamente pela câmera, que funcionaram como “espelhos”, refletindo para a fruta - especialmente para sua região inferior - parte da luz superior do ambiente, que já entrava na caixa de forma difusa, devido à cartolina colocada como tampa. Esta configuração, dentre todas as testadas, permitiu a captura das melhores imagens das mangas, em tons de cinza e com fundo preto. Exemplos destas imagens estão mostrados na Figura 40, onde as bordas das imagens foram recortadas manualmente; sendo mostradas somente as regiões de interesse (mangas) e pequenas partes dos fundos pretos.

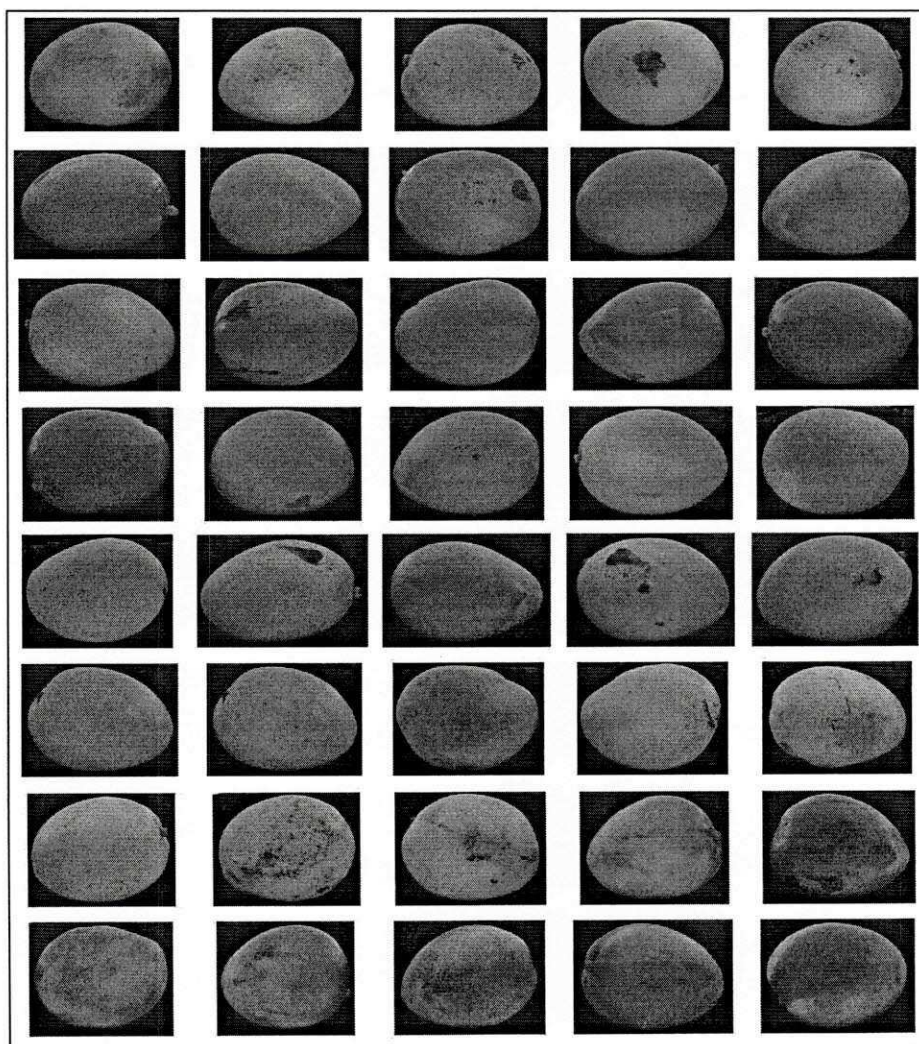


Figura 40 - Exemplos de imagens de mangas capturadas com o aparato representado esquematicamente na Figura 40.

As imagens foram feitas com os frutos em repouso sobre um pequeno bloco de madeira, também pintado de preto-fosco. Foram colocadas no local manualmente, de modo que o maior diâmetro ficasse o mais perpendicular possível da linha vertical média de visão da câmera, com o centro da fruta colocado aproximadamente no centro da imagem capturada. Tentou-se padronizar a distância média do centro da fruta para a câmera, embora isto tenha sido relativamente difícil, devidos às diversas dimensões dos frutos estudados.

Para cada fruto, foram feitas 4 imagens: horizontal 1 (H1), horizontal 2 (H2), onde os diâmetros de interesse são o comprimento e a altura do fruto, quando este está em repouso sobre uma superfície plana horizontal; e lateral 1 (L1) e lateral 2 (L2), onde os diâmetros de interesse são o comprimento e a largura, quando o fruto está em repouso sobre uma superfície plana horizontal. Os frutos foram girados manualmente, para a obtenção de cada imagem.

No caso específico do trabalho descrito neste capítulo, não foi executada nenhuma etapa adicional de pré-processamento nas imagens capturadas, uma vez que estas etapas têm o efeito adverso de aumentarem a complexidade do programa desenvolvido, com conseqüente diminuição do desempenho (no sentido de velocidade) do processamento. Caso necessário, estas técnicas de pré-processamento poderiam ser utilizadas numa etapa posterior, após completo entendimento da complexidade do problema de segmentação das imagens coletadas.

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a segmentação de uma imagem em tons de cinza, com Matlab®, é necessário, em primeiro lugar, o cálculo de um limiar global, usando-se a função *graythresh*. Esse nível de limiar foi utilizado, posteriormente, para a efetiva conversão da imagem em tons de cinza, em uma imagem binária, em preto-e-branco, com a utilização da função *im2bw*. Somente após essa conversão para preto-e-branco é possível o cálculo das dimensões da imagem segmentada, ou seja, da região de interesse, a manga.

O algoritmo utilizado na função *graythresh* do Matlab® funcionou adequadamente em duas situações: (a) quando a iluminação do fruto foi, de alguma forma, uniforme, ou seja, quando houve um maior contraste entre o fruto e o fundo, e (b) quando as frutas não apresentavam manchas pretas ou muito escuras (devido a contusão, arranhões ou quaisquer outros defeitos) próximas às bordas da fruta. A Figura 41a é típica desta situação, com uma boa segmentação da fruta mostrada na Figura 41b.

Por outro lado, a função *graythresh* estabeleceu um limiar muito alto nas situações opostas, ou seja: (a) quando houve pouca iluminação ou pouco contraste entre a imagem da fruta e o fundo; e (b) quando as frutas apresentavam manchas, causadas por defeitos, próximas às bordas, uma vez que os pixels escuros correspondentes aos defeitos foram mal interpretadas, pelo algoritmo, como fundo da imagem, (valores dos pixels, em tons de cinza, muito aproximados com os valores dos pixels do fundo da imagem).

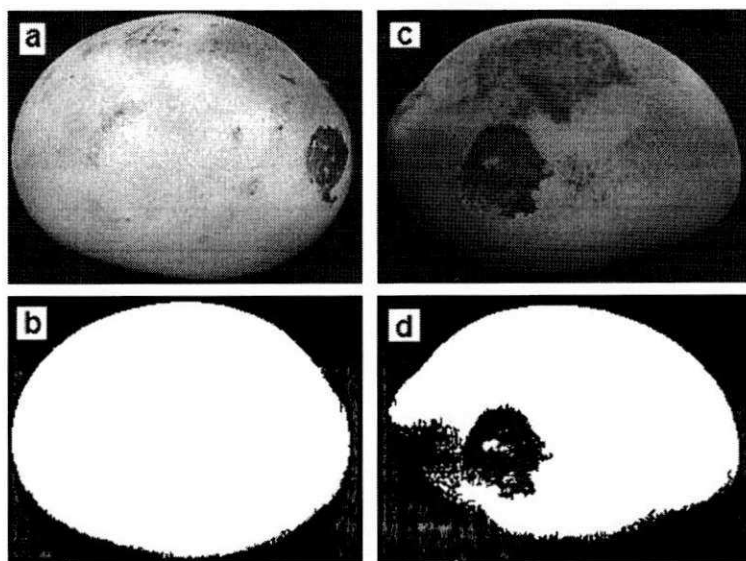


Figura 41 – Imagens de frutas (a e c) e suas respectivas segmentações (b e d) com o algoritmo-padrão do Matlab®.

A situação descrita, de falha na segmentação, ocorreu mais frequentemente em mangas com predominância de cores verde-escuro e vermelho-escuro, já que os valores numéricos dos pixels destas cores tendem a ser mais baixos, mais próximos da cor preta. Estas características de cores são

típicas de mangas *Tommy Atkins* em estágios menos avançados de maturação, incluindo o estágio considerando como ponto ótimo de colheita para exportação.

Nestes casos, a função do Matlab® utilizada em seguida, *im2bw*, não realizou uma adequada segmentação, especialmente quando a iluminação foi insuficiente na parte inferior do fruto (Figura 41c). A estimativa das dimensões físicas da manga da Figura 41c, com base nas imagens segmentadas, apresenta, visivelmente, maiores erros do que a da manga da Figura 41a.

Como a manga aproxima-se de um elipsóide, sua parte inferior tende a escurecer quando a iluminação é feita pela parte superior. Este fato reforça a importância de um adequado sistema de iluminação.

A idéia principal do trabalho descrito neste capítulo é a redução do limiar que foi calculado pelo algoritmo-padrão da função *graythresh*, do Matlab®, por um fator percentual fixo do próprio limiar, para corrigir problemas de segmentação como o mostrado na Figura 41d. Na Tabela 9 são mostradas as etapas do programa proposto com este objetivo.

A hipótese testada foi a de que os produtos das medidas reais (comprimento x altura) das frutas tinham maior correlação com mesmos comprimentos, estimados (em pixels), quando usado o algoritmo modificado, em relação ao algoritmo-padrão do Matlab®.

Na Figura 42 são apresentados exemplos de segmentações de algumas das imagens capturadas, mostrando a aplicação do algoritmo-padrão (Método Otsu) e do algoritmo proposto, incluindo a função opcional *imfill*.

Os resultados obtidos com imagens de 35 mangas mostraram correlação relativamente baixa ($r^2 = 0,62$), quando foi utilizado o algoritmo-padrão do Matlab®, entre os produtos dos diâmetros estimados (comprimentos x alturas médias das imagens L1 e L2) e as medidas reais de comprimento e largura, feitas com um paquímetro.

Tabela 9 - Etapas do programa de segmentação das imagens das mangas, com fundo preto, mostrando as funções Matlab® utilizadas.

Etapa	Função Matlab®	Descrição	Observações
1	imread	Lê imagem lateral da fruta, do arquivo armazenado em disco.	A imagem, embora capturada com uma câmera preto-e-branco, é salva pelo programa de captura como um arquivo <i>RGB</i> (3 camadas).
2	rgb2gray	Converte imagem (<i>RGB</i> ou <i>colormap</i>) para tons de cinza.	A imagem original, embora em tons de cinza, foi armazenada pelo programa de captura com imagem em 3 camadas <i>RGB</i> . Após a aplicação desta função, o resultado é uma imagem em tons de cinza, 1 camada.
3	graythresh	Calcula o limiar global da imagem, usando o método Otsu.	Este algoritmo é padrão do Matlab®. A modificação proposta está diretamente relacionada a esta função.
4	im2bw	Converte imagem, de tons de cinza para preto-e-branco	Esta função usa o limiar calculado na função anterior.
5	bwlabel	Identifica regiões conectadas na imagem binária.	A função que executa a segmentação propriamente dita. Tanto a fruta quanto possíveis defeitos aparecem como regiões conectadas.
6	regionprops	Mede propriedades das regiões de uma imagem (em tons de cinza).	Poderosa função que calcula e salva dois vetores, que contêm os parâmetros <i>MajorAxisLenght</i> , (máximo diâmetro) e <i>MeanIntensity</i> (intensidade média) de todas as regiões identificadas pela função anterior.
7	max	Identifica o maior elemento em uma matriz.	Encontra o maior diâmetro, entre todas as regiões identificadas, identificando seu índice, ou seja, de qual região foi calculado este maior diâmetro encontrado.
8	bwlabel	Identifica regiões conectadas na imagem binária.	Esta função é aplicada novamente, agora utilizando um limiar que foi reduzido por um percentual fixo em relação ao limiar utilizado na etapa 5.
9	imfill	Preenche regiões e vazios (buracos) de uma imagem.	Opcional. Preenche vazios (buracos) na região de interesse (manga) com pixels brancos, melhorando a estimativa das dimensões da manga.
10	regionprops	Mede propriedades das regiões de uma imagem (em tons de cinza).	Esta função é aplicada novamente, após a modificação proposta na etapa 8. Calcula e salva dois novos vetores, que contêm os parâmetros <i>MajorAxisLenght</i> (máximo diâmetro) e <i>MinorAxisLenght</i> (menor diâmetro, ou altura da fruta) definitivos, corrigidos, de todas as regiões identificadas pela função da etapa 8.
11	max	Identifica o maior elemento em uma matriz.	Encontra o maior e o menor diâmetros, que correspondem ao comprimento e à altura da manga, em pixels.

O algoritmo alternativo proposto incluiu um percentual de redução do limiar previamente calculado. Segmentações foram realizadas com fatores de redução de 5% a 45% do limiar original, em passos de 5%, obtendo-se melhor

correlação ($r^2 > 0,85$) entre as dimensões reais e as estimadas quando foi aplicada uma redução de 35%. Na Figura 42 observa-se que os resultados com a utilização da função *imfill* foram, qualitativamente, ainda melhores (não foram calculadas as correlações para este caso), devido ao preenchimento de defeitos escuros que afetam diretamente o desempenho da função *regionprops*, que calcula os diâmetros das imagens segmentadas das mangas.

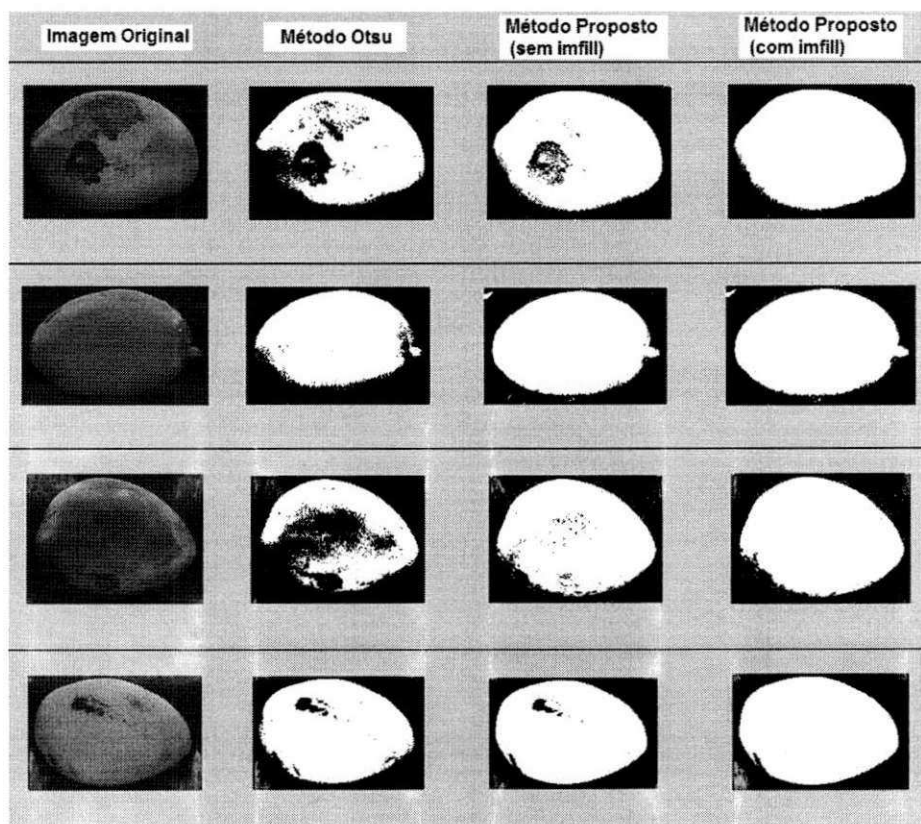


Figura 42 - Exemplos de segmentações de imagens com o algoritmo-padrão do Matlab® (método Otsu) e com o método proposto.

No que diz respeito ao tempo de processamento a análise do desempenho das modificações propostas foge ao escopo deste trabalho, uma vez que este parâmetro depende de diversas características de *hardware* e *software*, entre elas: o computador e o respectivo processador utilizado; a linguagem de implementação do algoritmo; o desempenho de interpretadores e compiladores e, até mesmo, a utilização de processadores especializados, como os DSP (*Digital Signal Processors*), que podem reduzir significativamente o tempo de processamento.

2.6. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que, com a utilização de um sistema de aquisição de imagens de baixo custo, composto por uma câmera digital simples, que capture imagens em preto-e-branco, de baixa resolução; uma placa de captura de imagens e um computador com um programa desenvolvido no ambiente Matlab®, é possível se obter melhores segmentações de imagens de mangas *Tommy Atkins*, em fundo preto, quando se aplica uma modificação no algoritmo-padrão do Matlab®, reduzindo-se o valor do limiar em um percentual de 35% em relação ao limiar originalmente calculado. Esta modificação permite melhores estimativas das dimensões físicas das mangas fotografadas.

O percentual de redução do limiar, de 35%, aplica-se, neste caso, às características de iluminação específicas do aparato construído para este experimento. Outros percentuais de redução podem ser testados para outros esquemas de iluminação.

Estudos posteriores devem ser conduzidos no sentido de se avaliar o desempenho desta modificação proposta, em relação à utilização do algoritmo-padrão, conjuntamente com etapa(s) de pré-processamento de melhoria de contraste, comparando correlações com as medidas reais e com as velocidade de processamento.

No método proposto, é necessária a determinação experimental do valor fixo do percentual de redução do limiar, que deve ser calibrado para cada esquema de iluminação. Por outro lado, uma vez feita a calibração, não são necessários novos ajustes, a não ser que haja modificação na intensidade da iluminação. O limiar adaptativo proposto no capítulo seguinte sobrepõe esta necessidade.

Os resultados obtidos sugerem também a possibilidade de utilização do algoritmo proposto para estimativas de volume e peso, via processamento de imagens, de outras frutas e produtos hortícolas em geral.

2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, J.M.; CIPRIANO, A.; ERAÑA, M.; LILLO, I.; MERY, D.; SOTO, A.; VALDIVIESO, C. Computer vision for quality control in latin american food industry: a case study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION: WORKSHOP ON COMPUTER VISION APPLICATIONS FOR DEVELOPING COUNTRIES, 2007, Rio de Janeiro, Brasil. **Annals...** Rio de Janeiro, Brasil: Institute of Electrical and Electronics Engineers. Oct. 2007, p. 1-11.

AHMAD, H.; YACOB, Y.; SAAD, P.; RAO, R.A.A.; ISMAIL, S. Automatic classification of weevil-infested harum manis mangoes using artificial immune systems approach. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS, 1, 2005. Perlis, Malaysia. **Proceeding...** Perlis, Malaysia: Kolej Universiti Kejuruteraan Utara Malaysia. May. 2005.

ATENCIO, P.; SÁNCHEZ, G.; BRANCH, J.W. Automatic visual model for classification and measurement of quality of fruit: case *Mangifera Indica L.* **Dina.** Colombia, Medellín, v. 76, n. 160, p. 317-326. Dic. 2009. ISSN 0012-7353.

CAO, Y.; WANG, C.; LI, Y. Fruit images segmentation based on fuzzy art model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS AND BRAIN, 2005. Beijing, China. **Proceeding...** Beijing, China: China Neural Networks Council. Oct. 2005.

CHALIDABHONGSE, T.; YIMYAM, P.; SIRISOMBOON, P. 2D/3D vision-based mango's feature extraction and sorting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION, ROBOTICS AND VISION, 9, 2006. Singapore. **Conference paper...** Singapore: School of Electrical and Electronic Engineering. Dec. 2006.

CHAN, L.M; TAN, R.; THIO, G. Design of visual-based color classification system. **UCSI Academic Journal: Journal for the Advancement of Science & Arts.** Kuala Lumpur, v. 2, p. 30-33, 2007.

CHAROENPONG, T.; CHAMNONGTHAI, K.; KAMHOM, P.; KRAIRIKSH, M. Volume measurement of mango by using 2D ellipse model. In: International Conference on Industrial Technology, 2004, Hammamet, Tunisia. **Annals...** Hammamet, Tunisia: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Dec. 2004. pp. 1438-1441.

CUNHA, J.B. Application of image processing techniques in the characterization of plant leaves. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2003, Rio de Janeiro, Brasil. **Proceeding...** Rio de Janeiro, Brasil: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Jun. 2003.

FENG, G.; QIXIN, C. Study on Color Image Processing Based Intelligent Fruit Sorting System. In: WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, 5, 2004, Hangzhou, **Proceeding...** Hangzhou: Zhejiang University, 2004, v. 6, p. 4802-4805.

FORBES, K.A.; TATTERSFIELD, G.M. Estimating fruit volume from digital images. In: AFRICON CONFERENCE IN AFRICA, 5, 1999, Cape town. **Annals...** [New York]: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Sep. 1999

GAY, P.; BERRUTO, R.; PICCAROLO, P. Fruit Color Assessment for Quality Grading Purposes. **ASAE Meeting**. St. Joseph, Paper No. 02-6097, 2002.

GEJIMA, Y.; ZHANG, H.; NAGATA, M. Judgment on Level of Maturity for Tomato Quality Using L*a*b* Color Image Processing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS, 1, 2003, Kobe, Japan, **Proceeding...** Kobe, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003, v.2, p. 1355-1359.

IQBAL, S.M.; GANESAN, D.; RAO, P.S. Mechanical system for on-line fruits sorting and grading using machine vision technology. **Instrument Society of India**. Bangalore, v. 34, n. 3, p. 153-162, 2005.

JARIMOPAS, B.; SIRIRATCHATAPONG, P.; CHAIYABOONYATHANIT, T.; NIEMHOM, S. Image-processed mango sizing machine. **Kasetsart Journal**. Bangkok, v. 25, n. 5, p. 131-139, 1991.

OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 9, n. 01, p. 62-66. Jan. 1979. Disponível em:
<http://liama.ia.ac.cn/wiki/_media/projects:pal:otsu1979.pdf?id=projects%3Apal%3Areadinggroup&cache=cache>. Acesso em 20 out. 2010.

SUN, D.W. **Computer vision technology for food quality evaluation**. New York: Academic Press, 2007. 570p. ISBN: 0123736420. (Food Science and Technology, International Series).

WANG, H.; DONG, Y. An improved image segmentation algorithm based on Otsu method. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOTOELECTRONIC DETECTION AND IMAGING 2007: RELATED TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS, 2007. **Proceeding...** 2008.

YIN, J.; MAO, H.; ZHONG, S. Segmentation methods of fruit image based on color difference. **Journal of Communication and Computer**, v. 6, n. 7, p. 40-45, Jul. 2009. ISSN 1548-7709. (Serial Nº 56).

CAPÍTULO 3

ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE IMAGENS COLORIDAS APLICADAS À ESTIMATIVA DE PESO DE MANGAS *TOMMY ATKINS*

3.1. INTRODUÇÃO

Como descrito anteriormente, em galpões de processamento pós-colheita, em empresas exportadoras de frutos *in natura* da região do Vale do São Francisco, as mangas são selecionadas de forma visual/manual segundo algumas características, em especial o tipo, cor e dimensões dos defeitos externos e, numa segunda etapa, são classificadas por peso em balanças dinâmicas sofisticadas. A automatização destes processos, a baixo custo, ainda é um desafio, devido à complexidade inerente às avaliações realizadas pelos seres humanos.

Dentre as alternativas de estimativa de peso da fruta sem a necessidade de uso de uma balança dinâmica está o uso de processamento de imagens. Para um bom desempenho desta técnica, no entanto, a etapa de segmentação tem papel fundamental.

O presente estudo, descrito neste capítulo, foi motivado pela necessidade de se propor uma alternativa ao método de segmentação padrão do Matlab®, de maneira semelhante à apresentada no capítulo anterior, mas desta vez para o cálculo do limiar de imagens coloridas, em fundo branco, capturadas no experimento descrito no Capítulo 1. Aqui é proposta uma modificação adaptativa do Método Otsu, tradicionalmente utilizado no ambiente Matlab®.

3.2. OBJETIVO

O objetivo deste capítulo, portanto, é o de propor uma metodologia de segmentação de imagens coloridas para ser utilizada como parte do desenvolvimento de um sistema de baixo custo para seleção e classificação de

frutas, de modo que seja possível uma adequada estimativa do peso a partir de uma imagem da parte superior da fruta, em repouso num túnel simulado.

3.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na Figura 43 é apresentada, esquematicamente, uma proposta de um sistema típico, de baixo custo, para utilização em laboratório, em pesquisas e desenvolvimento de metodologias e técnicas de seleção e classificação de frutas e produtos hortícolas, com base em análise e processamento de imagens. Em um sistema como este, a imagem da fruta é obtida por meio de uma câmara comercial e, em seguida, enviada para um computador com um programa que captura e processa esta imagem, extraindo parâmetros dimensionais relevantes para seleção, classificação ou avaliação da qualidade do produto. Em seguida, os sensores fotoelétricos detectam a saída da fruta do túnel e, após processamento da imagem, atuadores pneumáticos desviam a fruta para a calha específica, em função do parâmetro de seleção ou classificação estudado.

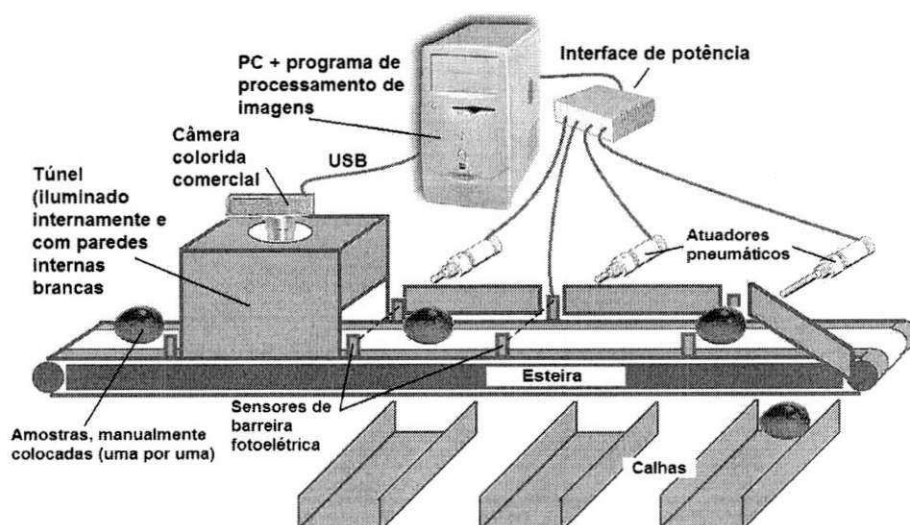


Figura 43 – Proposta de um sistema típico, de baixo custo, de laboratório, para uso em pesquisas e desenvolvimento de metodologias e técnicas de seleção e classificação de frutas e produtos hortícolas, por meio da análise e processamento de imagens.

Um sistema como este pode ser muito útil para avaliação da eficiência das metodologias e técnicas de seleção e classificação baseadas em processamento de imagens, desenvolvidas em laboratório. Uma das mais

importantes etapas do desenvolvimento de um sistema como este é a segmentação das imagens capturadas no túnel iluminado. Se a segmentação não for adequada, a análise e processamento das imagens estará comprometida e, conseqüentemente, também a eficiência da seleção e classificação.

3.3.1. Pré-processamento de imagens

Como descrito no capítulo anterior, podem ser necessárias etapas adicionais de pré-processamento das imagens capturadas, antes da segmentação e do processamento propriamente dito. Dependendo das condições de iluminação – (intensidade, sombras) e presença de ruídos (interferência eletromagnética nos cabos de comunicação, por exemplo) a imagem poderá ser capturada com muitos ruídos e terá de ser submetida a uma série de etapas que facilitam a identificação da região de interesse (*ROI*, ou *region of interest*), neste caso o fruto, melhorando o contraste com o fundo, que é a parte indesejada da imagem. O desafio, no entanto, é realizar estas transformações sem alterar significativamente a imagem do fruto: há tipicamente um compromisso entre, por exemplo, a melhoria de contraste com o fundo ou o aumento da nitidez, e perda de características importantes da região de interesse.

A fase de pré-processamento inclui geralmente três etapas principais: remoção ou redução de ruído, melhoria de contraste e segmentação (SUN, 2007).

3.3.1.1. Remoção ou redução de ruído

As imagens capturadas pela câmera estão sujeitas a vários tipos de ruídos, como os causados pela rede elétrica, o típico zumbido de 50 Hz ou 60 Hz; as interferências eletromagnéticas nos cabos de comunicação; ou erros de digitalização. Na Figura 44 são mostrados exemplos de imagens de uma manga que passaram por técnicas redução de ruído.



Figura 44 - Técnicas típicas de remoção ou redução de ruídos em imagens

3.3.1.2. Melhoria de contraste

Na Figura 45 são mostradas algumas técnicas típicas de melhoria de contraste de imagens, que podem ser aplicadas com a utilização de funções específicas presentes no pacote de processamento de imagens do Matlab® (MATHWORKS, 2011).

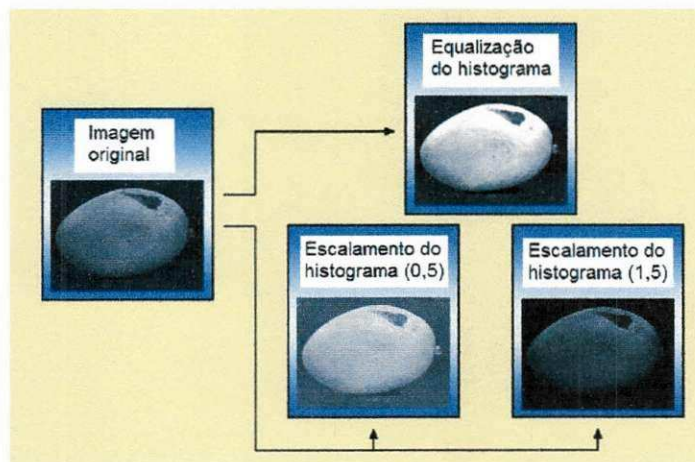


Figura 45 - Técnicas típicas de melhoria de contraste de imagens.

Assim como no capítulo anterior, optou-se por não usar nenhuma das técnicas de remoção de ruído ou melhoria de contraste nas imagens coloridas analisadas neste capítulo, pelas mesmas razões descritas anteriormente. Estas técnicas, anteriores à segmentação, têm grande importância quando as imagens possuem problemas “sérios” que inviabilizem as etapas seguintes. Como, neste caso, as imagens foram capturadas sob condições controladas, com as mangas

em repouso e com um esquema de iluminação previamente testado, as técnicas de remoção de ruídos e melhoria de contraste, a princípio, não foram necessárias. Mais uma vez, há um compromisso entre o desempenho desejado do sistema e os pré-processamentos aplicados. Provavelmente, em um teste com mangas em movimento, por exemplo, sobre uma esteira transportadora, sejam necessárias uma ou mais etapas de pré-processamento anteriores à segmentação, como a técnica de remoção de borrões causados na imagem pelo movimento do objeto de interesse.

3.3.2. Segmentação de imagens coloridas com Matlab®

A segmentação de imagens coloridas, em Matlab®, é muito semelhante à realizada em imagens em tons de cinza, cujas etapas foram descritas na Tabela 9. A imagem colorida original possui 3 camadas (*RGB*) e a função *rgb2gray* converte as 3 camadas em uma camada única, em tons de cinza. É nesta imagem convertida que é feita a segmentação da fruta.

Como descrito anteriormente, a função do Matlab® para segmentação de imagens em tons de cinza é baseada no Método de Otsu (MATHWORKS, 2011), que funcionou adequadamente, por exemplo, para as imagens das Figuras 46a e 46f, cujas segmentações são mostradas nas Figuras 46c e 46h.

3.3.2.1. Eficiência da segmentação com Matlab®

Por outro lado, este mesmo método não funcionou adequadamente para outras imagens coloridas de teste, capturadas com este sistema - o aparato mostrado na Figura 30 - quando existia baixo contraste relativo entre a região de interesse e o fundo branco, principalmente devido à alta variabilidade das cores das cascas dos frutos, característica típica da variedade *Tommy Atkins*, como mostrado na Figura 33.

Dois casos típicos desta situação são mostrados nas Figuras 46k e 46p, onde observa-se o baixo contraste entre os pixels da região de interesse e o fundo, do lado superior e do lado esquerdo destas imagens, respectivamente.

Nestes casos, as respectivas segmentações (Figuras 46m e 46r) não foram adequadas.

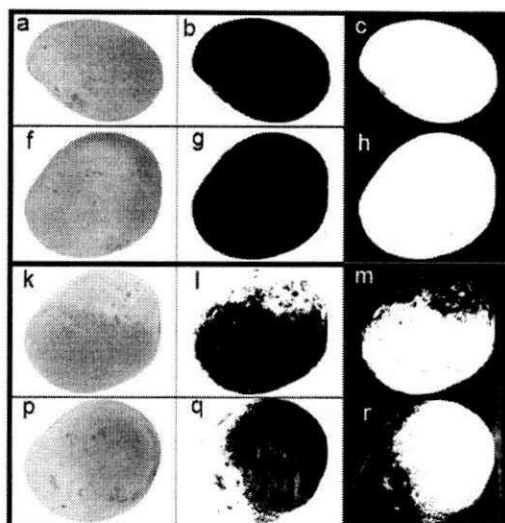


Figura 46 - Exemplos de imagens de mangas (primeira coluna), suas respectivas segmentações com o algoritmo-padrão do Matlab® (terceita coluna)

3.4. MATERIAIS E MÉTODOS

Noventa e seis imagens superiores de mangas (*Mangifera indica* L., 'Tommy Atkins') foram escolhidas aleatoriamente do banco de imagens construído a partir dos experimentos relatados no capítulo 2 deste trabalho. Conforme descrito anteriormente, aquelas mangas foram adquiridas no mercado local da cidade de Campina Grande (PB). Foram provenientes do Vale do São Francisco, a principal região exportadora da fruta no Brasil.

Para a captura das imagens foi utilizada uma câmera comercial *Sony P7*, configurada com os seguintes parâmetros:

- tipo de imagem: colorida, 3 camadas (RGB);
- tamanho da imagem: 2048 x 1536 pixels;
- foco: 0,5 m;
- exposição: 0EV;
- balanceamento de brancos: auto;
- flash: off.

3.4.1. O algoritmo proposto

As imagens foram submetidas, primeiramente, à segmentação realizada pelo algoritmo padrão do Matlab®. Depois, foram feitas segmentações das mesmas imagens com uma modificação: o novo limiar, utilizado pela função *im2bw*, passou a ter um percentual incremental adaptativo do limiar anterior, percentual este proporcional à intensidade média dos pixels da região de interesse (a manga) previamente segmentada. Matematicamente, o novo limiar y foi calculado pela seguinte fórmula:

$$y = x + x \times (m / k) \quad (1)$$

onde:

- y - novo limiar;
- x - limiar calculado com a função padrão do Matlab® (*graythresh*);
- m - intensidade média dos pixels da região de interesse, previamente segmentada pelo algoritmo-padrão;
- k - constante empírica, dependente do esquema de iluminação (intensidade luminosa).

3.4.2. O programa desenvolvido

Para a realização dos cálculos desta etapa, foi necessário o desenvolvimento de um programa em Matlab®, cuja tela inicial é mostrada na Figura 47, que automatizasse o processo de cálculo dos parâmetros físicos (diâmetros, área, intensidade média dos pixels) das imagens das mangas, uma vez que foi necessária a manipulação, em todo o trabalho realizado, de uma grande quantidade de imagens.

A proposta de desenvolvimento deste programa foi a de permitir a sua utilização tanto neste trabalho quanto em pesquisas futuras que venham a necessitar de manipulação de grandes quantidades de imagens, extraindo parâmetros relevantes destas imagens e salvando as informações

automaticamente em planilhas de análise, tipo *Excel^(MR)*. Assim, o programa foi projetado para ser executado da seguinte forma:

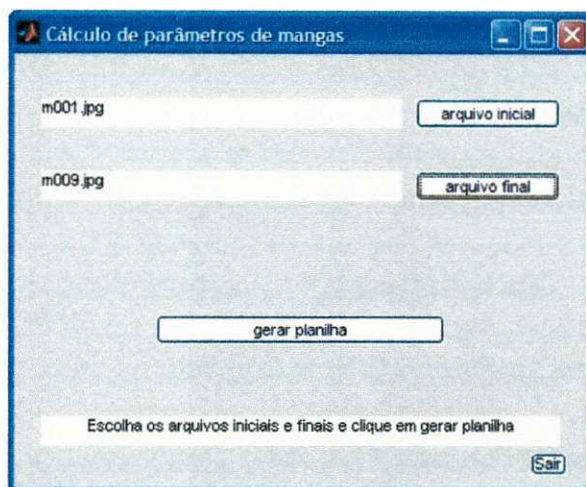


Figura 47 - Tela inicial do programa, em Matlab®, para segmentação de imagens de mangas.

- a) Inicialmente, o usuário escreve o núcleo da rotina, em Matlab®, que executará o processamento desejado. Este módulo é facilmente intercambiável, ou seja, para cada processamento desejado, basta trocar este núcleo do programa. Inclusive, pode ser trocado para qualquer rotina executável pelo Matlab®, não necessariamente na área de processamento de imagens: é possível utilizar qualquer função, de qualquer *Toolbox* do Matlab®.
- b) Na sequência, o usuário define os nomes dos arquivos de imagens, inicial e final, do lote que ele deseja processar. Por exemplo, o arquivo inicial pode ter o nome **manga001.jpg** e o arquivo final o nome **manga100.jpg**. É importante ressaltar que os arquivos não precisam estar, necessariamente, nomeados na ordem exata: se, após o processamento do arquivo **manga009.jpg**, o programa não encontra o arquivo **manga010.jpg**, ele continua, tentando abrir o próximo arquivo **manga011.jpg** e assim por diante, até o último arquivo.
- c) Após clique no botão **Iniciar**, o programa começa o processamento das imagens e os resultados são salvos tanto num arquivo texto (.txt) quanto

numa planilha Excel^(MR), com um número de colunas correspondente aos parâmetros calculados pelo núcleo do programa.

Um fluxograma simplificado do programa é mostrado na Figura 48, enquanto que a listagem completa do programa desenvolvido está no Anexo 3.1 deste trabalho.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 49 é um complemento da Figura 46, apresentando exemplos dos desempenhos dos dois algoritmos, comparativamente. Observa-se que o algoritmo proposto, além de corrigir os problemas do algoritmo-padrão (Figuras 49o e 49t), não interfere sobremaneira nas segmentações que já estavam originalmente corretas (49e e 49j), o que é um fator positivo. A explicação para isto é o fato de que, quando o método Otsu encontra um limiar correto, elevado, o fator de correção, como é adaptativo, não aumenta significativamente o limiar, praticamente mantendo a boa segmentação original.

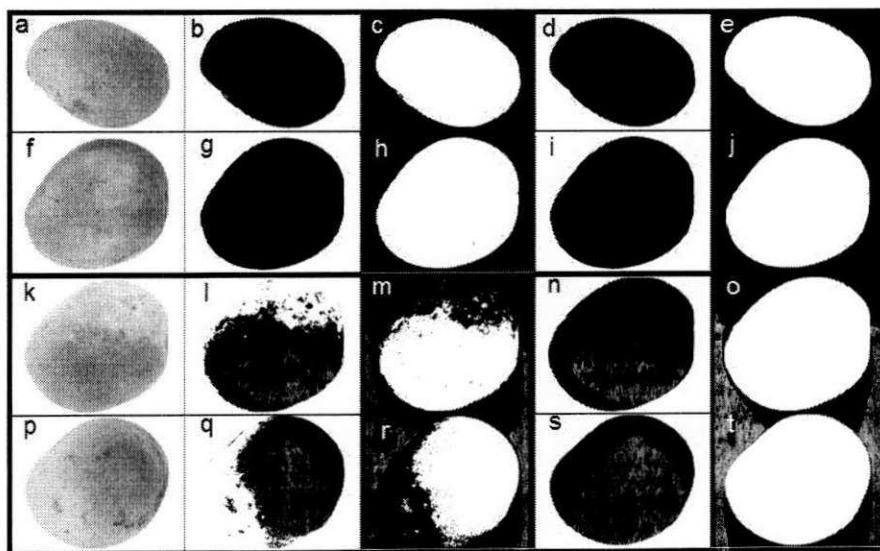


Figura 48 - Comparativo de desempenho de segmentação de imagens de mangas, entre os dois algoritmos (original do Matlab® e proposto)

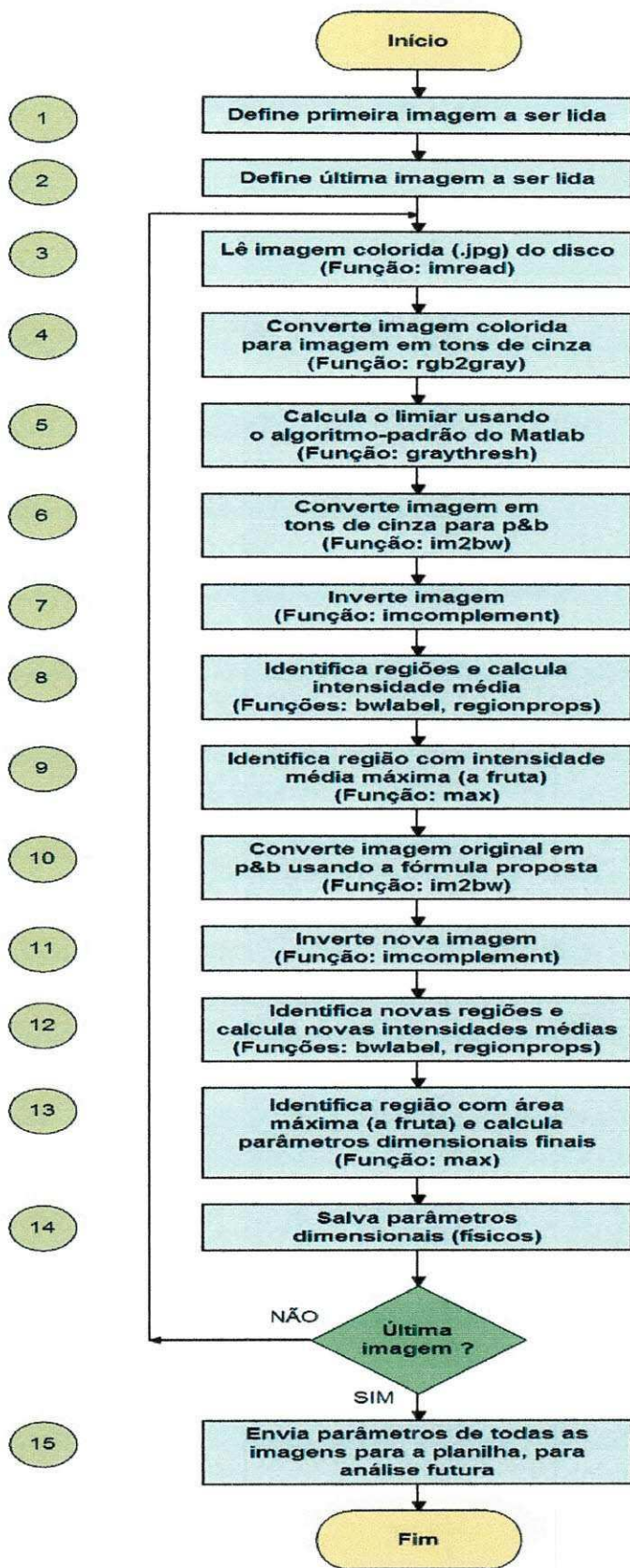


Figura 49 - Fluxograma simplificado do algoritmo proposto para segmentação de imagens.

Alguns exemplos de imagens correspondentes a etapas do processamento são mostrados na Figura 50, onde é possível perceber a evolução até a segmentação final. Na primeira linha são mostradas imagens originais, coloridas (etapa 3 do fluxograma). Na segunda linha, as mesmas imagens, já convertidas para tons de cinza (etapa 4). Na quarta linha, os resultados das segmentações com o algoritmo-padrão (etapa 7). Finalmente, na sexta linha, são mostradas as segmentações finais com a modificação proposta (etapa 11 do fluxograma).

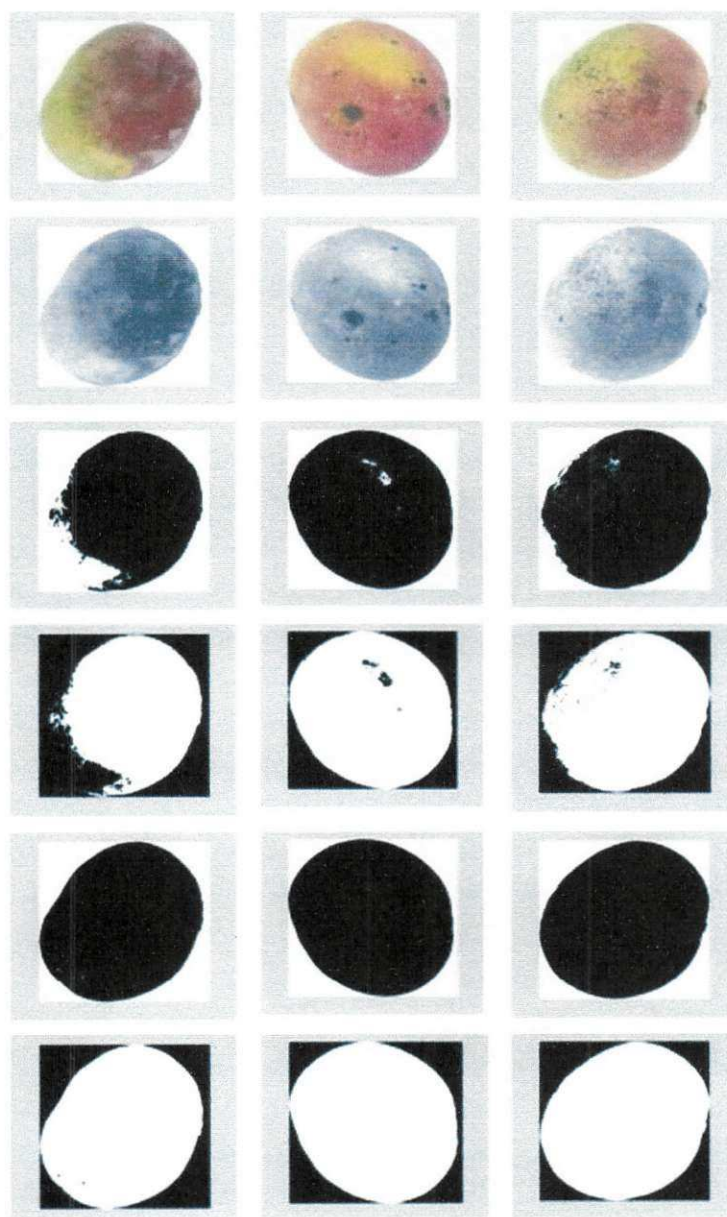


Figura 50 - Segmentações com a utilização do algoritmo-padrão (quarta linha) e do algoritmo proposto (sexta linha).

3.5.1. Testes e validação do algoritmo proposto

Para a comprovação da eficiência do algoritmo proposto na segmentação das imagens, foi feito um teste para validação desta metodologia na estimativa de massas de mangas a partir das imagens, o que pode viabilizar a “pesagem virtual” das frutas em esteiras transportadoras, sem a utilização de balanças dinâmicas sofisticadas.

Um grupo de cem imagens foi escolhido, aleatoriamente, do banco construído no experimento descrito no Capítulo 1. Com as imagens adequadamente segmentadas, é possível, com a utilização do programa desenvolvido, o cálculo de diversos parâmetros dimensionais das frutas, bastando, para isso, incluí-los na função *regionprops* do Matlab®. Esta função permite o cálculo de 27 parâmetros da região segmentada como, por exemplo:

- a) **diâmetro máximo**, calculado com o parâmetro *MajorAxisLength*, que corresponde ao comprimento, em pixels, do eixo maior da elipse que tem o mesmo segundo momento central normalizado da região;
- b) **diâmetro mínimo**; calculado com o parâmetro *MinorAxisLength*, que corresponde ao comprimento, em pixels, do eixo menor da elipse que tem o mesmo segundo momento central normalizado da região.
- c) **área** da imagem segmentada, em pixels², que corresponde ao número de pixels brancos na região;
- d) **diâmetro equivalente**, em pixels, que corresponde ao diâmetro de um círculo com a mesma área da região segmentada;
- e) **perímetro**, que é a soma das distâncias entre cada par adjacente de pixels ao redor da borda da região segmentada.

Na Figura 51 são representados alguns dos possíveis diâmetros máximos (**x**) e mínimos (**y**) que seriam medidos, com um paquímetro, mostrando

a dificuldade de se realizar esta medida, manualmente. No caso do cálculo do Matlab®, o diâmetro máximo é perpendicular ao diâmetro mínimo, o que, não necessariamente, corresponderia aos máximos e mínimos diâmetros **reais**, no entanto, é uma abordagem de medida padronizada.

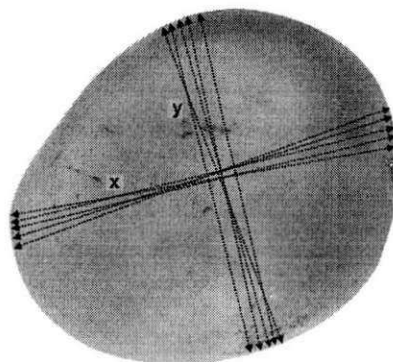


Figura 51 - Possíveis diâmetros máximos e mínimos, medidos manualmente.

Os testes foram feitos, portando, para:

- identificação de qual dos cinco parâmetros dimensionais citados representa melhor a massa de uma fruta;
- determinação da melhor equação que representa a massa em função do parâmetro escolhido, com base na análise de imagens da primeira metade das mangas;
- validação da equação encontrada, ou seja, cálculo da precisão da estimativa de massa em função do parâmetro escolhido, aplicando-se a equação encontrada ao segundo grupo de mangas.

Na Figura 52 são mostrados os coeficientes de correlação entre as massas reais e os parâmetros dimensionais estudados. A área projetada superior da imagem foi o parâmetro que melhor representou a massa, sendo, portanto, o escolhido para a determinação da equação utilizada para estimativa das massas das mangas do segundo grupo.

As primeiras 50 imagens das mangas foram usadas, assim, para determinação da melhor equação que representasse a estimativa de massa em função da área projetada superior.

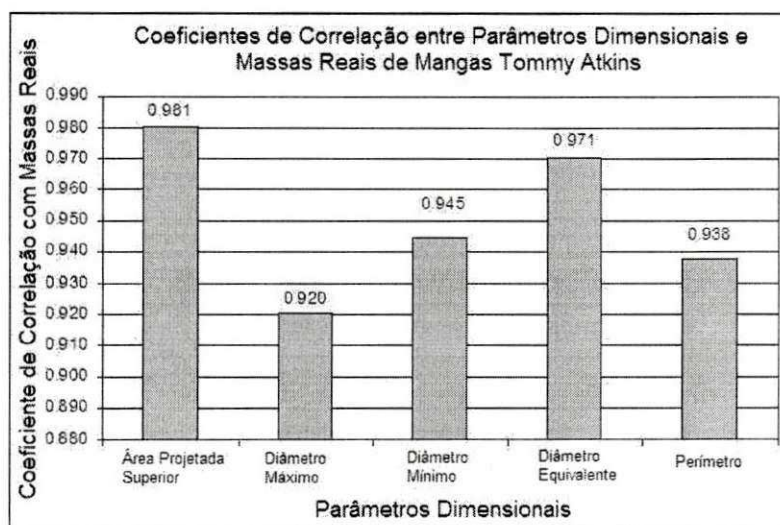


Figura 52 - Coeficientes de correlação entre parâmetros dimensionais selecionados e massas reais de mangas *Tommy Atkins*.

Resultados da aplicação do algoritmo-padrão mostraram correlação relativamente baixa entre as áreas segmentadas (áreas superiores das frutas) e as massas reais das mangas, $r = 0,82$, como mostrado na Figura 53, devido à segmentação inadequada de algumas imagens com regiões de baixo contraste, comprometendo a eficiência do método.

O algoritmo alternativo, com a constante $k = 1500$ definida empiricamente para a configuração específica da câmera e para aquele determinado esquema de iluminação, melhorou muito a correlação entre áreas superiores segmentadas e massas reais, para $r = 0,97$, conforme mostrado na Figura 54.

É importante ressaltar que, no caso do capítulo anterior, o limiar proposto foi fixo, acontecendo uma redução do valor do limiar por aquele percentual fixo, com vistas a uma melhor segmentação. No caso da proposta deste capítulo, o limiar é adaptativo e acontece um aumento do valor do limiar. A

diferença entre aumento ou redução do limiar ocorre devido à cor do fundo da imagem, preta no primeiro caso e branca no segundo caso.

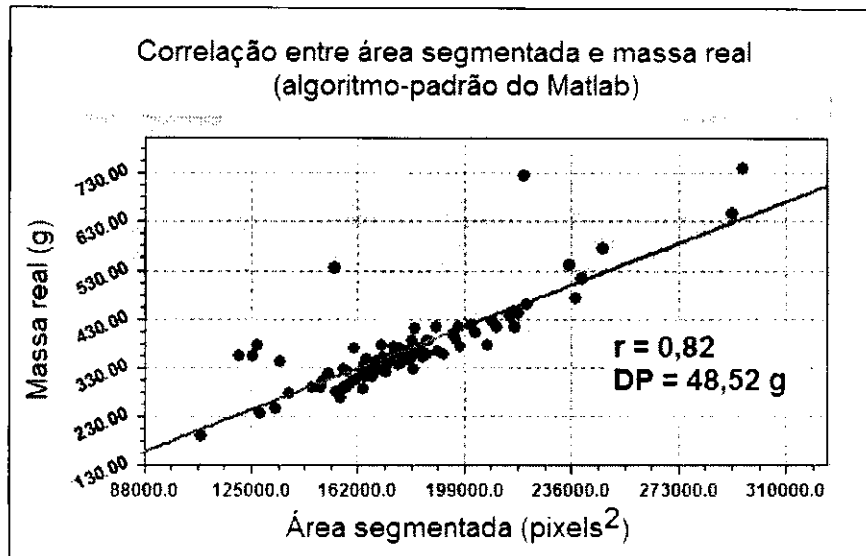


Figura 53 - Correlação entre área segmentada e massa, com a utilização do algoritmo-padrão.

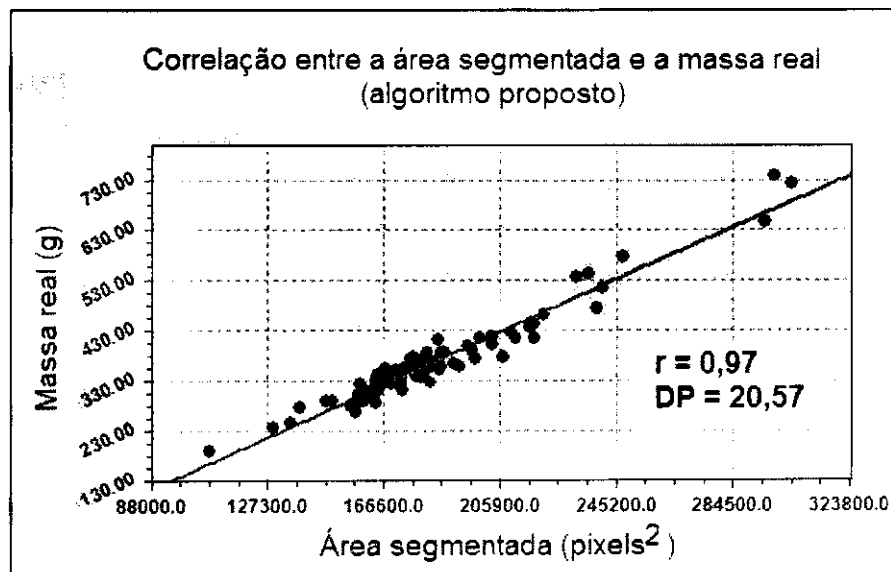


Figura 54 - Correlação entre área segmentada e massa, com a utilização do algoritmo proposto.

Na Figura 55 é apresentada a equação que relaciona massa com área projetada superior, já considerando a aplicação do algoritmo proposto.

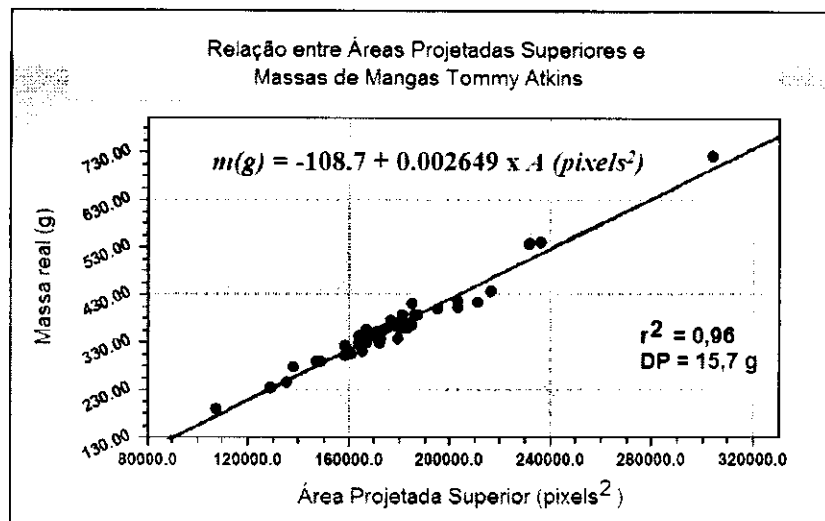


Figura 55 - Equação que representa massas das mangas em função da área projetada.

As massas das mangas do segundo grupo foram estimadas pela aplicação da equação encontrada. O coeficiente de determinação entre as massas reais e estimadas, mostrada na Figura 56, foi de $r^2 = 0,94$, muito próximo do valor de $r^2 = 0,934$ encontrado por TEOH & SYAIFUDIN (2006).

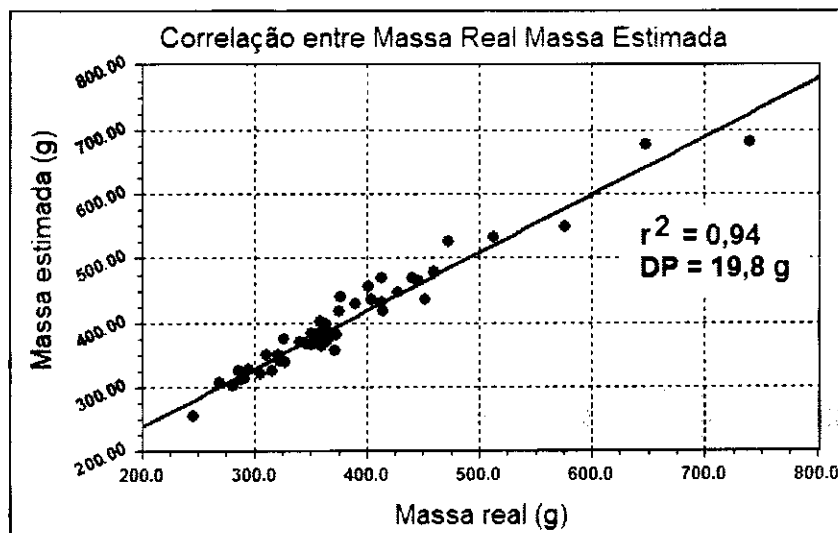


Figura 56 - Correlação entre massas reais e massas estimadas, com a metodologia proposta.

3.6. CONCLUSÃO

Com a utilização de um sistema de aquisição de imagens de baixo custo, composto por uma câmera digital simples, que capture imagens coloridas, e um computador com um programa desenvolvido no ambiente Matlab®, é possível se obter melhores segmentações de imagens de mangas *Tommy Atkins*, em fundo branco, quando se aplica uma modificação no algoritmo-padrão deste ambiente de programação.

Nesta modificação proposta, o valor do limiar de segmentação é aumentado de um percentual adaptativo em relação ao limiar originalmente calculado, percentual este que é função da intensidade média dos pixels da região originalmente segmentada e de uma constante que depende do esquema de iluminação do ambiente onde foi capturada a imagem.

Esta modificação no algoritmo original permite melhores estimativas das massas das mangas fotografadas, indicando sua viabilidade de utilização em sistemas de classificação automatizada de mangas por peso, com base em processamento de imagens.

3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MATHWORKS INC. **MATLAB® Getting Started Guide**. Natick, MA. 2011. Disponível em http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf. Acesso em 15/02/2011.

SUN, D.W. **Computer vision technology for food quality evaluation**. New York: Academic Press, 2007. 570p. ISBN: 0123736420. (Food Science and Technology, International Series).

TEOH, C.C.; SYAIFUDIN, A.R.M. Use of image analysis for grading size of mango. **Acta Horticulturae**, v. 710, p. 485-490. 2006.

CAPÍTULO 4

SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA ESTIMATIVA DE FIRMEZA DE MANGAS *TOMMY ATKINS*

4.1. INTRODUÇÃO

A firmeza de uma fruta é uma das melhores medidas do seu estado de maturação. Ela é definida como a força necessária para quebrar (cortar) os tecidos da fruta fresca. Durante a maturação, a firmeza diminui até um ponto considerado ótimo para consumo. Frutas com firmeza abaixo de um determinado valor tornam-se susceptíveis a danos físicos durante transporte e manuseio, além de perderem valor comercial. Se forem postas à venda com um índice de firmeza muito elevado, também poderão não satisfazer aos consumidores.

Medir a firmeza da fruta também é importante porque este parâmetro afeta diretamente a satisfação do consumidor, estando associada à percepção de frescor e maturação da fruta. É fator importante também para o processamento para consumo futuro (enlatados, geléias, polpa) ou para os minimamente processados.

Diversos fatores biológicos afetam a firmeza de uma fruta, como o tamanho e forma das células, quantidade de água intracelular e organização celular. A firmeza varia com o tipo de fruta, variedade, idade (“verde”, “madura”, “muito madura”) e condições a que foi submetida durante a maturação e armazenamento pós-colheita.

A firmeza pode ser medida por métodos destrutivos convencionais (penetrômetros ou texturômetros), mais adequados para análise laboratoriais de amostras; ou por métodos não-destrutivos, mais adequados para sistemas de produção que envolvam seleção automatizada.

Este capítulo descreve as atividades realizadas visando contribuir para o desenvolvimento de um novo método não-destrutivo, de baixo custo, para estimativa de firmeza de mangas, com a utilização de múltiplos sensores. Também são descritas as atividades realizadas no desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados, também de baixo custo, para captura de sinais de sensores analógicos, como uma alternativa aos sistemas de aquisição comerciais, de custos mais elevados e de maior complexidade de operação. Este sistema também pode ser utilizado para captura e armazenamento de sinais de diversos outros sensores analógicos comerciais, como sensores de força, pressão, aceleração, entre outros.

4.2. OBJETIVOS

O objetivo deste capítulo é o desenvolvimento de uma metodologia de aquisição de sinais de sensores de baixo custo, como acelerômetros *MEMS* e microfones de eletreto, como parte do desenvolvimento de um método não-destrutivo para estimativa de firmeza de mangas.

4.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.3.1. Métodos não-destrutivos de avaliação de qualidade de frutas

Os principais métodos não-destrutivos de avaliação da qualidade de frutas, citados por GIYOUNG et al. (2006), estão listados na Tabela 10.

No entanto, os métodos não-destrutivos atualmente disponíveis para avaliação, em linhas de processamento, de uma ou mais características de frutas, não são totalmente efetivos. Diversas pesquisas têm sido realizadas em todo o mundo, tanto para a aplicação de tecnologias sensoriais já existentes e consolidadas, quanto para o desenvolvimento de novos sistemas automatizados específicos para a seleção de frutas. A seguir são descritos alguns destes

trabalhos, relativos à estimativa de um dos mais importantes parâmetros para avaliação do índice de maturidade, a firmeza da fruta.

Tabela 10 - Métodos não-destrutivos de avaliação da qualidade de frutas

Metodologia	Tecnologia/sensores em uso	Parâmetros avaliados
Ótica	Análise de Imagem.	Tamanho, forma, cor, defeitos externos.
	Espectroscopia (reflectância, transmitância, absorvância), NIR e Mid IR.	Componentes internos, cor, defeitos.
	Espectroscopia a Laser.	Firmeza, visco-elasticidade, defeitos, forma.
Raios X	Imagem de raio-x e tomografia computadorizada	Cavidade interna e estrutura. Estado de maturação.
Mecânica	Sensores de força e pressão	Firmeza, visco-elasticidade, maturação.
	Sensores de impacto	Firmeza, visco-elasticidade, maturação.
	Vibração	Firmeza, visco-elasticidade, maturação.
	Excitação acústica (sônica)	Firmeza, visco-elasticidade, cavidade interna, densidade, Brix.
	Excitação ultrasônica	Cavidade interna e estrutura, firmeza.
Eletromagnética	Impedância	Umidade interna, densidade, Brix.
	Ressonância Magnética	Brix, óleos, umidade, defeitos internos e estrutura.
Térmica	Termografia	Defeitos internos e externos, tamanho, firmeza.

Fonte: Adaptado de GIYOUNG et al. (2006).

4.3.2. Técnicas de estimativa de firmeza de frutas

A determinação da firmeza da fruta (rigidez mecânica de sua estrutura celular) tem grande importância para a definição do ponto ótimo de colheita, do tempo de armazenamento e do ponto ideal para transporte e comercialização (TIMM et al., 1996; ABBOTT et al., 1997; PALTRINIERI et al., 1997; PELEG, 1999; GOODWIN, 2002; SOUSA et al., 2003; VALENTE et al., 2009; ABBOTT & HARKER, 2004; MILLS, 2005; GIYOUNG et al., 2006; SLAUGHTER, 2006).

De acordo com MILLS (2005):

Muitas pesquisas têm sido realizadas sobre a utilização de métodos não-destrutivos para determinar a firmeza de frutos, no entanto, poucos parecem terem sido aceitos como parte de um sistema capaz de classificação automática.

Os métodos para estimativa de firmeza de frutas podem ser divididos em dois grandes grupos:

- os métodos destrutivos (ou invasivos); e
- os métodos não-destrutivos.

O método destrutivo tradicional para se avaliar a firmeza de uma fruta usa o Penetrômetro *Magness-Taylor*, inventado em 1925 e mostrado na Figura 57, que registra a máxima força necessária para penetrar a fruta. É operado manualmente e tem aplicação apenas em laboratórios, devido à sua natureza destrutiva. Existem versões automatizadas deste equipamento, todas operando segundo o mesmo princípio, de penetrar a fruta e medir a força necessária para isto.

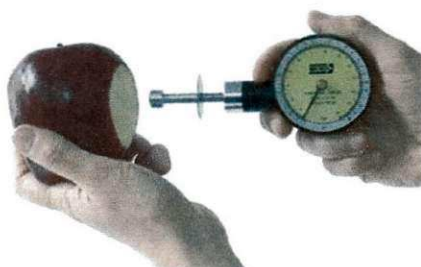


Figura 57 - Penetrômetro *Magness-Taylor* para determinação de firmeza de frutas. Método invasivo.
Fonte: WAGNER INSTRUMENTS (2011).

Assim, diversas pesquisas têm sido realizadas objetivando a estimativa de firmeza de frutas, de modo não-destrutivo. Os métodos mecânicos mais utilizados baseiam-se em:

- técnicas de impacto e vibração; e
- técnicas acústicas.

De acordo com SLAUGHTER (2006), em sua revisão sobre os métodos de avaliação do estágio de maturação de mangas:

Diversos pesquisadores têm avaliado métodos não destrutivos de determinação de firmeza de manga. Embora nenhum dos estudos publicados tenham avaliado sistemas de laboratório ou sistemas on-line que estão atualmente sendo fabricados, eles são baseados em princípios similares e dão informações sobre seu desempenho potencial. Jarimopas e Kitthawee (2007), compararam a resposta de aceleração de um impacto não-destrutivo de baixa energia em mangas 'Nam Dokmai' e 'Chok Anan', com um teste de compressão destrutivo padrão em frutos colhidos ao longo de um período de 40 dias, começando 75 dias após a frutificação, quando os frutos ainda são imaturos. A pontuação média de firmeza do impacto (em lotes de 20 frutas) foi bem correlacionado ($r^2 = 0,94$) com a pontuação de firmeza média do teste de compressão. O fruto manteve-se firme ao longo dos estágios imaturo a verde-maduro e então começou a amolecer quando a fruta amadureceu. Al-Haq e Sugiyama (2004) compararam uma medição da velocidade do som não destrutiva de mangas 'Irwin' a um teste de compressão padrão destrutivo durante o amadurecimento e observaram que as medidas foram bem correlacionados ($r^2 = 0,86$). Hahn (2004) usou a máxima aceleração no momento do impacto de uma queda de 10 cm de mangas 'Kent', de uma esteira transportadora para outra, como um método não destrutivo de classificar os frutos durante o amadurecimento. Usando este protótipo de sistema on-line personalizado, Hahn foi capaz de classificar as mangas em três grupos (rígidas, macias e muito macias) com uma precisão média de 90%. Santulli et al. (2006) utilizaram vibrometria Doppler de varredura a laser para medir a firmeza dos frutos durante o amadurecimento de mangas 'Rosa'. Eles observaram que a frequência de ressonância do fruto diminuiu (como esperado) com o amadurecimento. Mizrach et al. (1997) desenvolveram um método para medir a atenuação de ondas acústicas de ultra-som na manga como um meio não destrutivo de determinação da firmeza. Em um estudo com mangas 'Tommy Atkins' durante o amadurecimento, eles descobriram que o sinal de ultra-som (média para lotes de 10 frutos) foram correlacionados ($r^2 = 0,94$) com a medição destrutiva de firmeza média tradicional, com o penetrômetro. Alterações na firmeza média também foram correlacionadas com as mudanças na acidez e sólidos solúveis da fruta durante o amadurecimento.

4.3.2.1. Técnicas de impacto e vibração mecânica

As técnicas de impacto e vibração mecânica podem ser classificadas em três grandes grupos:

4.3.2.1.1. *Medição de força de impacto na queda*

Esta técnica utiliza principalmente *strain gages* ou, mais recentemente, resistores sensíveis a força (*Force Sensitive Resistors*), como os mostrados na Figura 58. Estes sensores são, normalmente, acoplados a uma base que é pressionada pelo peso da fruta quando esta cai de uma determinada altura como, por exemplo, nos experimentos de HAHN (2004), DE BAERDEMAEKER et al (1982) e DELWICHE (1987). Um sistema de aquisição de dados captura a força

aplicada na base, no sentido de se obter um “índice de firmeza” que tenha alta correlação com os índices obtidos pela utilização do penetrômetro *Magness-Taylor* (MAGNESS & TAYLOR, 1925), um método destrutivo/invasivo.

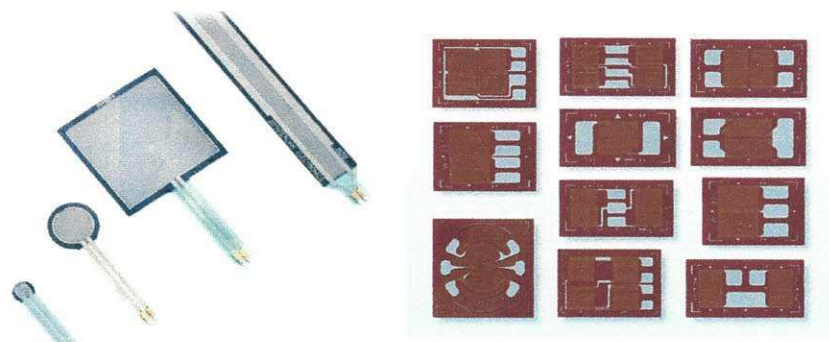


Figura 58 - Resistores sensíveis a força (esquerda) e *strain-gages* (direita), dois tipos de sensores de força utilizados para medição de firmeza de frutas.

4.3.2.1.2. *Medição de força de impacto de uma pequena massa*

Esta técnica utiliza principalmente acelerômetros (Figura 59) fixados à pequena massa que impacta a fruta (um bastão, por *exemplo*). Os sensores capturam a resposta mecânica da fruta a este impacto, como nos trabalhos de DELWICHE & SARIG (1991); CHEN & TJAN (1998); JARIMOPAS & KITTHAWEE (2007). Por outro lado, de acordo com SHMULEVICH et al (2003), recentemente a empresa *Sinclair International Ltd.* modificou suas máquinas de rotulagem de frutas para que elas pudessem medir a firmeza da fruta usando um sensor na ponta do fole que toca a fruta. O sensor mede a resposta da fruta ao impacto desta pequena massa, usando um transdutor de força. A firmeza é determinada por um índice extraído a partir da curva força-deformação do impacto, ao longo de um período de tempo.



Figura 59 - Acelerômetros piezoelétricos (esquerda) e *MEMS* (centro e direita).

4.3.2.1.3. Medição de resposta à vibração

Utiliza um pequeno vibrador eletromagnético e um acelerômetro para captura da resposta. A amplitude e a defasagem da vibração recebida pelo acelerômetro, quando comparadas com o sinal emitido na entrada, pelo vibrador têm relação com a massa e firmeza da fruta.

4.3.2.2. Técnica de resposta acústica

Esta técnica é baseada na medição da resposta acústica, onde um microfone captura o som emitido pela fruta quando esta recebe uma pequena e suave “batida” de uma pequena massa como, por exemplo, nos experimentos de COOKE (1972), KETELAERE et al. (2006), JIAN-PING & BAO-GANG (2006), CONDE et al. (2007), LANDHAL (2007) e VALENTE et al (2009). É uma técnica conhecida como “resposta acústica a um impulso” onde, ao impacto, a fruta vibra em sua frequência natural (de ressonância), que tem relação com sua massa e firmeza. Os microfones mais comumente utilizados nestas medições são os de eletreto e os dinâmicos (Figura 60).



Figura 60 - Microfones de eletreto (esquerda) e dinâmicos (direita), comumente utilizados na captura de sinais de áudio, aplicam-se à técnica de resposta acústica a um impulso, para estimativa de firmeza de frutas.

Vale ressaltar que estas metodologias buscam desenvolver sistemas que simulem ou se assemelhem ao modo como os seres humanos avaliam a qualidade da fruta: tocando-a; percebendo sua firmeza com leves pressões dos dedos; batendo levemente e ouvindo seu som característico. Mais que isso, os humanos avaliam, de maneira sistêmica e global, também as cores e respectivo

estágio de maturação; identificam defeitos e machucados externos; percebem odores característicos; comparam tamanhos entre frutos próximos, ou seja, utilizam intensivamente a “fusão sensorial”.

Uma variante da técnica de resposta acústica foi proposta por SUGIYAMA et al. (2005), que mostraram que há boa correlação entre a velocidade do som na manga e sua firmeza. Desenvolveram um método não destrutivo e um equipamento para estimativa de firmeza de mangas no campo, para ajudar na definição do ponto ótimo de colheita, mostrado na Figura 61. Um gatilho dispara um pequeno “martelo” que impacta a fruta e o som emitido é captado em dois microfones abaixo do ponto de impacto. Pela diferença de tempo entre a recepção dos dois sinais foi possível estimar a velocidade do som na fruta e, conseqüentemente, sua firmeza. Por outro lado, embora mais “simples” do que outras técnicas mecânicas e acústicas descritas anteriormente, este método é muito sensível às variações de distância da fruta ao sensor, devido à curvatura da fruta.



Figura 61 - Medidor de firmeza portátil, baseado na técnica de medição da velocidade do som na fruta.
Fonte: SUGIYAMA et al. (2005)

4.3.3. Sensores *MEMS*

A tecnologia *MEMS* (*Micro Electro-Mechanical Systems*) está presente, hoje, em diversos equipamentos eletrônicos de consumo. Com esta tecnologia é possível a construção de micro e nano sensores que executam a conversão de

diversas grandezas físicas, como, por exemplo, pressão, temperatura, umidade, força, aceleração, em grandezas como corrente ou tensão elétricas. Os sensores de aceleração largamente utilizados em *airbags* de automóveis são *MEMS*. Alguns exemplos são mostrados na Figura 62, encapsulados na forma de minúsculos circuitos integrados que contêm o dispositivo sensor em si e uma eletrônica associada, de amplificação e condicionamento de sinal, de modo a facilitar a aquisição dos dados por parte do computador de controle. Devido à escala de produção, está havendo uma redução dos custos destes sensores, permitindo o desenvolvimento de aplicações especiais como esta, para estimativa de firmeza de frutas.



Figura 62 - Circuitos integrados sensores *MEMS*.
À direita, chips do acelerômetro utilizado.

4.3.4. Teoria das Cores

Como um dos parâmetros de referência utilizados, neste trabalho, como indicador do índice de maturação da manga foi a cor da polpa, considerou-se necessária uma breve introdução sobre a teoria das cores.

De acordo com HUNTERLAB (2001):

“Na teoria das cores, o Hunter L,a,b é um espaço de cor tridimensional retangular baseado na teoria das cores opostas: o L é a intensidade (lightness), onde 0 é preto, 100 é branco; o a representa o eixo vermelho-verde, valores positivos são vermelhos, valores negativos são verdes e o 0 é neutro; e o b representa o eixo azul-amarelo, valores positivos são amarelos, valores negativos são azuis e o 0 é neutro.

A Figura 63 é uma representação gráfica do espaço *Hunter L,a,b*. Outro espaço de cor, o *CIE 1976 L*a*b** (*CIELAB*), é semelhante ao *Hunter L,a,b*, ambos assumindo que os receptores no olho humano percebem as cores como

pares dos opostos claro-escuro, vermelho-verde e amarelo-azul. Em outras palavras, o valor **L** destas escalas indica o nível de claro ou escuro, o valor **a** indica o tom avermelhado ou esverdeado e o valor **b** indica o tom amarelado ou azulado. Os três valores são necessários para descrever completamente a cor de um objeto (HUNTERLAB, 2008).

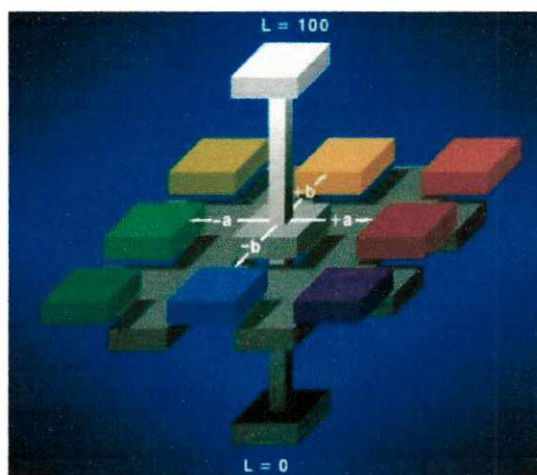


Figura 63 - Representação gráfica do espaço de cor tridimensional *Hunter L,a,b*
Fonte: HUNTERLAB (2008).

Ambas as escalas citadas têm um significado visual, os três valores são facilmente entendidos e convertidos em cores. Eles são, contudo, calculados de maneira diferente: enquanto as fórmulas para o *Hunter L,a,b* são raízes quadradas do *CIE XYZ*, o *CIELAB* é calculado usando a raiz cúbica de *XYZ*.

4.4. MATERIAIS E MÉTODOS – PRIMEIRA ETAPA

Microfones de eletreto e um acelerômetro *MEMS* foram os sensores escolhidos para o estudo de técnicas de estimativa de firmeza da fruta. A seguir são descritas as características dos sensores utilizados, da placa de aquisição desenvolvida para captura dos sinais destes sensores e das placas de som utilizadas para gravação dos sinais obtidos.

Os experimentos foram realizados em duas etapas, cujos materiais e métodos estão descritos em itens separados, para maior clareza. A segunda

etapa foi motivada pela necessidade de modificação do aparato experimental utilizado, a partir das análises realizadas na primeira etapa.

4.4.1. O acelerômetro MEMS utilizado – primeira etapa

Um sensor de aceleração *MEMS* típico possui pinos de alimentação e sinal(is) de saída analógico(s) correspondente(s) à(s) aceleração(ões) à(s) qual(is) está submetido o componente, com possibilidades de saída em somente um eixo (**X**) ou, simultaneamente, em dois eixos (**X** e **Y**) ou três eixos (**X**, **Y** e **Z**). Um exemplo de um destes sensores é o circuito integrado ADXL250, da *Analog Devices*, cuja página inicial de especificação está mostrada da Figura 64, com a função dos pinos mostrada na Figura 65.


O ADXL250 é sensível às acelerações em dois eixos perpendiculares, no plano do encapsulamento do circuito integrado. Dependendo da posição ou acelerações à qual está submetido, ocorrem variações nos sinais de saída correspondentes. Quando em repouso, o sinal de saída não é zero volt e sim uma tensão fixa próxima de metade da tensão de alimentação. Uma vez alimentado com 5,0 VDC, por exemplo, as saídas *Voutx* e *Vouty* permanecem com tensões em torno de 2,5 VDC (*chip* em repouso). Em outras palavras, as vibrações são traduzidas em sinais analógicos proporcionais às acelerações sofridas, dentro da faixa 0 a 5,0 V, com *offset* por volta de 2,5 VDC.

4.4.2. O microfone de eletreto utilizado – primeira etapa

O microfone de eletreto utilizado foi o modelo EM9465P-44 (*Horn Industrial Co. Ltd.*), mostrado na Figura 66. Existem, no mercado, diversos fabricantes de modelos similares a este. É um componente de baixo custo (cerca de R\$ 0,50 no mercado local de Campina Grande (PB), muito utilizado na construção de microfones portáteis para serem utilizados em conjunto com câmeras para internet (*webcams*).

A resposta em frequência deste modelo está representada na Figura 67, muito similar à dos outros modelos, que foi considerada suficientemente plana

para a aplicação proposta, dentro da faixa de 40 Hz a 2,5 kHz, que é cerca de 2,5 vezes maior do que a banda passante (- 3 dB) do acelerômetro utilizado, que é de 1 kHz.



**ANALOG
DEVICES**

**$\pm 5 g$ to $\pm 50 g$, Low Noise, Low Power,
Single/Dual Axis *i*MEMS[®] Accelerometers**

ADXL150/ADXL250

FEATURES

- Complete Acceleration Measurement System on a Single Monolithic IC
- 80 dB Dynamic Range
- Pin Programmable $\pm 50 g$ or $\pm 25 g$ Full Scale
- Low Noise: $1 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$ Typical
- Low Power: $< 2 \text{ mA}$ per Axis
- Supply Voltages as Low as 4 V
- 2-Pole Filter On-Chip
- Ratiometric Operation
- Complete Mechanical & Electrical Self-Test
- Dual & Single Axis Versions Available
- Surface Mount Package

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL150 and ADXL250 are third generation $\pm 50 g$ surface micromachined accelerometers. These improved replacements for the ADXL50 offer lower noise, wider dynamic range, reduced power consumption and improved zero g bias drift.

The ADXL150 is a single axis product; the ADXL250 is a fully integrated dual axis accelerometer with signal conditioning on a single monolithic IC, the first of its kind available on the com-

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS

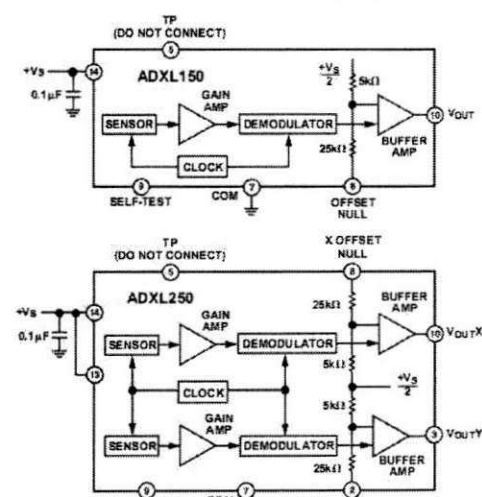


Figura 64 - Algumas características técnicas do acelerômetro utilizado.
Fonte: ANALOG DEVICES (1998).

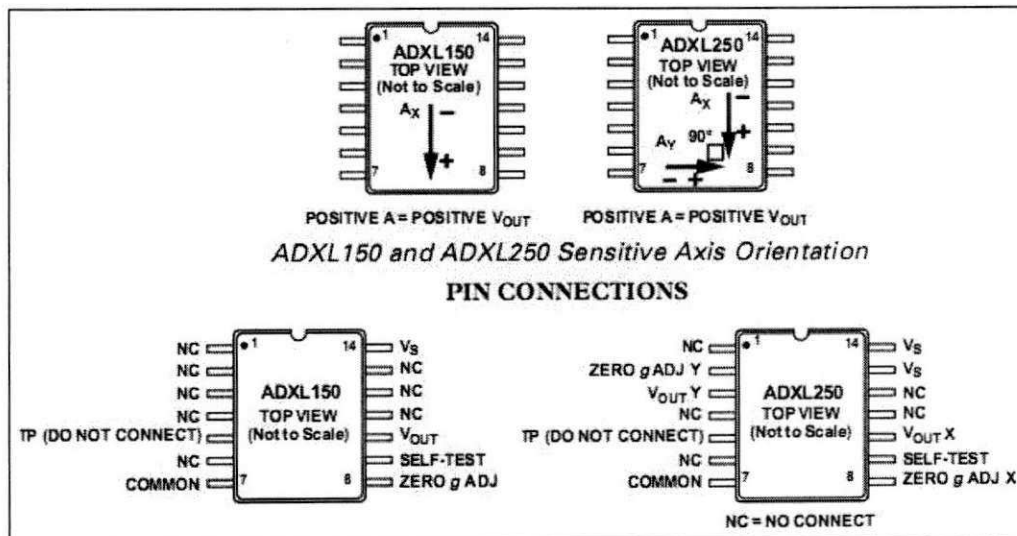


Figura 65 - Direções, sentidos de sensibilidade e funções dos pinos do acelerômetro MEMS utilizado.
Fonte: ANALOG DEVICES (1998).



Figura 66 - Microfone de eletreto utilizado nos experimentos.

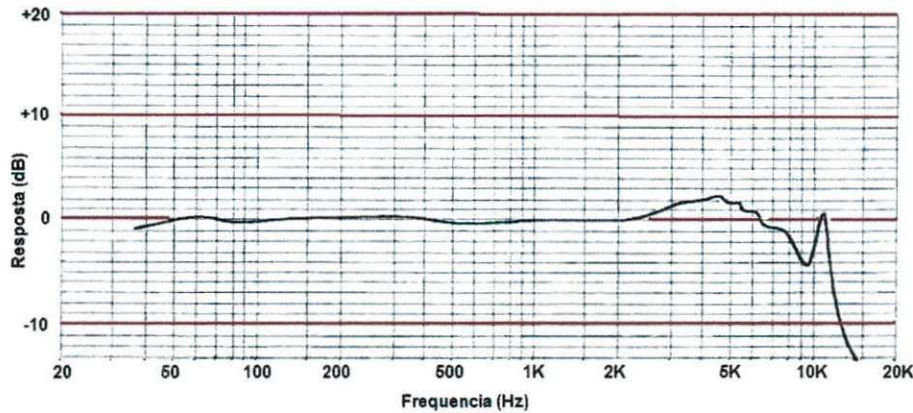


Figura 67 - Resposta em frequência do microfone de eletreto utilizado.

4.4.3. A placa de aquisição de dados desenvolvida

Para captura de um sinal de aceleração como o da saída do acelerômetro utilizado, o método mais simples é a utilização de um conversor analógico-digital de faixa de entrada igual à de saída do sensor, ou seja, de 0 a 5,0 VDC. A idéia inicial foi a aquisição de um conversor com saída USB, para conexão direta a um microcomputador. Existem diversos modelos no mercado, no entanto, opções com alta resolução (12 bits ou acima) e alta taxa da amostragem (50 kHz ou acima) são, normalmente, de custo elevado. Por outro lado, não é possível a conexão direta da saída daquele acelerômetro a uma placa de som típica pelas seguintes razões:

- uma placa de som captura somente sinais de tensão alternada (AC); sinais de tensão contínua (DC) são bloqueados por um filtro passa-alta na entrada da placa de som, dentro do computador;

- geralmente, a faixa de entrada de tensão é de $\pm 1,0$ VAC; sinais de maior tensão podem danificar a placa.

Os estudos a serem realizados com a firmeza da fruta necessitavam, assim, de um sistema de aquisição de dados com as seguintes características:

- baixo custo;
- conexão a microcomputadores PC-compatíveis, de mesa (*desktop*) e portáteis (*notebooks* ou *netbooks*);
- resolução mínima do conversor analógico-digital: 12 bits, para captura de detalhes dos sinais provenientes dos sensores *MEMS*;
- número mínimo de canais: 2, permitindo o registro de dois sinais simultâneos para cada placa de som utilizada;
- taxa de amostragem: mínimo de 50 kHz, permitindo o registro de sinais dentro de todo o espectro de frequência de saída do sensor *MEMS*;
- possibilidade de utilização de programas de aquisição preferencialmente gratuitos e de fácil operação;
- possibilidade de aquisição por meio do Matlab®, diretamente (existência de *drivers* para Matlab®);
- facilidade de utilização;
- possibilidade de exportação dos dados em formatos conhecidos e consolidados (.txt, .csv, .wav, por exemplo).

Existem alternativas comerciais que atendem a algumas destas especificações, no entanto são de custo relativamente elevado ou de difícil aquisição (importação). Além disso, algumas necessitam de programas de aquisição específicos (dedicados), muitas vezes também de custo elevado.

Após diversos estudos e pesquisas, percebeu-se que era possível o desenvolvimento de uma interface, de baixo custo e de fácil operação, que

pudesse ser conectada diretamente à entrada de uma placa de som típica de microcomputadores PC-compatíveis.

Assim, foi projetada, construída e testada uma placa de interface com as seguintes características:

- número de canais de entrada (conexão com sensores): 6;
- número de canais de saída (conexões com placa(s) de som de microcomputadores): 6;
- fontes de alimentação integradas e estabilizadas, para os sensores e para os circuitos integrados amplificadores (opcionais);
- amplificação dos sinais com ganho facilmente configurável (troca de resistor em soquete);
- condicionamento de sinais de sensores *MEMS*, para conversão de nível e acoplamento direto da saída;
- resolução do conversor A/D: mínima de 16 bits (típica de uma placa de som);
- taxa de amostragem: até 192 kHz, dependendo da placa de som utilizada;
- disponibilidade automática de *drivers* para Matlab®;
- disponibilidade de inúmeros programas gratuitos de aquisição de dados, uma vez que os sinais são capturados “como sinais de áudio”;
- baixo custo: placa completa construída por menos de R\$ 100,00 (dez/2010);
- facilidade de reprodução da placa: *layout* projetado para placa de circuito impresso simples face;
- facilidade de aquisição de componentes, todos disponíveis no mercado nacional;
- facilidade de montagem;
- baixo consumo, podendo, opcionalmente, ser alimentada por baterias, para estudos de campo.

A placa-protótipo construída para testes é mostrada na Figura 68. Serviu para ajuste experimental de valores de alguns componentes, de acordo com os níveis dos sinais de saída dos sensores utilizados. A interface foi chamada de *FACS1: Fonte, Amplificador e Condicionador de Sinais I*. Como o próprio nome sugere, esta placa tem três funções:

- alimentar os sensores com tensão estabilizada de + 5,0 VDC;
- amplificar sinais de baixa amplitude provenientes de outros sensores, por exemplo, de microfones de eletreto para captura de sinais de áudio do impacto de um bastão com a fruta;
- converter o nível + 5,0 VDC em dois níveis $\pm 2,5$ VDC “virtuais”, permitindo a conexão direta da saída do acelerômetro na entrada da placa de som;

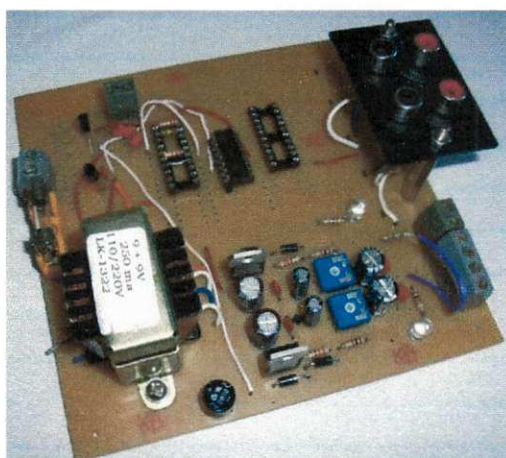


Figura 68 - Protótipo da placa de interface *FACS1*.

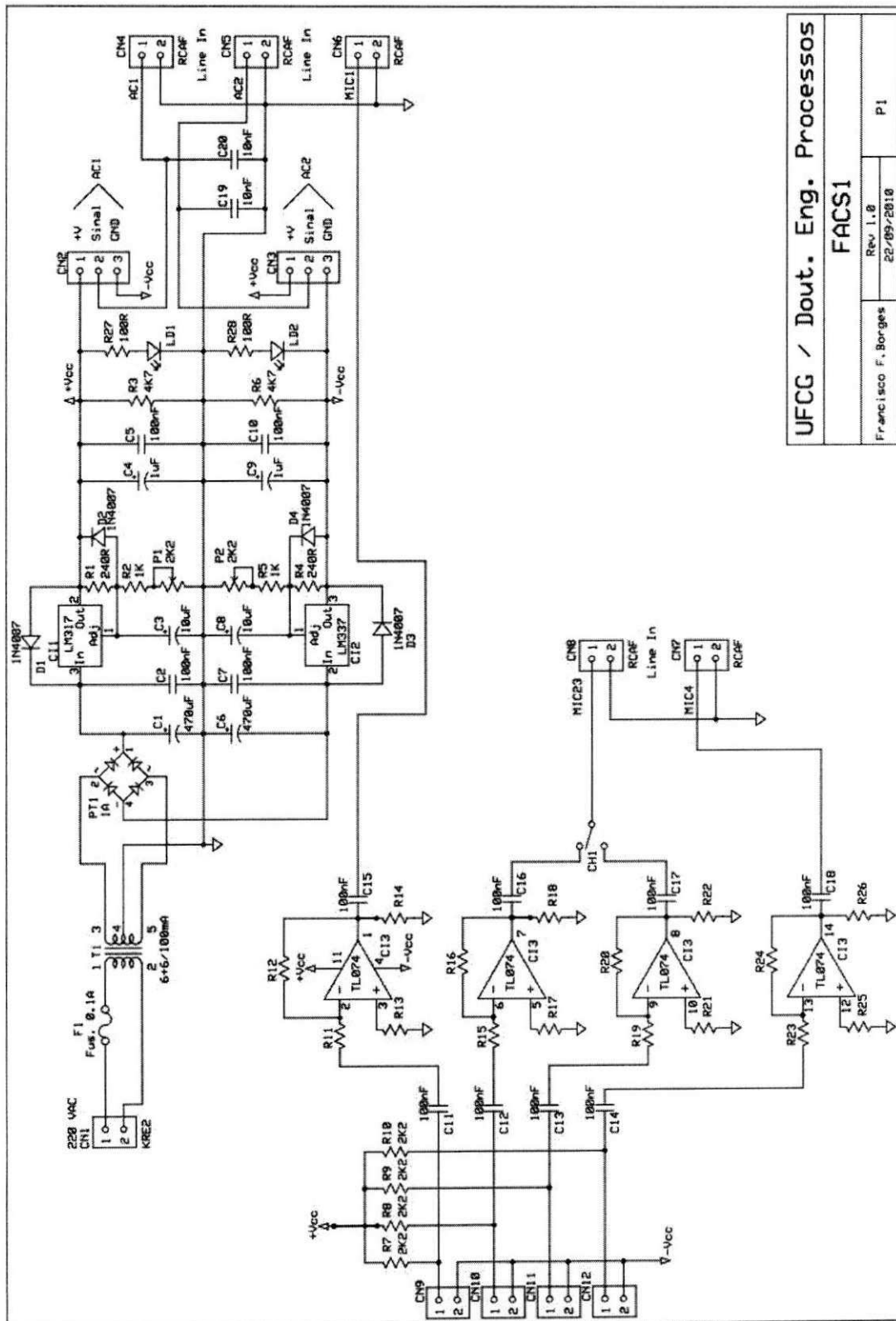
Na parte superior do esquema é mostrada a fonte de alimentação simétrica, que pode ser ajustada para tensões a partir de $\pm 2,0$ VDC até um máximo de ± 30 VDC, faixas estas que dependem do transformador utilizado. No caso, as tensões foram ajustadas, via P1 e P2, para $\pm 2,5$ VDC, o que dá uma diferença de potencial de +5,0 VDC, se os sensores forem alimentados via pinos 1 e 3 de CN2 e CN3. Ou seja, do ponto de vista do sensor, ele é alimentado por uma tensão de +5,0 VDC, no entanto, do ponto de vista da fonte, o sensor está alimentado por tensões simétricas de $\pm 2,5$ VDC. Este “truque” faz com que a tensão de *offset* de saída do sensor, que é por volta de metade da tensão de

alimentação, esteja praticamente na referência (zero volt) da fonte e, também, da entrada da placa de som do microcomputador, via pinos 2 de CN4 e CN5. Esta solução possui algumas vantagens:

- simplicidade e baixo custo;
- a não existência de nenhum circuito eletrônico (amplificador operacional, por exemplo) entre a saída do acelerômetro e a entrada da placa de som, garantindo que todo o sinal capturado pela placa seja proveniente do acelerômetro, sem a adição de possíveis ruídos nem a inserção de filtros indesejados ou não-linearidades dentro da faixa de frequências do sinal, que poderiam interferir no sinal propriamente dito do acelerômetro.

A placa ainda possui quatro canais, amplificados, para aquisição de sinais analógicos AC, seguindo a mesma concepção: é possível alimentar o sensor com tensão contínua, de modo que a saída do sensor, que possui *offset* de metade da tensão de alimentação, seja ligada à entrada do amplificador operacional (C13). Esta configuração reduz o valor do capacitor - ou até pode suprimi-lo, em alguns casos - de acoplamento AC (C11 a C14 e C15 a C18), o que minimiza os problemas decorrentes da inserção de circuitos entre o sensor e a placa de som.

A placa de circuito impresso foi projetada em simples face, para facilidade de confecção e montagem. Também foram utilizados componentes eletrônicos de muito fácil aquisição, mesmo em lojas do mercado local. Na Figura 69 é mostrado o esquema elétrico do circuito projetado. O *layout* da face de solda é mostrado na Figura 70, enquanto que a disposição dos componentes (incluindo *jumpers*) é mostrada na Figura 71. As imagens não estão em tamanho real, que é de 12,7 cm x 12,7 cm (5,0 x 5,0 polegadas). Com estas imagens é possível a reprodução da placa via processo de serigrafia.



UFCC / Dout. Eng. Processos
FACS1
 Rev. 1.8
 Francisco F. Borges
 22/09/2010
 P.1

Figura 69 - Esquema elétrico da interface construída para aquisição de dados de sensores analógicos diretamente para uma placa de som típica de microcomputador.

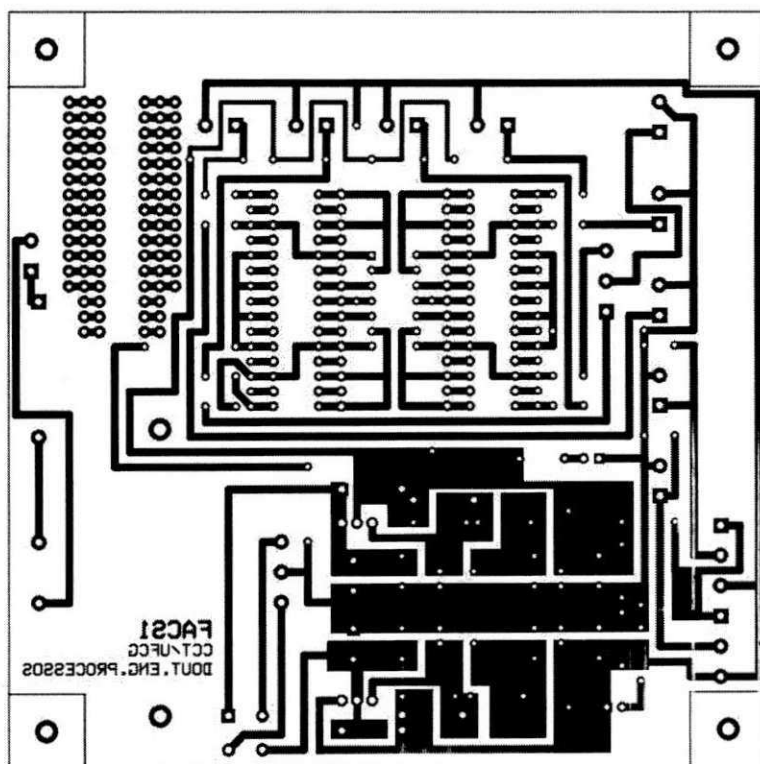


Figura 70 - Layout da placa de circuito impresso (lado solda)
Dimensões reais: 12,7 cm x 12,7 cm.

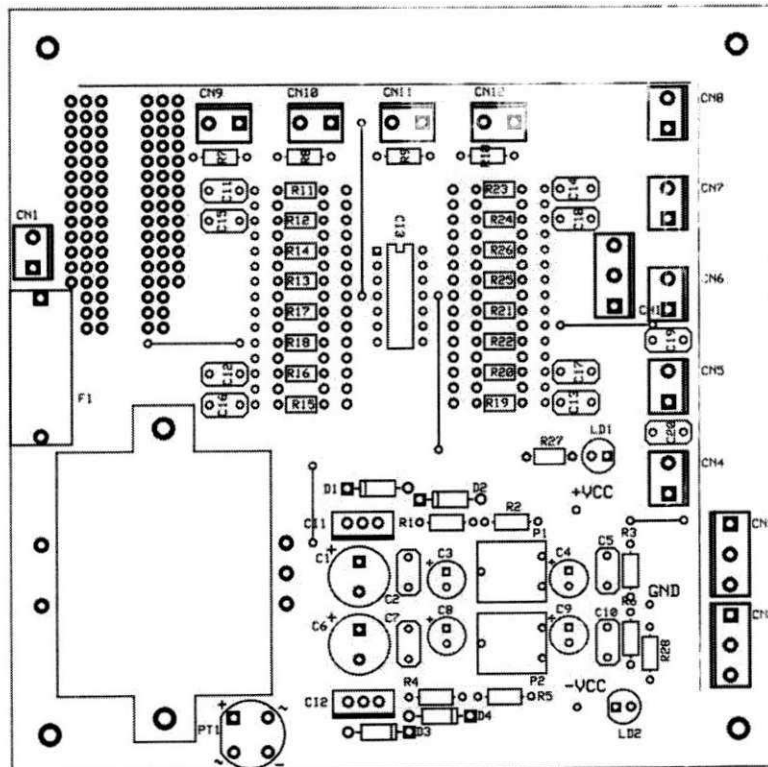


Figura 71 - Layout da placa de circuito impresso (serigrafia e lado componentes).

4.4.4. Caracterização das placas de som utilizadas nos experimentos

Antes dos experimentos propriamente ditos, foi necessário executar testes que permitissem a identificação das principais características técnicas das placas de som a serem utilizadas para a captura dos sinais do acelerômetro e dos microfones de eletreto. A quantificação de parâmetros como a resposta em frequência e distorção harmônica total é fundamental para uma identificação precisa das condições do experimento e necessária para uma correta aquisição dos dados analógicos dos sensores.

Para a aquisição dos dados de todos os sensores previstos foram utilizados 3 *notebooks*, simultaneamente. Para os testes das placas de som e registro de suas características, foi utilizado um programa profissional gratuito de análise de áudio, o *Rightmark Audio Analyzer (RMAA)*, versão 6.0.3, disponível no site do fabricante (<http://audio.rightmark.org>). Foi montado um cabo de áudio com dois conectores P2 macho estéreo, de modo a permitir a conexão da saída de fone de ouvido à entrada de microfone da própria placa, criando uma conexão de laço de retorno (*loopback*). Após ajustes de níveis de entrada e saída, o programa realizou uma série de testes, enviando e recebendo diversos padrões de áudio, que permitiram uma completa caracterização da placa de som sob teste.

Na Tabela 11 estão descritas as principais características registradas pelo programa, para dois dos notebooks utilizados. Pode-se observar que o índice geral de desempenho fornecido pelo programa foi “Bom”, inclusive para o terceiro notebook (não mostrado na tabela).

Os resultados destes testes mostraram que as três placas possuem respostas em frequência que foram consideradas suficientemente planas na faixa de 50 Hz a 2,5 kHz, faixa esta compatível com as faixas planas das respostas dos dois sensores, o acelerômetro (DC - 600 Hz) e o microfone de eletreto (40 Hz - 2,5 kHz).

Na Figura 72 são mostrados exemplos dos gráficos gerados para uma das placas (modelo Realtek, *notebook* Nextera).

Tabela 11 - Características das placas de som de dois dos *notebooks* utilizados para captura dos sinais do acelerômetro e dos microfones de eletreto.

Característica	Unidade	Notebook	
		Nextera (NXT-M7F)	Gigabyte
Fabricante do CODEC da placa de som	-	Realtek	Realtek
Modo de amostragem do teste	-	16-bit, 44 kHz	
Tom de calibração	Hz	1000	
Resposta em frequência (40Hz - 15 kHz)	dB	+0.25, -0.32 (Boa)	+0.99, -0.15 (Média)
Nível de ruído	dB(A)	-84.0 (Bom)	-83.5 (Bom)
Faixa dinâmica	dB(A)	84.2 (Boa)	82.2 (Boa)
Distorção harmônica total	%	0.262 (Ruim)	0.0083 (Muito boa)
Linha cruzada (estéreo)	dB	-81.3 (Muito boa)	-82.8 (Muito boa)
Distorção de intermodulação, mais ruído	%	0.205 (Média)	0.028 (Boa)
Desempenho geral	-	Bom	Bom

Os testes realizados confirmaram que os sensores utilizados são compatíveis com as características técnicas das placas de som. Por outro lado, as placas não foram calibradas de modo a permitir a conversão dos valores obtidos para a grandeza física do sensor, ou seja, a aceleração. No entanto, pode-se considerar, com a utilização destas placas de som, que a unidade arbitrária de amplitude definida, equivalente ao valor numérico capturado do conversor A/D da placa de som, é função suficientemente linear da unidade de aceleração, na faixa de 50 Hz a 2,5 kHz.

Assim, todos os parâmetros obtidos dos sinais capturados, relativos à estimativa de firmeza, levaram em consideração a suposição de linearidade do sistema de captura "FACS1 + placa de som" nesta faixa de frequência, o que é uma suposição plausível em função dos testes de caracterização realizados, tanto dos sensores quanto das placas de som. Em outras palavras, por exemplo, se a aceleração do sensor duplicar, dentro da faixa de frequência acima especificada, o valor adquirido do conversor A/D também irá duplicar.

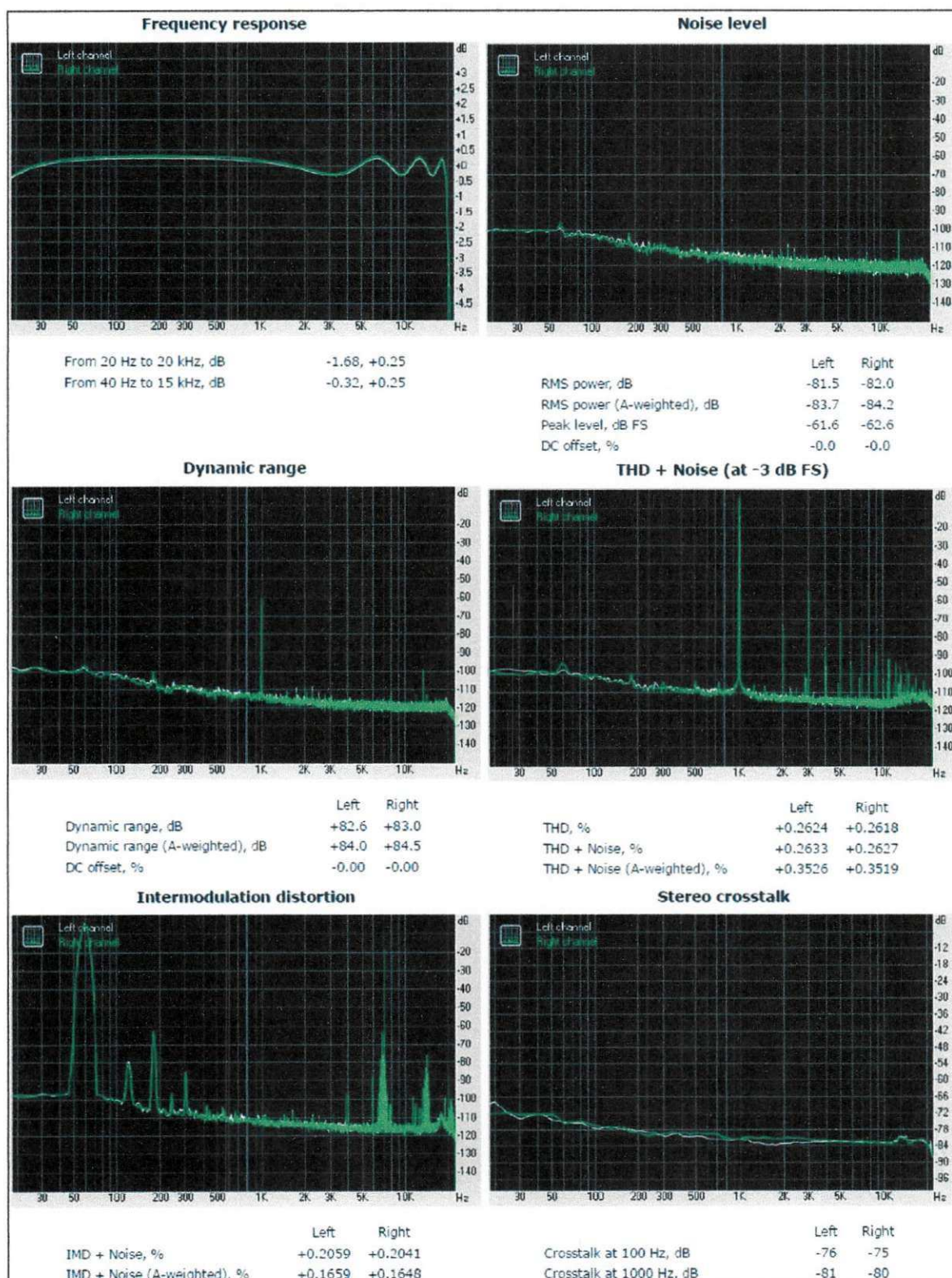


Figura 72 - Gráficos relativos aos testes da placa de som de um dos notebooks utilizados para captura dos sinais do acelerômetro e do microfone de eletreto. Notebook marca Nextera, modelo NXT-M7F.

4.4.5. Dispositivo Sensor 1 (DS1): microfone de eletreto capturando som do impacto

As características do primeiro dispositivo sensor proposto para estimativa de firmeza da fruta estão descritas a seguir.

4.4.5.1. Grandeza medida: som emitido pelo impacto de um bastão de pequena massa com a fruta.

Um dos métodos mais utilizados pelos consumidores para avaliarem a firmeza de uma fruta é o de executar pequenas batidas com os dedos, percussionando-a de modo a se ouvir a resposta acústica da fruta (som característico), na tentativa da identificação de defeitos internos e avaliação do nível de maturação.

No entanto, consumidores não treinados não dispõem de um padrão de referência do som como função da firmeza, de modo que esta avaliação, subjetiva, tende a alta variabilidade e baixa eficácia. Este método, embora não normatizado, pode ser mais útil para profissionais da área, como vendedores e reposidores de supermercado, que têm maior experiência no trato com determinada fruta.

4.4.5.2. Descrição do DS1

Um pequeno bastão rígido de alumínio, cilíndrico, teve uma de suas extremidades fixada a um eixo com rolamento, de modo a se construir um pêndulo, como mostrado esquematicamente na Figura 73. Este conjunto eixo-pêndulo foi fixado a uma estrutura metálica construída com cantoneiras, de modo que o pêndulo se movimenta somente num plano vertical, embora com atrito no eixo e com o ar, ambos não caracterizados. Neste aparato, o registro dos sinais será feito apenas no momento do impacto e a suposição é de que o atrito total é constante ao longo do movimento angular do pêndulo (máximo de 45°) e em todos os experimentos realizados.

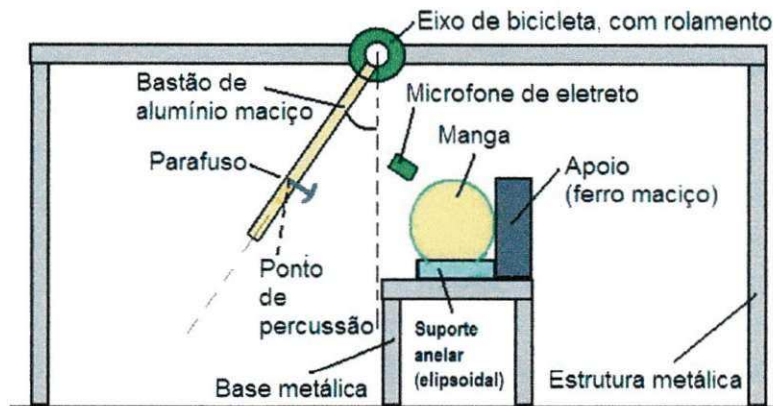


Figura 73 - Aparato construído para captura do som de percussão da fruta. Os outros sensores simultâneos não estão aqui representados, para maior clareza.

No bastão metálico pendular foi fixado um parafuso a um terço da distância da extremidade inferior. Este ponto é conhecido como **centro de percussão** do bastão, o ponto onde um impacto sofrido pelo bastão provocará a menor vibração possível no ponto de fixação (eixo do rolamento). Este é o ponto ótimo onde deve acontecer o impacto com a fruta, reduzindo-se ao máximo as vibrações do sistema mecânico decorrentes deste impacto e permitindo a captura de sinais que, em tese, melhor representam o verdadeiro som do impacto.

Há um problema quando se aplica esta técnica em esteiras transportadoras: como as frutas têm massas e tamanhos diferentes, o ponto de impacto não será exatamente no centro de percussão, para todas as frutas. Para minimizar este problema, foi colocado um parafuso, com cabeça arredondada, rigidamente fixado ao bastão na altura do centro de percussão, de modo que é a cabeça do parafuso, e não o bastão, que impacta a fruta. Com esta solução, mesmo que o ponto de contato com a fruta não esteja exatamente na altura do centro de percussão do bastão, grande parte da força do impacto será transferida para a base do parafuso, no centro de percussão.

4.4.5.3. Registro do sinal do DS1

Um microfone de eletreto foi posicionado a cerca de 2 cm de distância da fruta e conectado diretamente à entrada de microfone de um *notebook* (marca *Nextera*, modelo *NXT-M7F*). Na realidade, outros sensores foram colocados

simultaneamente, conforme descrito nos itens a seguir, embora na Figura 73, para maior clareza, esteja mostrado somente DS1, que é o microfone que capturou os sons de percussão da fruta pelo bastão.

O bastão foi levantado manualmente e solto de 3 ângulos de elevação diferentes: 15°, 30° e 45°, medidos com a ajuda de um ponteiro e de um transferidor. Foram gravados, com o programa *Audacity* (<http://audacity.sourceforge.net/>), sons dos impactos com as 30 mangas. Registros típicos destes sons estão mostrados na Figura 74, onde nota-se o aumento das amplitudes quando se aumenta o ângulo de elevação do bastão.

4.4.5.4. Hipótese para DS1

A hipótese sobre o desempenho do DS1 foi a de que as informações extraídas dos sinais de áudio capturados com este método teriam boa correlação com o índice de firmeza da fruta sob teste, quando comparadas com os métodos de referência para este experimento, que seriam as medidas de cor da polpa e as medidas de firmeza feitas com um texturômetro.

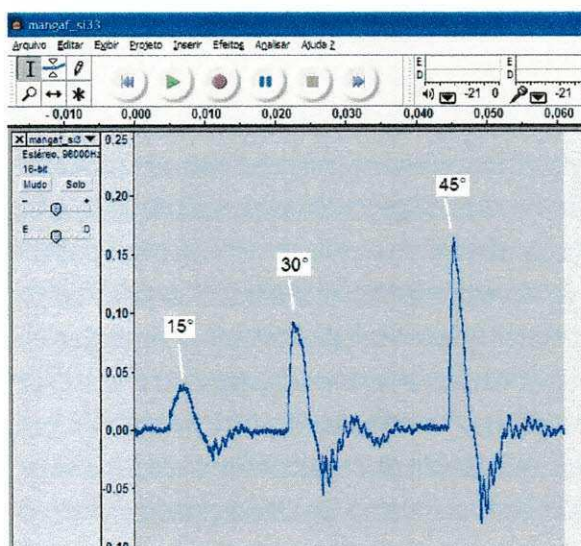


Figura 74 - Registros típicos de sons dos impactos do bastão com a fruta, a 15°, 30° e 45° de elevação, da esquerda para a direita.

4.4.5.5. Vantagens do DS1

O DS1 é um sensor de baixo custo, por volta de R\$ 0,50 (apenas o microfone de eletreto) no mercado local de Campina Grande (PB), e de grande banda passante na faixa de áudio, tipicamente até 10 kHz. Como já há conhecimento consolidado de que o som do impacto estima a frequência natural da fruta e esta tem relação com sua firmeza e massa (vide revisão bibliográfica deste capítulo), os dados coletados com este sensor poderão ser úteis para a fusão com dados de outros sensores. Ou seja, as medidas obtidas com o DS1 poderão ser integradas às medidas obtidas com os outros dispositivos de avaliação de firmeza propostos.

4.4.5.6. Possíveis desvantagens do DS1

Uma possível desvantagem é a captura de sons ambientes juntos com o som do impacto da fruta. Filtros específicos terão de ser estudados e aplicados para o caso de utilização deste sensor em ambiente industrial. Outra desvantagem, em um ambiente de produção, é a dificuldade de padronização da amplitude do sinal de entrada, uma vez que as frutas têm tamanhos diferentes, alterando, conseqüentemente, a distância da fruta ao sensor, a cada fruta testada, por exemplo, numa esteira transportadora. Nos experimentos realizados, a fruta estava em repouso e o microfone foi posicionado sempre a 2 cm de distância da fruta.

4.4.6. **Dispositivo Sensor 2 (DS2): acelerômetro MEMS**

As características do segundo dispositivo sensor proposto para estimativa de firmeza da fruta estão descritas a seguir.

4.4.6.1. Grandeza a ser medida: desaceleração do bastão percussionador da fruta

4.4.6.2. Descrição do DS2

O mesmo aparato descrito no experimento anterior foi utilizado neste experimento, com a diferença de que, ao invés da captura do som do impacto, foi registrada a desaceleração do bastão no momento do impacto. Para isto, o acelerômetro *MEMS* (*ADXL250* da *Analog Devices*) foi fixado a uma placa de circuito impresso (Figura 75), que foi presa (colada) firmemente ao bastão, de tal maneira que o centro do circuito integrado ficou aproximadamente à mesma altura do centro de percussão do bastão (Figura 76). Assim, quando do impacto, o acelerômetro registrou, aproximadamente, a desaceleração sofrida pelo bastão naquele ponto.

O acelerômetro foi conectado à placa FACS1, de modo que o sinal de saída deste sensor sofreu uma conversão de nível e pode ser capturado diretamente pela placa de som de um *notebook*. Assim, nenhum amplificador ou filtro foi instalado entre a saída do acelerômetro e a entrada da placa de som. Deste modo, foram gravados os impactos com as mesmas 30 mangas, nos mesmos três ângulos citados anteriormente, sendo que três destes registros típicos estão mostrados na Figura 77. Note-se o aumento das amplitudes quando se aumenta o ângulo de elevação do bastão.

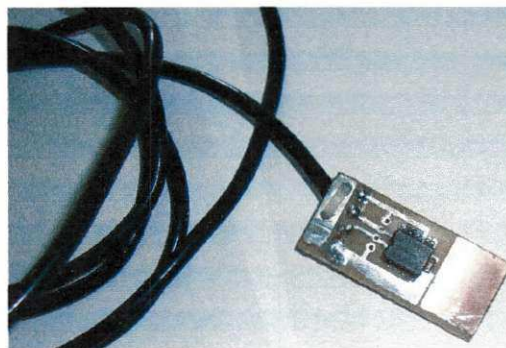


Figura 75 - Acelerômetro *MEMS* ADXL250 (DS2), fixado numa placa de circuito impresso projetada para conexão com a placa FACS1.

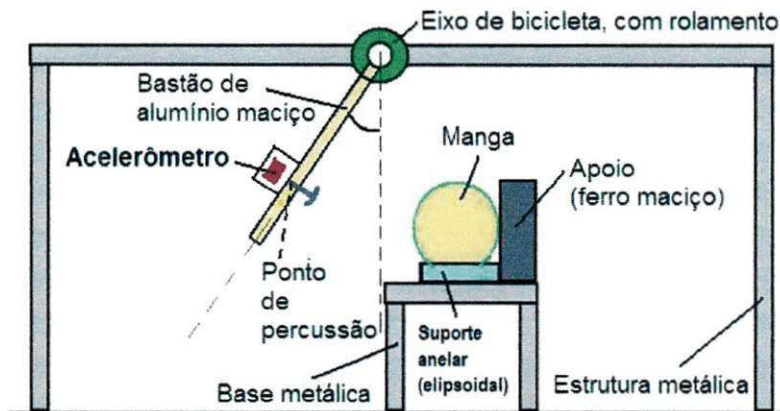


Figura 76 - O mesmo aparato da Figura 73, agora mostrando a posição do acelerômetro colocado para registro da desaceleração do bastão no centro de percussão. Os outros sensores simultâneos não estão aqui representados, para maior clareza.

4.4.6.3. Hipótese 2

A hipótese para DS2 foi a de que as informações extraídas dos sinais de desaceleração obtidos com este método teriam boa correlação com o índice de firmeza da fruta sob teste, quando comparadas com os métodos de referência para este experimento, que seriam as medidas de cor da polpa e as medidas de firmeza, feitas com um texturômetro.

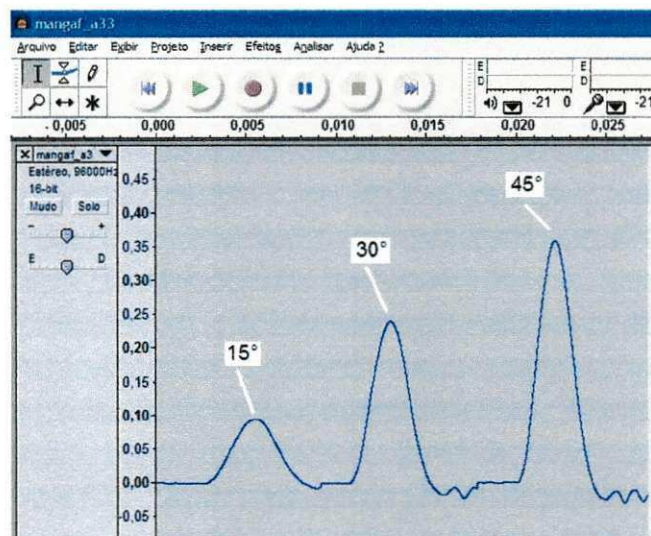


Figura 77 - Registros típicos de acelerações do bastão no centro de percussão, no impacto com a fruta, a 15°, 30° e 45° de elevação, da esquerda para a direita.

Outros estudos com métodos similares, com acelerômetros piezoelétricos, mostraram boa correlação entre desaceleração do bastão e

firmeza (PELEG, 1999; NOURAIN et al., 2005). Por outro lado, não foram identificados, nos artigos científicos pesquisados, estudos com a utilização de acelerômetros *MEMS*, de baixo custo, posicionados no centro de percussão do bastão, para estimativa de firmeza de frutas utilizando a técnica de impacto de pequena massa.

4.4.6.4. Vantagens do DS2

O DS2 é um sensor de baixo custo (por volta de US\$ 2.00 no mercado internacional), de boa linearidade, além de integrar toda a eletrônica de condicionamento e amplificação do sinal. Um sistema desenvolvido com este sensor poderá ter excelente relação custo/benefício: os sinais capturados serão de baixa frequência (faixa de áudio); de amplitude elevada (já condicionados e amplificados pelo circuito integrado do acelerômetro); e de fácil aquisição, utilizando-se a FACS1 e uma placa de som já embutida na maioria dos microcomputadores comerciais. Devido ao seu baixo custo, um sistema de estimativa de firmeza desenvolvido com ele poderia possuir múltiplos dispositivos de medida em paralelo, permitindo, por exemplo, o cálculo de médias de diversos pontos de impacto. Como para o DS1, as medidas obtidas com este dispositivo poderão ser integradas às medidas obtidas com os outros dispositivos de avaliação de firmeza propostos.

4.4.6.5. Possíveis desvantagens do DS2

Uma possível desvantagem do DS2 é a banda passante do acelerômetro utilizado, por volta de 1 kHz (-3 dB), que é bem menor do que a banda passante de um acelerômetro piezoelétrico típico, normalmente maior que 5 kHz. Esta banda passante do acelerômetro *MEMS* pode não permitir a captura de detalhes de componentes de alta frequência do sinal do impacto o que, em tese, dificultaria uma possível correlação de parâmetros do sinal com a firmeza da fruta, caso características relevantes para esta correlação estejam naqueles detalhes. Por outro lado, a idéia é que esta desvantagem seja compensada numa fusão do sinal com os de outros sensores de firmeza propostos.

4.4.7. Dispositivo Sensor 3 (DS3): microfone de eletreto como acelerômetro

As características do terceiro dispositivo sensor proposto para estimativa de firmeza da fruta estão descritas a seguir.

4.4.7.1. Grandeza a ser medida: desaceleração do bastão percussionador da fruta

4.4.7.2. Descrição do DS3

O mesmo aparato descrito no experimento anterior foi utilizado neste experimento, com a diferença de que, ao invés do acelerômetro *MEMS*, foi utilizado um microfone de eletreto vedado para registro do sinal do impacto. A proposta foi a utilização deste dispositivo com o orifício de entrada de som vedado, funcionando como um sensor de aceleração adaptado. Pesquisas realizadas por SUPROCK et al. (2010) mostraram que um microfone com esta adaptação pode funcionar como um acelerômetro, com boa linearidade de resposta em uma frequência de até cerca de 3 kHz, o triplo da frequência máxima do acelerômetro utilizado no DS2 (1 kHz, -3 dB). A proposta é analisar a viabilidade de utilização deste sensor modificado para a medição de firmeza da fruta.

O feltro existente na parte frontal do microfone foi retirado e colocado, em seu lugar, um pequeno pedaço de fita adesiva. O dispositivo, então, foi colado na placa de circuito impresso, ao lado do acelerômetro *MEMS* descrito no experimento anterior, de modo que ambos os sensores ficassem na mesma linha em relação ao centro de percussão do bastão, como mostrado na Figura 78. Assim, quando do impacto, ambos registraram a desaceleração sofrida pelo bastão. A parte frontal do sensor também foi envolvida com a cola (tipo *Araldite*[®]), de modo a ficar completamente rígida e solidária com toda a placa de circuito impresso.

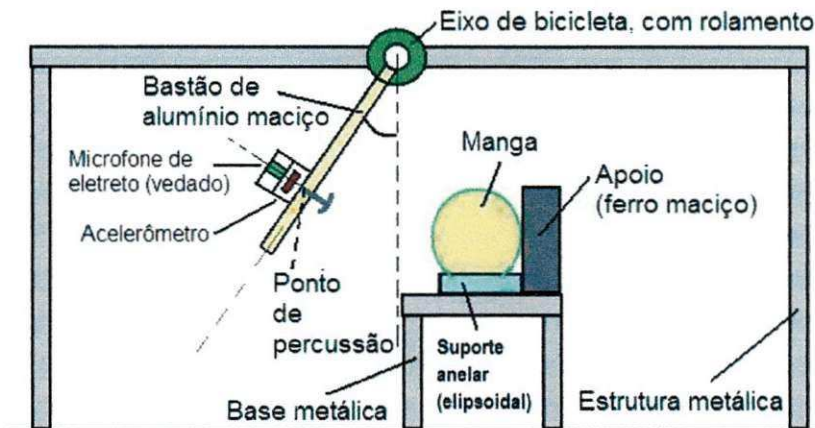


Figura 78 - O mesmo aparato da Figura 76, agora mostrando as posições do acelerômetro e do microfone de eletreto modificado, ambos em linha em relação ao centro de percussão. Os outros sensores simultâneos não estão aqui representados, para maior clareza.

O microfone de eletreto vedado foi conectado diretamente à entrada *MIC* da placa de som de um dos *notebooks*. Foram gravados os impactos com as mesmas 30 mangas, nos mesmos três ângulos citados anteriormente, sendo que três registros típicos estão mostrados na Figura 79. Note-se, como nos sensores anteriores, o aumento das amplitudes quando se aumenta o ângulo de elevação do bastão.

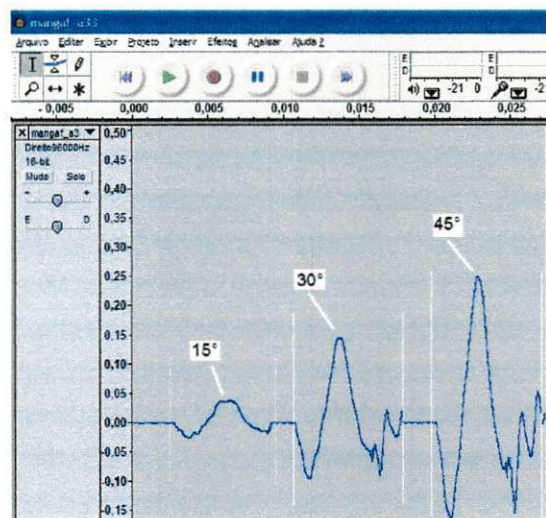


Figura 79 - Registros típicos de acelerações do bastão no centro de percussão, a 15°, 30° e 45° de elevação, da esquerda para a direita.

4.4.7.3. Hipótese 3

A hipótese é que as informações extraídas dos sinais de “áudio” (um possível misto de desaceleração e vibração mecânica da caixa do microfone de

eletreto) obtidos com este método terão boa correlação com o índice de firmeza da fruta sob teste, obtido com os métodos de referência. Neste estudo, os métodos de referência são as medidas de cor da polpa, feitas com um colorímetro, e as medidas destrutivas de firmeza, feitas com um texturômetro.

De modo semelhante à proposta do DS2, não foram identificados, nos artigos científicos pesquisados, estudos com a utilização de um microfone de eletreto vedado, funcionando como acelerômetros *MEMS* de baixo custo, posicionado no centro de percussão de um bastão, para estimativa de firmeza de frutas utilizando a técnica de impacto de pequena massa.

4.4.7.4. Vantagens do DS3

O DS3 é um sensor de baixo custo, por volta de R\$ 0,50 no mercado local de Campina Grande (PB). Observa-se, na Figura 79, uma maior riqueza de detalhes de componentes de alta frequência do sinal, quando comparada à Figura 77, exatamente pela maior banda passante do microfone de eletreto em relação ao acelerômetro *MEMS*. Caso se confirme a correlação de algum parâmetro do sinal capturado com os índices de maturação de referência citados, os dados coletados com este sensor poderão ser úteis para a fusão com os dados de outros sensores, ou seja, as medidas obtidas com o DS3 poderão ser integradas às medidas obtidas com os outros dispositivos de avaliação de firmeza propostos.

4.4.7.5. Possíveis desvantagens do DS3

Uma desvantagem deste sensor é a não-padronização de suas características técnicas (resposta em frequência, distorção harmônica, entre outros), necessitando da elaboração de um protocolo de calibração específico caso se desenvolva, com base neste sensor, um equipamento comercial de classificação de frutas por firmeza.

4.4.8. Dispositivos Sensores 4 (DS4): microfones de eletreto acoplados à fruta

As características do quarto dispositivo sensor proposto para estimativa de firmeza da fruta estão descritas a seguir.

4.4.8.1. Grandeza a ser medida: velocidade do som na fruta

4.4.8.2. Descrição dos sensores DS4

Ao longo de experimentos preliminares realizados com os sensores DS1 e DS3, percebeu-se que era possível, também, acoplar os microfones de eletreto ao fruto, ao menos num experimento controlado, a nível de laboratório, com o objetivo de se calcular a velocidade do som na fruta. Para isso, foram utilizadas ventosas de borracha, uma de cada lado da fruta, conforme mostrado na Figura 80. Na base de cada uma das ventosas foi inserido um microfone, ambos ligados à entrada *MIC* (estéreo) da placa de som de um dos *notebooks*. Assim, quando do impacto do bastão na fruta, também foi possível registrar dois sinais defasados no tempo: o sinal recebido pelo microfone posicionado ao lado do ponto de impacto e o sinal recebido pelo microfone posicionado no lado oposto ao do impacto.

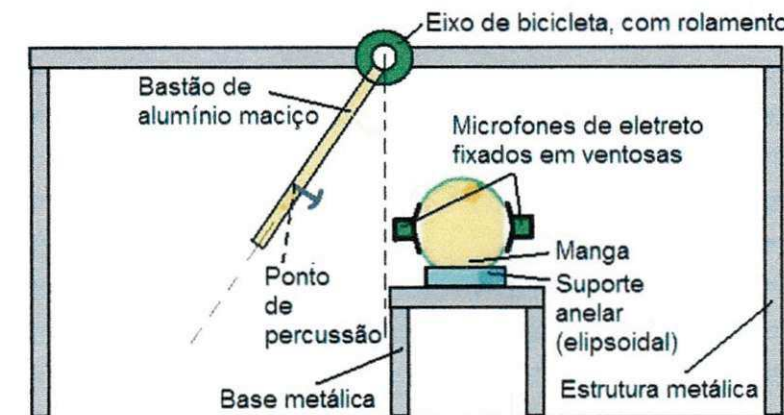


Figura 80 - Aparato construído para captura de sons de percussão, para cálculo da velocidade do som na fruta. O apoio de ferro maciço e os outros sensores simultâneos não estão aqui representados, para maior clareza.

As ventosas foram fixadas manualmente nos lados da fruta, com a ajuda de um pouco de detergente de lavar louças, neutro, que contribuiu para a retirada do ar dentro da câmara da ventosa, fazendo com que permanecesse tempo suficiente para o registro dos sinais. Foram gravados os impactos com as mesmas 30 mangas, nos mesmos três ângulos citados anteriormente, sendo que um destes registros típicos está mostrado na Figura 81. O sinal inferior foi registrado pelo microfone próximo ao ponto de impacto, enquanto o sinal superior foi registrado pelo microfone posicionado no lado oposto ao do impacto.

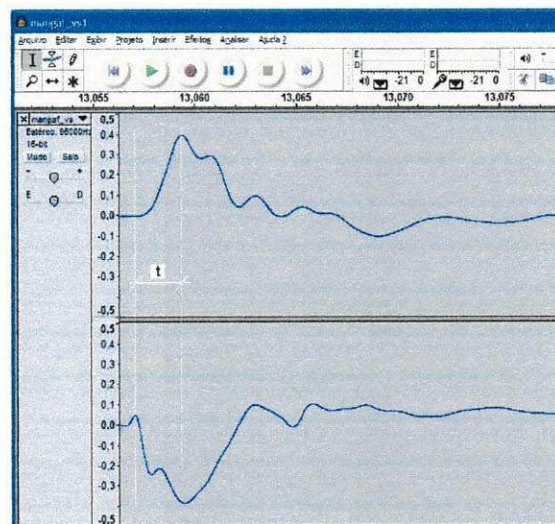


Figura 81 - Registros típicos de sons do impacto do bastão com a fruta.

4.4.8.3. Hipótese 4

A hipótese é a de que, conjuntamente com alguma medida de distância entre os dois sensores - realizada por outro método automático como, por exemplo, um dos métodos de processamento de imagens propostos nos capítulos anteriores - as informações extraídas da comparação entre os dois sinais de áudio capturados com este método permitirão o cálculo da velocidade do som na fruta. Consequentemente será possível uma estimativa da firmeza da fruta, sempre tomando como referência as medidas de cor da polpa, feitas com um colorímetro, e as medidas de firmeza feitas de maneira destrutiva, com um texturômetro.

4.4.8.4. Vantagens dos sensores DS4

A principal vantagem deste método é a possibilidade de se estimar a firmeza da fruta **sem a dependência do cálculo da massa**, desde que se conheça a distância entre os sensores, o que seria uma contribuição relevante ao conhecimento científico nesta área de medida não-destrutiva de firmeza de frutas. Caso se confirme boa correlação da firmeza com a velocidade média do som no interior da fruta, este método pode ser uma boa alternativa para estimativa não destrutiva da firmeza, mesmo em situações de produção, em galpões de processamento pós-colheita, caso se proponha um adequado posicionamento dos sensores. Além disso, também na mesma linha dos sensores anteriores, as medidas obtidas com os sensores DS4 poderão ser integradas às medidas obtidas com os outros dispositivos propostos.

4.4.8.5. Possíveis desvantagens dos sensores DS4

A maior desvantagem deste método é a necessidade da distância entre os sensores para o cálculo da velocidade do som. Outros pontos importantes referem-se à dificuldade de posicionamento dos sensores (funcionalidade das ventosas) no fruto e à possível alteração das formas de onda pelas ventosas de borracha.

4.4.9. **Utilização do conjunto FACS1 mais placa de som**

Com a placa FACS1 foi possível conectar os dispositivos DS1 a DS4, simultaneamente, a placas de som de 3 *notebooks*. É importante notar que alguns *notebooks* possuem dois canais (estéreo) na entrada de microfone (*MIC*) da placa de som, permitindo a conexão de dois sinais analógicos simultâneos, por exemplo, canais dos eixos **X** e **Y** de um único acelerômetro ou dois canais **X** de dois acelerômetros distintos. No caso de computadores de mesa, também as entradas *LINE IN* das placas de som internas possuem dois canais (estéreo).

Além dos acelerômetros *MEMS*, a princípio qualquer sensor com saída em tensão alternada (*AC*) e tensão de *offset* de metade da tensão de alimentação

pode ser conectado à FACS1. Sensores com estas características, já com amplificação e condicionamento interno do sinal, estão ficando cada vez mais comuns, o que aumenta consideravelmente as possibilidades de aplicação da placa desenvolvida.

Uma vez que um sinal analógico de tensão alternada passa a ser visto, para um microcomputador com placa de som conectada à FACS1, como um sinal de áudio, diversos programas de captura e processamento de áudio podem ser utilizados, muitos deles gratuitos, que executam o cálculo de diversos parâmetros relevantes do sinal, como valores máximos e mínimos, além da aplicação de filtros digitais e transformada rápida de Fourier.

Exemplo típico de um destes programas gratuitos é o *Audacity* (<http://audacity.sourceforge.net/>), utilizado neste trabalho, cujos exemplos de registros de sinais de áudio, simultâneos, capturados com os microfones de eletreto, são mostrados na tela de captura de sinais (Figura 82).

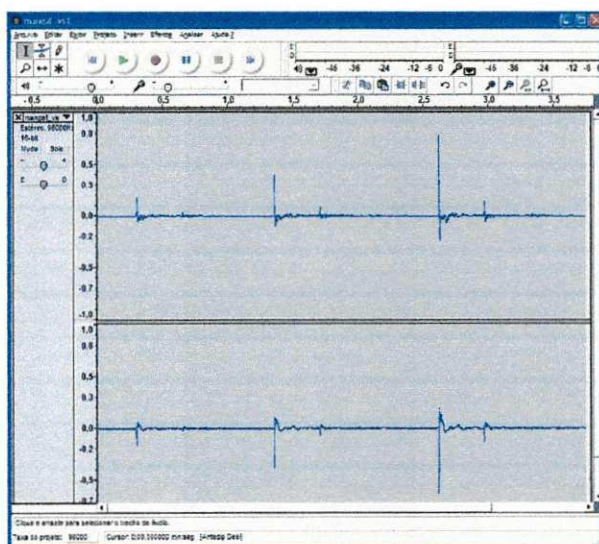


Figura 82 - Sinais de áudio em dois canais, capturados com o programa gratuito *Audacity*.

A técnica de conversão de nível realizada pela FACS1 está representada na Figura 83, que permitiu a aquisição dos sinais dos sensores DS1 a DS4 de maneira fácil, rápida e a baixo custo.

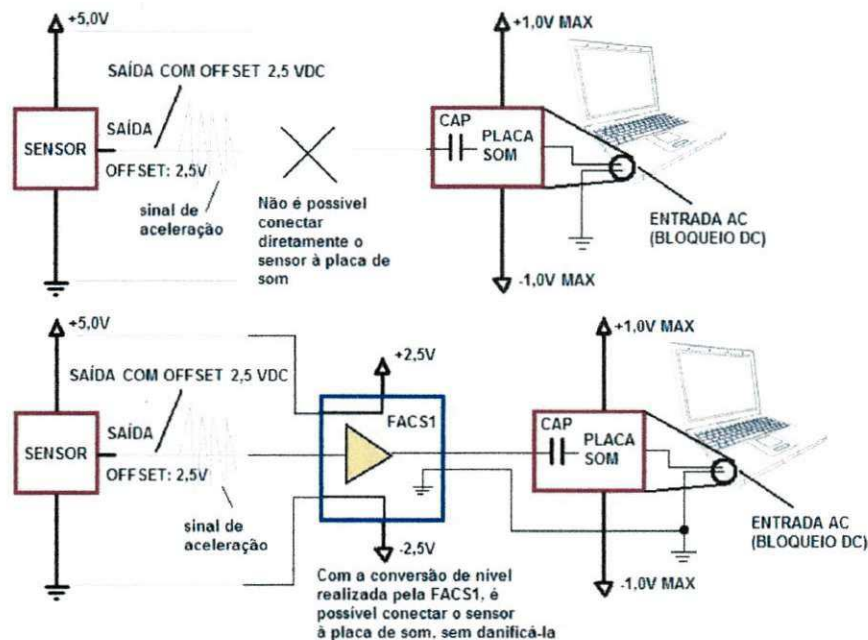


Figura 83 - Técnica de conversão de nível implementada pela placa FACS1.

O acelerômetro utilizado (ADXL250), por exemplo, fornece saída em tensão proporcional à aceleração à qual está submetido. No entanto, quando em repouso, a tensão de saída estabiliza-se em torno de metade da tensão de alimentação, chamada de tensão de *offset* (2,5V). Assim, ele não pode ser conectado diretamente à entrada de áudio de um microcomputador, que suporta, normalmente, um máximo de 2,0 Vpp (pico a pico). O que a placa FACS1 faz é uma simples conversão de nível do sinal, onde os limites originais de 0 VDC e 5,0 VDC são convertidos, por um deslocamento de referência, para limites -2,5 VDC e +2,5 VDC, de modo que a tensão de *offset*, do ponto de vista do microcomputador, passa a ser aproximadamente zero. Este “truque” permite a conexão direta às entradas de áudio (*line in*) da placa de som.

É importante notar que o sensor é alimentado pela fonte simétrica da FACS1 embora, do ponto de vista do sensor, esta fonte seja unipolar. Por outro lado, além da conversão de nível, há uma vantagem adicional da utilização da placa: como o *offset* de saída é aproximadamente zero em relação ao microcomputador, não há necessidade de colocação de capacitores de bloqueio de tensão contínua na saída do sensor, bastando a utilização do capacitor que já está embutido na própria placa de som. Esta solução evita a inserção de filtros

indesejáveis no sinal, permitindo a aquisição em sua forma original. Após esta etapa, se desejável, filtros digitais (por programa) poderão ser aplicados.

A placa de som foi configurada para aquisição a 96 kHz (96.000 amostras por segundo) e resolução de 16 bits, que corresponde a 2^{16} ou 65.536 níveis. Considerando-se que o sinal foi capturado com a linha de base (nível de referência) em zero, a faixa de valores de amplitude efetivamente gravada no arquivo de áudio (.wav) vai de -32.767 a +32.768.

4.4.10. Parâmetros de referência do estágio de maturação da fruta

Os parâmetros de referência do estágio de maturação da fruta, utilizados neste trabalho, foram as medidas de cor da polpa, obtida com um colorímetro, e as medidas de firmeza feitas com um texturômetro, ambos parâmetros destrutivos.

Após a realização das medidas não-destrutivas descritas anteriormente, com os dispositivos DS1 a DS4, as mangas foram levadas para o Laboratório de Propriedades Físicas de Materiais Biológicos, do LAPPA/UFCG, onde foram realizados os experimentos descritos a seguir.

4.4.10.1. Metodologia de medição da cor da polpa

As frutas foram cortadas, com uma faca, em dois planos horizontais, numa profundidade aproximada de 1 cm da superfície, como mostrado na Figura 84.

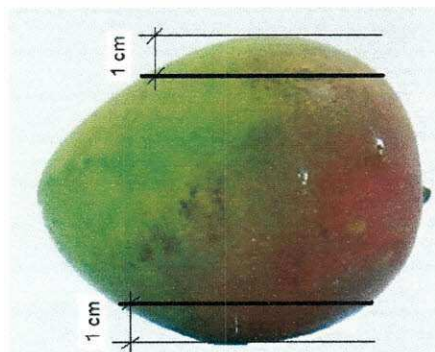


Figura 84 - Planos de corte das frutas, para medição de cor da polpa e medição de força de penetração com o texturômetro.

Na Figura 85 são mostradas algumas destas mangas cortadas, onde se percebe as diferenças dos tons amarelados das polpas, o que caracteriza diferentes níveis de firmeza e diferentes estágios de maturação.

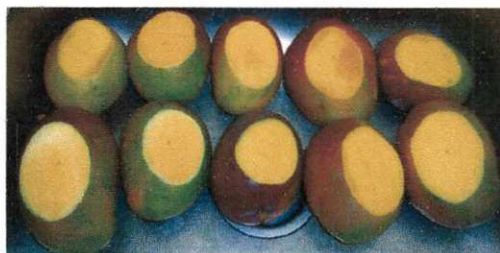


Figura 85 - Exemplos de mangas cortadas, onde se observa as diferenças de tonalidades do tom amarelado das polpas, caracterizando diferentes níveis de firmeza e estágios de maturação.

Após os cortes, foram medidas as colorações das polpas com um equipamento de referência, um colorímetro modelo *Miniscan XE Plus*, da *Hunterlab* (Figura 86). Foram feitas medidas no centro de ambos os lados cortados, registrando-se quatro parâmetros:

- *Colorimeter Color - L*a*b* (C/10 °)*;
- *Colorant Strenght - L*a*b* (D65/10 °)*;
- *Tristimulus Values XYZ (D65/10 °)*;
- *Color Plot L*a*b* (D65/10 °)*.



Figura 86 - Colorímetro *Miniscan XE Plus* (*Hunterlab*) e detalhes do processo de captura de cores das polpas das mangas.

4.4.10.2. Metodologia de medição de firmeza com o texturômetro

O segundo método utilizado como referência destrutiva de firmeza foi o registro gráfico da força necessária para penetrar a fruta com um punção metálico. O equipamento que permitiu a realização deste teste foi o Analisador de Textura (*Texture Analyzer TA-XT2*), da *Stable Microsystems*, conhecido também como texturômetro, pertencente ao Laboratório de Propriedades Físicas de Materiais Biológicos, do LAPPA/UFCG. É um equipamento eletrônico computadorizado que permite a fixação de um determinado punção em um braço que é movimentado para baixo, sob controle de um microcomputador a ele conectado. O braço é movimentado a uma velocidade constante especificada, de tal maneira que a força necessária para que o punção (*probe*) penetre a polpa da fruta seja registrada graficamente. Os parâmetros e condições do experimento estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros e condições do experimento de medição de firmeza com o analisador de textura – primeira etapa.

Parâmetros e condições do experimento – Primeira etapa	
Equipamento	Analisador de Textura
Marca	<i>Stable Microsystems</i>
Modelo	TA-XT2
Punção	Cilíndrico
Material do punção	Aço inox
Diâmetro do punção	2 mm
Velocidade antes do toque na fruta	10 mm/s
Velocidade após o toque na fruta	1 mm/s
Tempo de penetração na fruta	10 s
Profundidade de penetração na fruta	10 mm
Data de realização	23/10/2010
Temperatura ambiente	24 °C
Local	LAPPA/UFCG (Bloco CZ) – C.Grande (PB)

Na Figura 87 são mostrados o equipamento e o posicionamento da manga para o registro gráfico realizado.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO – PRIMEIRA ETAPA

Este item trata da análise dos sinais coletados na primeira etapa dos experimentos cujos materiais e métodos foram descritos anteriormente, neste

capítulo. Os resultados e discussão da segunda etapa de experimentos estão descritos mais à frente, neste mesmo capítulo.

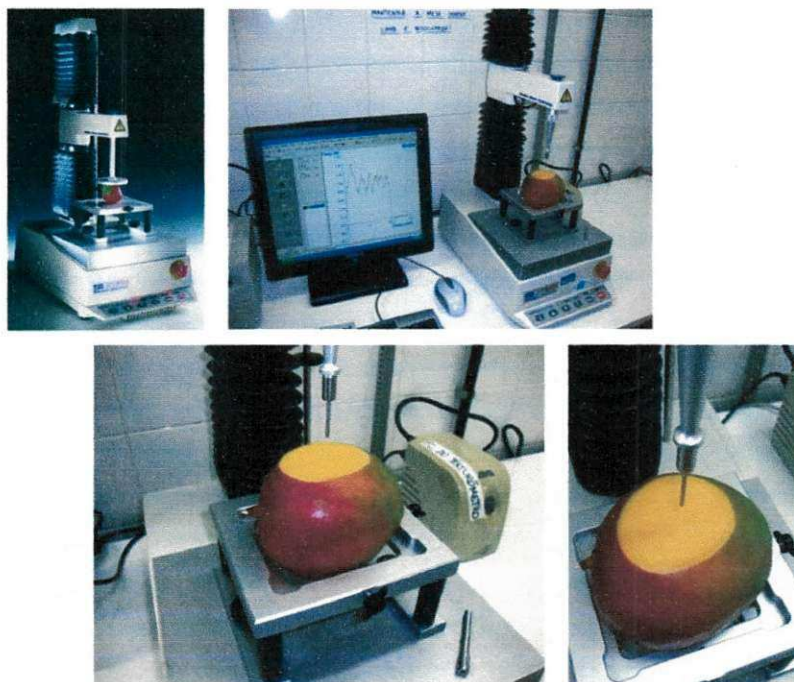


Figura 87 - Analisador de Textura (*Texture Analyser TA-XT2*, da *Stable Microsystems*) usado para medição da firmeza da fruta, como segunda referência destrutiva.

4.5.1. Resultados da primeira etapa: fruta apoiada

Os resultados descritos neste subitem referem-se aos experimentos realizados com o aparato descrito na Figura 78, onde a fruta esteve em repouso sobre uma base anelar (elipsoidal) e apoiada, na lateral oposta ao impacto, em uma barra metálica pesada (> 4 kg) de modo que, ao impacto com o bastão, praticamente não houve movimentação da fruta. Esta configuração foi escolhida exatamente com o intuito de se evitar esta movimentação lateral, uma vez que um dos objetivos iniciais era o de analisar um parâmetro importante do impacto, que é o coeficiente de restituição, que tem relação direta com os tempos entre impactos sucessivos do bastão com a fruta, até o repouso. A preocupação, naquele momento, era a de que a movimentação da fruta influenciasse diretamente os intervalos entre impactos sucessivos, inviabilizando a análise do coeficiente de restituição.

É evidente que a escolha inicial, de apoiar a fruta na barra metálica e no suporte anelar, poderia ter efeitos colaterais e interferir no sinal de desaceleração do bastão e na aparente firmeza da fruta, uma vez que o bastão estaria impactando um sistema “fruta + apoio metálico” e não somente a fruta. No entanto, esperava-se que esta interferência fosse pequena, o que não comprometeria o resultado final.

4.5.1.1. Parâmetros extraídos de curva do acelerômetro - primeira etapa

Nas Tabelas 13 a 15 estão mostrados os parâmetros (Figura 88) calculados dos sinais capturados do acelerômetro (DS2), para os ângulos de 15°, 30° e 45°, respectivamente, onde:

- **To**: tempo inicial de referência do arquivo de áudio (.wav), em segundos;
- **Ti**: tempo do início do impacto (desaceleração do bastão no impacto), em segundos;
- **Tf**: tempo final da curva de aceleração no impacto, em segundos;
- **Tt**: tempo total do impacto, em segundos;
- **Amp**: amplitude do sinal, em uma unidade arbitrária chamada de **uam** (unidade de amplitude). Esta unidade é equivalente ao valor numérico capturado do conversor A/D da placa de som.
- **A**: área da curva de aceleração do bastão no impacto, em uma unidade arbitrária de área chamada de **ua** (unidade de área), equivalente ao produto **uam.s**;
- **Inc**: inclinação da curva de aceleração do bastão no impacto, em uma unidade arbitrária equivalente ao quociente **uam/s**.

Tabela 13 - Parâmetros calculados das curvas do acelerômetro, 15°, primeira etapa.

Manga	Peso	Acelerômetro 15°					Amplitude	Inclinação
		Área	Tempo inicial	Tempo final	Tempo total			
N°	(g)	A	Ti	Tf	Tt = Tf - Ti	Amp	Inc = Amp/(0.5*Tt)	
		(ua)	(s)	(s)	(s)	(uam)	(uam/s)	
1	552	9.49643	0.04025	0.04403	0.00378	4298	2274074.1	
2	477	9.74935	0.04510	0.04884	0.00374	4527	2420855.6	
3	819	9.44453	0.01046	0.01465	0.00419	3807	1817183.8	
4	710	9.30280	0.06222	0.06593	0.00371	4315	2326145.6	
5	550	9.68689	0.06710	0.07140	0.00430	4093	1903720.9	
6	556	9.07020	0.06208	0.06608	0.00400	3937	1968500.0	
7	493	9.71852	0.08418	0.08847	0.00429	4117	1919347.3	
8	470	9.64449	0.13268	0.13664	0.00396	4509	2277272.7	
9	478	9.58980	0.04064	0.04500	0.00436	3896	1787156.0	
10	402	8.67065	0.03809	0.04190	0.00381	3872	2032545.9	
11	508	9.25785	0.07544	0.07958	0.00414	3875	1871980.7	
12	470	9.12550	0.04450	0.04900	0.00450	3632	1614222.2	
13	610	9.32799	0.03653	0.04064	0.00411	3937	1915815.1	
14	441	8.98922	0.03633	0.04067	0.00434	3706	1707834.1	
15	568	9.41889	0.03746	0.04155	0.00409	3981	1946699.3	
16	502	9.94256	0.04059	0.04496	0.00437	4057	1856750.6	
17	535	9.10156	0.03486	0.03884	0.00398	4013	2016582.9	
18	518	9.70426	0.04672	0.05073	0.00401	4348	2168578.6	
19	547	9.09737	0.02970	0.03372	0.00402	3923	1951741.3	
20	498	9.75591	0.02860	0.03257	0.00397	4370	2201511.3	
21	555	9.52451	0.04344	0.04757	0.00413	4010	1941888.6	
22	606	9.79876	0.02846	0.03351	0.00505	3327	1317623.8	
23	302	8.62988	0.07101	0.07607	0.00506	3120	1233201.6	
24	492	8.42851	0.04065	0.04475	0.00410	3531	1722439.0	
25	454	9.24819	0.05402	0.05809	0.00407	3907	1919901.7	
26	417	9.50137	0.04302	0.04715	0.00413	3950	1912832.9	
27	427	8.62316	0.05800	0.06270	0.00470	3270	1391489.4	
28	503	9.37373	0.02921	0.03327	0.00406	3977	1959113.3	
29	559	9.40390	0.05693	0.06110	0.00417	3952	1895443.6	

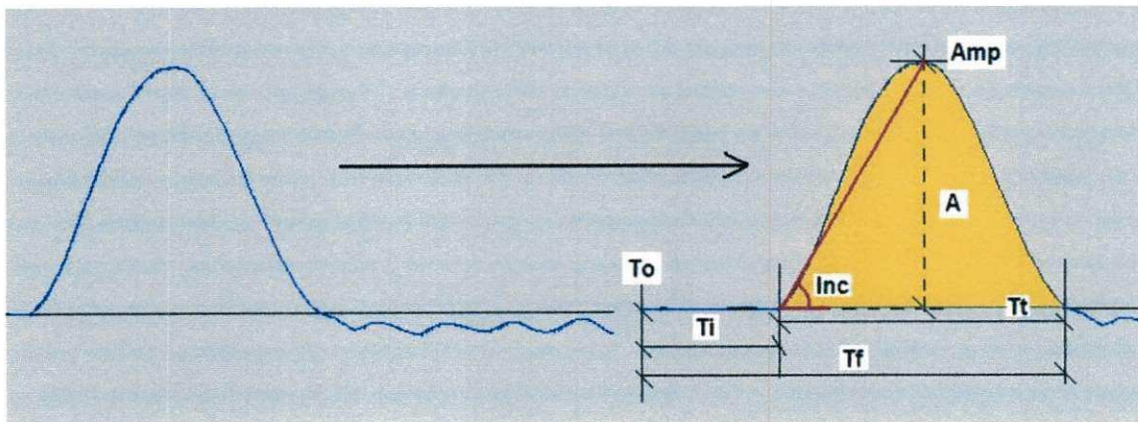


Figura 88 - Curva típica capturada do acelerômetro no momento do impacto do bastão com a fruta (esquerda). São mostrados também os parâmetros relevantes que foram calculados (direita).

Tabela 14 - Parâmetros calculados das curvas do acelerômetro, 30°, primeira etapa.

		Acelerômetro 30°					
Manga	Peso	Área	Tempo inicial	Tempo final	Tempo total	Amplitude	Inclinação
N°	(g)	A	Ti	Tf	Tt = Tf - Ti	Amp	Inc = Amp/(0.5*Tt)
		(ua)	(s)	(s)	(s)	(uam)	(uam/s)
1	552	18.92333	0.14815	0.15166	0.00351	9590	5464387.5
2	477	18.78406	0.14886	0.15229	0.00343	9818	5724781.3
3	819	18.76829	0.08098	0.08482	0.00384	8703	4532812.5
4	710	19.06635	0.25565	0.25912	0.00347	9830	5665706.1
5	550	18.99990	0.24594	0.24979	0.00385	9189	4773506.5
6	556	18.36335	0.25550	0.25915	0.00365	8943	4900274.0
7	493	18.93032	0.38666	0.39059	0.00393	8947	4553180.7
8	470	19.20686	0.44505	0.44852	0.00347	10656	6141786.7
9	478	18.36700	0.25625	0.26016	0.00391	8702	4451150.9
10	402	17.90844	0.21984	0.22337	0.00353	9005	5101983.0
11	508	17.85939	0.26928	0.27307	0.00379	8443	4455409.0
12	470	17.65571	0.18962	0.19367	0.00405	8060	3980246.9
13	610	18.59367	0.20324	0.20694	0.00370	9146	4943783.8
14	441	18.35916	0.21108	0.21492	0.00384	8999	4686979.2
15	568	18.94226	0.15569	0.15940	0.00371	9257	4990296.5
16	502	18.50033	0.17824	0.18211	0.00387	8936	4618087.9
17	535	18.56315	0.22043	0.22412	0.00369	9162	4965853.7
18	518	18.64102	0.25836	0.26196	0.00360	9585	5325000.0
19	547	18.37509	0.20324	0.20689	0.00365	9070	4969863.0
20	498	18.9469	0.18298	0.18654	0.00356	9644	5417977.5
21	555	18.93076	0.16247	0.16620	0.00373	9157	4909919.6
22	606	18.24883	0.16107	0.16568	0.00461	7091	3076355.7
23	302	17.80752	0.34463	0.34891	0.00428	7882	3683177.6
24	492	18.49078	0.15378	0.15756	0.00378	8744	4626455.0
25	454	17.54623	0.25919	0.26299	0.00380	8280	4357894.7
26	417	18.15966	0.18741	0.19120	0.00379	8464	4466490.8
27	427	17.82626	0.19678	0.20082	0.00404	8267	4092574.3
28	503	18.50768	0.14519	0.14893	0.00374	9033	4830481.3
29	559	18.46362	0.17774	0.18151	0.00377	8846	4692838.2

Observa-se, nas Tabelas 13 a 15, como esperado, um aumento proporcional dos parâmetros área, amplitude e inclinação em função do aumento dos ângulos de impacto. No entanto, o tempo do pulso (tempo total) mantém-se praticamente constante para todos os ângulos.

Um aspecto importante a destacar é a grande quantidade de amostras do sinal ao longo da curva de impacto, o que garantiu muito boa definição da curva e captura dos seus detalhes, devido à alta taxa de amostragem (96 kHz) da placa de som em relação à taxa de variação do próprio sinal capturado. Por exemplo, no caso da manga N° 1 da Tabela 13 (15°), o tempo total foi Tt =

0.00378 s e, como o tempo de amostragem é de 1/96000 s, ou seja, $T_a = 1,042 \times 10^{-5}$ s (10,42 μ s), esta curva é composta de $n = T_t/T_a = 363$ amostras.

Tabela 15 - Parâmetros calculados das curvas do acelerômetro, 45°, primeira etapa.

Manga	Peso	Acelerômetro 45° - Primeira etapa					
		Área	Tempo inicial	Tempo final	Tempo total	Amplitude	Inclinação
		A	Ti	Tf	Tt = Tf - Ti	Amp	Inc = Amp/(0.5*Tt)
N°	(g)	(ua)	(s)	(s)	(s)	(uam)	(uam/s)
1	552	28.82364	0.27537	0.27872	0.00335	15621	9325970.1
2	477	27.90403	0.29752	0.30078	0.00326	15586	9561963.2
3	819	28.6052	0.15251	0.15608	0.00357	14870	8330532.2
4	710	29.22270	0.53851	0.54182	0.00331	16087	9720241.7
5	550	28.06544	0.46950	0.47317	0.00367	14778	8053406.0
6	556	27.93224	0.45852	0.46198	0.00346	14629	8456069.4
7	493	26.82458	0.73595	0.73962	0.00367	13831	7537329.7
8	470	28.35512	0.77681	0.77999	0.00318	16256	10223899.4
9	478	27.45098	0.49090	0.49453	0.00363	14363	7913498.6
10	402	27.44436	0.41208	0.41547	0.00339	14993	8845427.7
11	508	27.16376	0.56640	0.56993	0.00353	14215	8053824.4
12	470	27.43224	0.35576	0.35949	0.00373	14022	7518498.7
13	610	27.98435	0.40989	0.41334	0.00345	15093	8749565.2
14	441	27.59033	0.42280	0.42632	0.00352	15035	8542613.6
15	568	28.51437	0.31017	0.31361	0.00344	15281	8884302.3
16	502	28.33323	0.35558	0.35915	0.00357	15188	8508683.5
17	535	28.17047	0.44373	0.44721	0.00348	14996	8618390.8
18	518	28.32986	0.50519	0.50854	0.00335	15729	9390447.8
19	547	28.12330	0.42207	0.42550	0.00343	15128	8820991.3
20	498	28.09415	0.40634	0.40970	0.00336	15445	9193452.4
21	555	28.78395	0.35782	0.36133	0.00351	15213	8668376.1
22	606	27.06962	0.31607	0.32042	0.00435	11423	5251954.0
23	302	24.65533	0.58708	0.59111	0.00403	11751	5831761.8
24	492	27.72793	0.31687	0.32043	0.00356	14365	8070224.7
25	454	26.76016	0.44815	0.45172	0.00357	13753	7704761.9
26	417	27.43339	0.39480	0.39836	0.00356	14047	7891573.0
27	427	27.39472	0.39198	0.39567	0.00369	14041	7610298.1
28	503	28.23630	0.32916	0.33265	0.00349	15212	8717478.5
29	559	27.89660	0.32005	0.32356	0.00351	14642	8343019.9

Esta elevada taxa de aquisição foi particularmente importante para a captura dos detalhes do sinal do outro sensor, o microfone de eletreto, que possui componentes de mais alta frequência do que o sinal do acelerômetro. Na realidade, pode-se observar que a própria característica mecânica e sensibilidade do acelerômetro utilizado fazem com que, no seu sinal de saída, esteja incorporado um filtro passa-baixa, o que provoca esta resposta "suave" do sinal.

Ainda com relação à alta taxa de amostragem utilizada, embora pareça muito alta para o sinal do acelerômetro (96 kHz para 1 kHz de banda passante do sensor), foi escolhida pelo fato de que não se conhecia, *a priori*, a forma do sinal a ser capturado com o aparato desenvolvido. Além disso, outros sensores, que possam vir a ser utilizados em aplicações correlatas, poderão ter respostas de mais alta frequência e o sistema (FACS1 + placa de som) já estará preparado para estas situações.

4.5.1.2. Parâmetros extraídos da curva do microfone de eletreto - primeira etapa

Nas Tabelas 16 a 18 estão mostrados os parâmetros calculados dos sinais capturados do microfone de eletreto (DS3), fixado em conjunto com o acelerômetro, para os ângulos de 15°, 30° e 45°, respectivamente.

Os mesmos parâmetros calculados para o caso anterior, representados agora para uma forma de onda típica do microfone de eletreto, no momento do impacto do bastão com a fruta, estão apresentados na Figura 89. A diferença em relação à forma de onda anterior é que foram calculados os parâmetros para as três primeiras ondas do sinal:

- **To**: tempo inicial de referência do arquivo de áudio (.wav);
- **Ti1**: tempo do início do impacto para a onda 1;
- **Tf1**: tempo final da onda 1;
- **Tt1**: tempo total da onda 1;
- **Ti2 a Ti3; Tf2 a Tf3; Tt2 a Tt3**: não mostrados na Figura 89, mas calculados de forma semelhante a Ti1 - Tt1;
- **Amp1 a Amp3**: amplitudes das ondas 1, 2 e 3, respectivamente;
- **A1 a A3**: áreas das ondas 1, 2 e 3, respectivamente;
- **Inc1 a Inc3**: inclinações das ondas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 16 - Parâmetros calculados das ondas obtidas:
microfone de eletreto, 15°, primeira etapa,

		Microfone 15°								
Manga	Peso	Áreas			Amplitudes			Inclinações		
		A1	A2	A3	Amp1	Amp2	Amp3	Inc1	Inc2	Inc3
N°	(g)	(ua)			(uam)			(uam/s) x 10 ⁻⁶		
1	552	-1.775	3.529	-1.108	-1962	2604	-3586	-2.044	2.226	-6.896
2	477	-2.059	3.838	-1.163	-2517	2851	-3429	-3.070	2.690	-6.178
3	819	-1.577	2.872	-0.902	-1860	2010	-2956	-2.150	1.614	-9.692
4	710	-1.936	3.669	-1.318	-2542	2591	-3939	-3.852	2.366	-11.936
5	550	-1.669	3.251	-0.877	-1722	2323	-2458	-2.002	1.952	-4.275
6	556	-1.648	3.169	-1.026	-1912	2291	-3076	-2.223	1.933	-5.804
7	493	-1.669	3.295	-0.966	-2025	2450	-3037	-2.355	2.033	-5.840
8	470	-2.030	3.748	-1.330	-2046	2997	-3380	-2.365	2.664	-5.828
9	478	-1.648	3.089	-0.939	-1694	2112	-1863	-1.720	1.676	-2.760
10	402	-1.658	3.044	-1.019	-2100	2401	-2373	-2.333	1.799	-5.584
11	508	-1.632	2.800	-0.970	-1589	2196	-3174	-1.826	1.347	-10.945
12	470	-1.444	2.720	-0.768	-1368	1801	-2275	-1.572	1.344	-4.643
13	610	-1.607	3.037	-1.050	-1683	2229	-3908	-1.934	1.858	-9.770
14	441	-1.427	2.825	-0.691	-1378	1995	-1909	-1.566	1.663	-3.236
15	568	-1.554	2.860	-1.117	-1988	2375	-4550	-2.367	1.498	-18.200
16	502	-1.592	2.998	-1.336	-1444	2081	-2283	-1.622	1.678	-2.686
17	535	-1.691	3.120	-0.935	-1843	2274	-3205	-2.220	1.819	-6.819
18	518	-1.926	3.713	-1.163	-1837	2689	-3053	-2.124	2.308	-5.760
19	547	-1.610	3.185	-1.052	-1939	2218	-3682	-2.394	1.803	-12.697
20	498	-1.795	3.557	-1.020	-1866	2609	-3913	-2.304	2.113	-14.229
21	555	-1.590	3.112	-0.973	-1595	2190	-2871	-1.899	1.864	-8.087
22	606	-1.139	2.230	-0.610	-1320	1262	-2774	-1.475	0.928	-14.995
23	302	-1.090	2.178	-0.855	-859	1271	-698	-0.838	0.974	-0.646
24	492	-1.377	2.718	-0.828	-1428	1822	-2719	-1.741	1.506	-8.632
25	454	-1.427	2.972	-1.178	-2085	2297	-5042	-3.418	1.891	-21.922
26	417	-1.601	3.019	-0.996	-1555	2102	-3352	-1.851	1.695	-11.971
27	427	-1.246	2.470	-0.633	-1159	1563	-2061	-1.302	1.276	-6.342
28	503	-1.585	3.080	-0.998	-1827	2205	-3205	-2.188	1.838	-9.862
29	559	-1.573	3.037	-1.122	-1908	2421	-4210	-2.245	2.052	-15.593

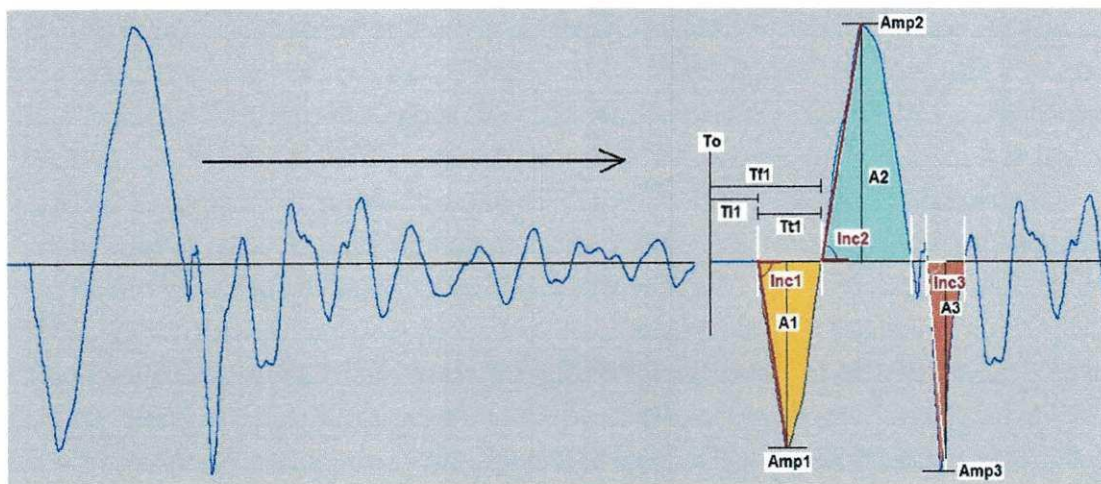


Figura 89 - Forma de onda típica capturada do microfone de eletreto no momento do impacto do bastão com a fruta (esquerda). São mostrados também os parâmetros relevantes que foram calculados das três primeiras ondas (direita).

Tabela 17 - Parâmetros calculados das ondas obtidas:
microfone de eletreto, 30°, primeira etapa

		Microfone 30°								
Manga	Peso	Áreas			Amplitudes			Inclinações		
		A1	A2	A3	Amp1	Amp2	Amp3	Inc1	Inc2	Inc3
N°	(g)	(ua)			(uam)			(uam/s) x 10 ⁻⁶		
1	552	-4.376	8.301	-2.508	-5561	6601	-7343	-7.618	6.317	-12.770
2	477	-4.810	8.906	-2.631	-6216	7436	-7038	-8.633	6.982	-14.218
3	819	-3.777	7.126	-2.430	-5196	5868	-7271	-6.223	5.433	-21.075
4	710	-4.792	8.928	-2.560	-6512	7167	-8131	-9.867	6.826	-15.943
5	550	-4.211	8.048	-2.131	-4550	6254	-5131	-5.833	5.900	-8.923
6	556	-4.143	7.794	-2.363	-5814	5872	-6358	-8.809	5.062	-11.666
7	493	-4.122	7.796	-2.345	-5520	6081	-6593	-7.667	4.589	-17.350
8	470	-5.283	9.704	-2.956	-6303	8913	-8726	-7.928	9.382	-23.907
9	478	-4.032	7.563	-2.527	-4815	5947	-4561	-5.836	5.456	-6.807
10	402	-4.143	7.933	-2.669	-6435	6255	-5452	-9.900	5.511	-8.865
11	508	-3.877	7.350	-2.779	-4917	5672	-7145	-6.690	4.890	-10.507
12	470	-3.613	6.812	-1.941	-3818	5287	-4418	-4.714	4.785	-7.184
13	610	-4.058	7.787	-2.805	-5170	6054	-8603	-6.422	5.965	-13.765
14	441	-4.019	7.487	-2.125	-4053	6102	-4188	-5.035	5.757	-6.922
15	568	-4.122	7.870	-2.632	-6141	6259	-8958	-7.725	6.047	-17.394
16	502	-3.919	7.309	-3.024	-3744	6143	-5932	-4.511	5.741	-8.016
17	535	-4.154	7.998	-2.219	-5262	6017	-6397	-7.626	4.932	-17.059
18	518	-4.684	8.703	-2.489	-5201	7152	-7398	-6.625	6.747	-20.268
19	547	-4.115	7.686	-2.741	-4830	6036	-9136	-6.440	5.694	-16.314
20	498	-4.523	8.392	-2.410	-5127	6914	-7688	-6.746	6.778	-17.879
21	555	-4.125	7.734	-2.310	-4486	6249	-6192	-5.751	5.410	-15.877
22	606	-2.768	5.198	-1.311	-3518	3389	-5782	-4.115	2.637	-26.893
23	302	-3.253	6.167	-2.646	-3129	4759	-2951	-3.556	4.033	-3.334
24	492	-3.750	7.235	-2.312	-4632	5607	-6932	-5.826	5.315	-18.735
25	454	-3.486	6.733	-2.497	-5358	5688	-9480	-8.712	5.496	-31.082
26	417	-3.687	7.030	-2.219	-4659	5513	-7705	-5.752	5.250	-20.276
27	427	-3.678	6.901	-2.031	-3864	5695	-6534	-4.600	5.018	-18.406
28	503	-3.974	7.504	-2.370	-5194	6148	-6752	-6.533	6.087	-18.005
29	559	-3.953	7.409	-2.452	-5076	5902	-7908	-6.385	5.542	-23.606

Os parâmetros calculados para as três primeiras ondas geraram as Tabelas 16 a 18. Todas as unidades são as mesmas do caso anterior. Nelas, os valores negativos são relativos às ondas cujos picos estão abaixo da linha média (tensão zero do conversor A/D). Pode-se observar, nestas três tabelas, a alta variabilidade dos parâmetros da terceira onda, devido à diversidade de formas desta onda que foram capturadas. Ocorreram muito baixas correlações ($r < 0,5$) entre os parâmetros extraídos das ondas 1 e 3 e os parâmetros de referência, exatamente devido às variabilidades de forma, principalmente no caso da onda 3. Optou-se, então, por realizar uma análise mais detalhada apenas da forma de onda 2, que tem maior semelhança com a curva única obtida do acelerômetro.

Tabela 18 - Parâmetros calculados das ondas obtidas:
microfone de eletreto, 45°, primeira etapa.

Manga	Peso	Microfone 45°								
		Áreas			Amplitudes			Inclinações		
		A1	A2	A3	Amp1	Amp2	Amp3	Inc1	Inc2	Inc3
N°	(g)	(ua)			(uam)			(uam/s) x 10 ⁻⁶		
1	552	-7.806	14.530	-4.053	-9837	12462	-11081	-14.053	12.588	-19.612
2	477	-8.323	15.203	-4.139	-11133	13222	-11233	-16.019	13.027	-22.693
3	819	-6.986	13.102	-3.814	-10035	11156	-11352	-12.389	11.384	-27.354
4	710	-8.690	15.678	-3.916	-11439	13397	-12837	-17.464	13.330	-26.468
5	550	-7.461	13.757	-3.561	-8082	11543	-8344	-11.071	11.543	-15.310
6	556	-7.385	13.576	-3.854	-11180	11336	-10294	-16.441	10.745	-18.382
7	493	-6.835	12.594	-3.477	-9304	10585	-9810	-12.323	9.756	-20.227
8	470	-9.776	17.225	-4.612	-12738	16678	-14327	-16.984	17.556	-30.811
9	478	-7.250	13.366	-4.169	-9056	11237	-7743	-11.391	11.293	-11.732
10	402	-7.518	13.901	-4.446	-12092	11777	-8690	-18.747	11.718	-13.578
11	508	-7.164	13.157	-4.440	-9386	10695	-10570	-12.858	10.434	-15.776
12	470	-6.788	12.739	-3.646	-8043	10528	-7045	-10.653	10.221	-11.272
13	610	-6.968	13.642	-4.488	-10034	11748	-12657	-16.054	11.867	-20.251
14	441	-7.360	13.723	-3.667	-8543	11930	-7666	-11.391	12.112	-15.332
15	568	-7.522	13.869	-4.327	-11437	12001	-12585	-15.148	12.061	-22.274
16	502	-7.322	13.399	-4.815	-7496	12027	-10626	-9.429	12.272	-14.966
17	535	-7.467	13.767	-3.472	-9270	11772	-10685	-13.836	11.772	-21.370
18	518	-8.407	15.329	-4.004	-9713	13422	-12542	-13.680	13.558	-27.871
19	547	-7.442	13.753	-3.946	-8502	11751	-13940	-12.060	11.464	-42.242
20	498	-7.934	14.372	-3.814	-9200	12524	-12174	-12.867	11.650	-27.986
21	555	-7.511	13.890	-3.881	-8791	12001	-9897	-12.042	11.216	-23.016
22	606	-4.864	9.227	-1.991	-6201	6797	-8829	-7.562	5.594	-41.065
23	302	-5.263	9.979	-3.996	-5386	8198	-5072	-6.489	7.626	-6.002
24	492	-6.732	12.617	-3.797	-8026	10777	-11200	-10.846	10.831	-30.270
25	454	-6.610	12.198	-3.650	-9785	10082	-12940	-13.134	10.236	-37.507
26	417	-6.699	12.428	-3.576	-8954	10461	-11910	-11.939	10.256	-33.083
27	427	-7.045	12.886	-3.560	-8017	10803	-10467	-9.959	10.488	-26.838
28	503	-7.355	13.738	-4.432	-10093	12120	-10747	-13.548	12.495	-17.334
29	559	-7.068	13.161	-3.584	-9809	10869	-11532	-13.166	10.708	-28.127

Um exemplo dos dois sinais (acelerômetro e microfone de eletreto), capturados simultaneamente, na mesma placa de som, em dois canais (estéreo), está apresentado na Figura 90.

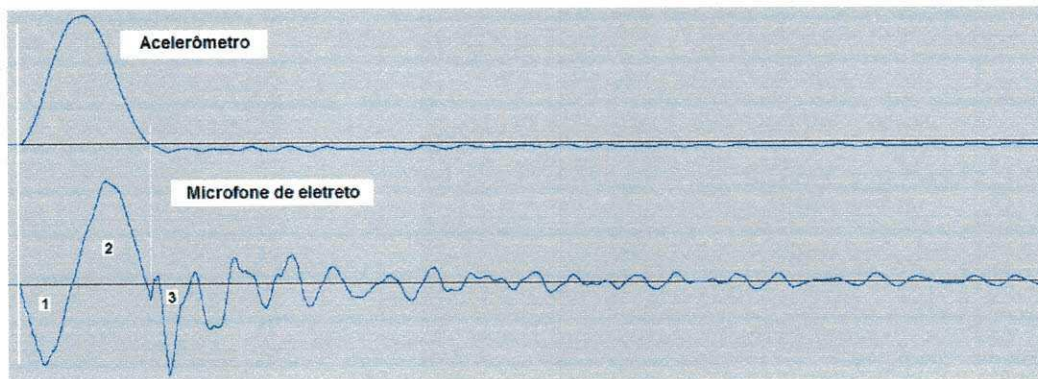


Figura 90 - Comparativo entre formas de onda típicas do acelerômetro e do microfone de eletreto, onde nota-se, nesta última, componentes de mais alta frequência.

Percebe-se claramente a semelhança entre a onda 2 do microfone e a curva (considerada onda única) do acelerômetro. As ondas 1 e 3 apresentaram uma variabilidade entre as amostras que não pode ser explicada, qualitativamente, apenas pela diferença de firmeza entre as frutas.

Já a forma de onda 2 apresentou, em uma análise qualitativa inicial, uma variabilidade entre as amostras compatível com a variabilidade das firmezas obtidas pelos métodos de referência, razão pela qual foi a onda escolhida para comparação com a onda do acelerômetro e para as análises quantitativas sobre possíveis correlações com os parâmetros destrutivos de referência.

Na Figura 91 são apresentadas as amplitudes das transformadas rápidas de Fourier de sinais típicos do acelerômetro e do microfone de eletreto, capturados simultaneamente para uma mesma fruta. No gráfico do microfone percebem-se claramente as componentes de alta frequência presentes neste sinal e ausentes no sinal do acelerômetro.

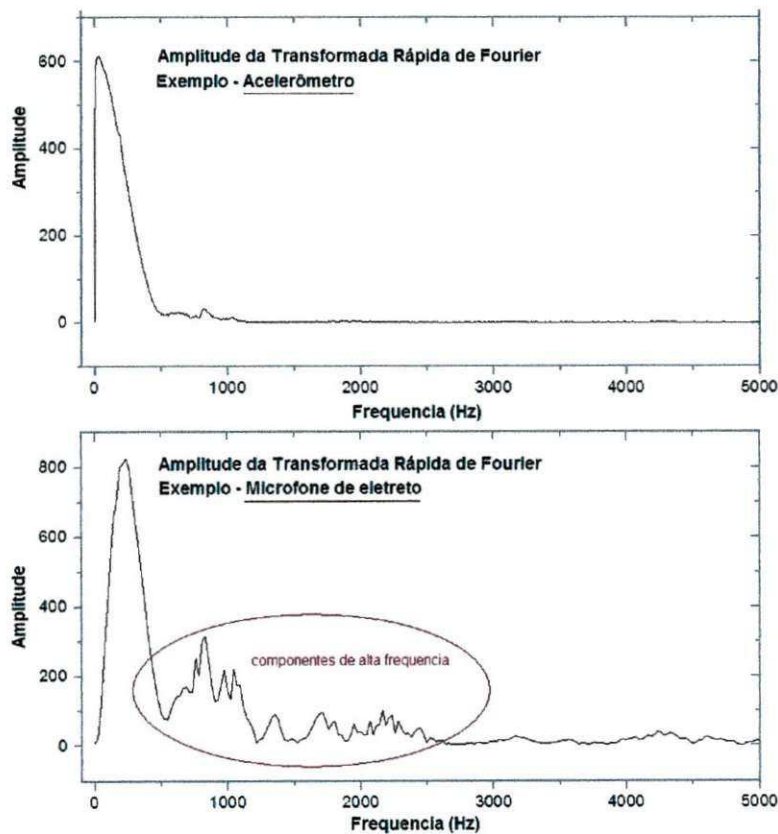


Figura 91 - Comparativo entre as amplitudes das transformadas rápidas de Fourier de sinais simultâneos do acelerômetro (superior) e microfone de eletreto (inferior), confirmando a existência de componentes de mais alta frequência neste último.

Assim, os sinais obtidos do microfone de eletreto podem conter mais informações sobre o impacto exatamente por este sensor ter uma banda passante maior do que a do acelerômetro utilizado.

Na Figura 92 é apresentada a correlação entre as amplitudes (alturas) da curva do acelerômetro e da onda 2 do microfone, para o ângulo de 45°. Estes resultados confirmam os experimentos realizados por SUPROCK et. al. (2010), que demonstraram a viabilidade de utilização do microfone de eletreto como acelerômetro, de uma maneira genérica, embora não nesta aplicação de estimativa de firmeza de frutas.

4.5.1.3. Parâmetro destrutivo de referência: cor da polpa - primeira etapa

Os resultados obtidos com as medidas de cor da polpa estão mostrados:

- na Tabela 19, onde estão listados os parâmetros *Tristimulus Values XYZ (D65/10°)* e *Color Plot L*a*b* (D65/10°)*; e
- na Tabela 20, onde estão listados os parâmetros *Colorimeter Color L*a*b* (C/10°)* e *Colorant Strenght L*a*b* (D65/10°)*.

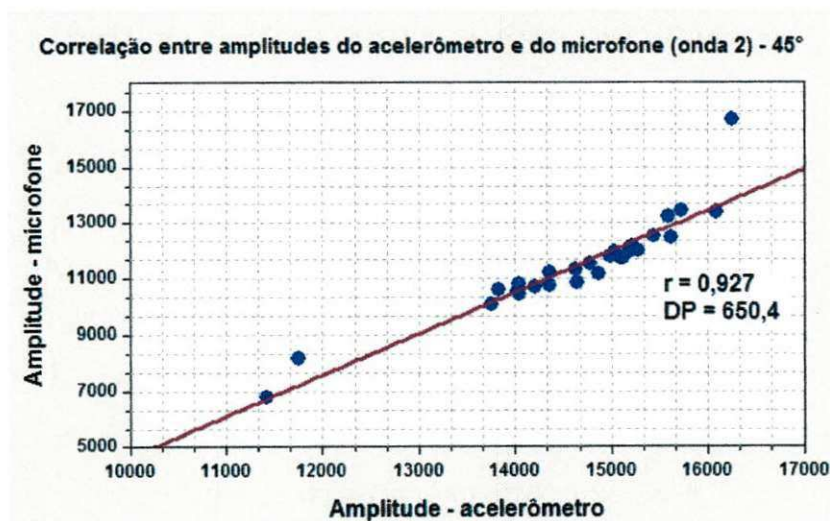


Figura 92 - Correlação entre amplitudes das curvas do acelerômetro e da onda 2 do microfone, para o ângulo de 45°, primeira etapa.

Quando da escolha entre os parâmetros fornecidos pelo colorímetro, foi levada em consideração a recomendação da Comissão Internacional de Iluminação (*CIE - Commission Internationale de l'Éclairage*), de utilização do espaço *CIELAB* (HUNTERLAB, 2008). Assim, os valores mostrados nas Tabelas 19 e 20 estão representados neste espaço.

Dos quatro parâmetros que foram capturados, neste trabalho, foi arbitrado como referência o $L^*a^*b^*$ *Color Plot (D65/10°)*, que é o *CIELAB* com iluminação D65 (iluminação equivalente à luz do dia, ao meio-dia) e ângulo de visão do observador de 10°.

Observam-se, nas Tabelas 19 e 20, que são pequenas as diferenças entre os valores de $L^*a^*b^*$ dos quatro parâmetros registrados, de modo que a escolha de um ou outro como um dos parâmetros destrutivos de referência possivelmente não traria resultados muito diversos quando das análises das correlações com os parâmetros obtidos pelos métodos não-destrutivos propostos (acelerômetro, microfone, velocidade do som na fruta). Esta hipótese foi comprovada posteriormente (Tabela 22).

4.5.1.4. Parâmetro destrutivo de referência: força de penetração - primeira etapa

Na Figura 93 são mostrados alguns registros gráficos das forças de penetração da polpa obtidos com o analisador de textura. Notam-se alterações significativas das forças ao longo da perfuração e na comparação entre os perfis dos gráficos dos dois lados de uma determinada fruta, devido às rupturas não uniformes das fibras ao longo do experimento. No entanto, as áreas totais sob os gráficos de uma mesma fruta são semelhantes e representam os trabalhos realizados nas perfurações.

Tabela 19 - Dados de cores (*Tristimulus Values XYZ D65/10°* e *Color Plot L*a*b** D65/10°) das polpas das frutas, coletados com o colorímetro mostrado na Figura 86.

Mangas Números Iniciais	Mangas Números Finais	Peso (g)	TRISTIMULUS VALUES (D65/10°)						COLOR PLOT (D65/10°)					
			LADO 1			LADO 2			LADO 1			LADO 2		
			X	Y	Z	X	Y	Z	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1*	-	413	49,90	45,22	5,67	50,64	45,57	6,30	72,71	19,54	76,26	73,10	20,99	75,97
2	1	552	57,61	55,79	11,37	57,05	54,97	11,13	79,50	12,52	66,87	79,02	12,50	70,20
3	2	477	53,15	50,09	8,75	54,62	51,40	8,89	76,57	15,26	72,98	77,12	16,04	74,53
4	3	819	57,68	56,16	13,56	57,23	55,05	11,93	79,39	11,45	64,79	79,06	12,6	67,66
5	4	710	58,20	56,94	14,95	60,32	59,53	16,52	80,14	10,40	62,31	81,37	9,61	61,16
6	5	550	55,79	52,68	10,46	56,82	55,10	12,65	78,25	15,32	69,95	79,81	10,84	66,84
7	6	556	38,22	33,69	3,74	52,80	48,83	8,64	69,36	18,99	74,46	75,38	17,57	71,29
8	7	493	58,84	57,73	15,46	59,29	58,37	15,52	80,47	10,13	62,13	81,28	9,80	61,37
9	8	470	59,11	57,27	13,39	57,41	54,68	11,69	80,51	11,61	66,66	78,94	13,78	68,52
10	9	478	55,38	52,27	9,47	55,09	52,11	9,48	77,91	14,73	72,71	76,36	16,02	69,93
11	10	402	55,13	51,91	10,58	56,48	53,37	9,33	78,49	13,90	70,39	77,94	15,17	72,70
12	11	508	55,03	52,21	8,56	54,71	51,91	9,99	77,31	14,18	74,83	77,31	14,29	70,28
13	12	470	53,51	50,47	7,86	52,44	48,75	7,72	75,34	15,96	74,57	76,24	15,75	75,60
14	13	610	55,00	50,68	8,80	55,92	52,80	8,68	77,45	17,22	74,24	76,41	16,94	78,20
15	14	441	59,27	58,35	13,59	58,73	58,26	14,59	79,94	10,78	65,44	81,13	8,37	63,94
16	15	568	58,60	57,31	14,40	58,35	57,09	14,28	80,40	10,41	64,19	80,77	9,30	65,47
17	16	502	54,23	51,08	8,36	53,83	50,47	8,55	77,66	14,14	76,56	76,77	15,57	73,13
18	17	535	57,47	55,03	11,45	57,00	54,31	10,28	78,14	14,57	67,99	78,26	14,63	71,56
19	18	518	56,02	53,34	11,49	60,82	58,69	12,90	78,26	13,33	68,13	80,89	12,80	68,37
20	19	547	56,79	54,42	11,96	58,13	56,27	11,89	78,67	13,12	67,20	78,31	14,02	68,55
21	20	498	54,73	51,81	9,56	56,20	53,54	10,71	77,10	14,69	71,43	78,05	13,87	69,80
22	21	555	57,14	55,41	12,37	57,96	56,12	12,27	79,91	10,77	68,27	79,48	12,07	67,72
23	22	606	55,23	52,06	9,34	52,00	48,13	8,11	77,52	14,89	73,06	74,93	17,27	71,89
24	23	302	53,27	49,78	8,56	52,92	49,58	7,91	75,34	17,07	70,38	75,66	16,09	74,30
25	24	492	56,66	54,85	11,38	60,03	59,49	14,53	78,62	12,05	70,08	80,95	9,61	65,28
26	25	454	54,74	51,66	9,66	53,54	49,35	7,08	76,91	15,46	71,92	77,61	14,45	72,95
27	26	417	52,62	49,26	9,18	52,81	48,71	7,89	76,32	15,17	74,18	76,41	16,71	75,28
28	27	427	55,77	53,67	9,98	55,83	53,63	10,82	78,84	11,98	72,56	78,84	11,93	70,13
29	28	503	54,56	51,51	9,60	59,52	57,97	13,15	77,06	14,88	70,63	80,17	11,79	66,81
30	29	559	57,73	55,36	12,08	55,38	52,98	11,71	80,66	11,72	69,37	78,93	12,19	66,71

Tabela 20 - Dados de cores (*Colorimeter Color L*a*b* C/10°* e *Colorant Strenght L*a*b** D65/10°) das polpas das frutas, coletados com o colorímetro mostrado na Figura 86.

Mangas Número s Iniciais	Mangas Número s Finais	Peso (g)	COLORIMETER COLOR (C/10°)						COLORANT STRENGHT (D65/10°)					
			LADO 1			LADO 2			LADO 1			LADO 2		
			L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1*	-	413	71,29	18,40	75,88	73,88	18,30	77,42	72,24	20,00	78,85	73,11	21,06	75,95
2	1	552	78,56	11,26	69,22	78,12	11,71	70,67	78,77	12,67	69,31	78,26	13,28	70,44
3	2	477	77,21	12,87	74,44	76,35	15,34	73,39	76,47	15,26	72,90	76,37	17,13	73,09
4	3	819	80,09	9,32	65,57	79,15	10,97	68,12	80,54	10,04	66,25	79,77	11,54	69,12
5	4	710	80,16	9,02	62,75	81,38	8,24	62,06	81,09	9,08	64,03	81,44	9,49	63,67
6	5	550	78,10	13,58	70,14	79,65	9,61	67,05	78,67	14,18	71,31	79,32	11,41	66,63
7	6	556	70,11	17,14	75,51	75,82	15,03	72,64	69,88	19,61	74,46	76,21	16,48	73,26
8	7	493	80,50	8,73	62,48	82,32	7,12	63,67	80,40	10,13	62,48	81,16	9,51	60,64
9	8	470	79,50	11,52	64,80	79,52	11,69	69,59	79,51	12,97	64,59	79,58	12,98	69,76
10	9	478	77,80	13,29	73,15	77,78	12,76	73,38	77,81	14,80	73,00	77,12	15,02	71,16
11	10	402	77,12	13,81	67,91	78,33	13,16	73,90	77,19	15,47	68,26	76,92	16,49	71,36
12	11	508	76,48	13,54	73,65	77,08	13,17	70,91	77,43	14,16	75,12	77,37	14,30	70,66
13	12	470	74,75	14,95	75,24	75,57	15,17	74,28	75,64	16,19	75,37	75,99	16,09	74,89
14	13	610	77,12	15,72	74,44	75,61	16,20	76,64	76,81	17,73	74,12	76,61	16,64	79,65
15	14	441	80,64	8,51	66,78	81,32	6,78	65,31	80,03	10,62	65,52	80,42	9,16	63,03
16	15	568	80,85	8,32	65,67	81,09	7,87	65,47	81,74	8,69	66,76	81,19	9,29	66,07
17	16	502	77,64	12,56	76,75	76,85	13,90	73,54	77,68	14,10	76,59	76,43	15,91	72,47
18	17	535	79,41	11,43	70,14	78,91	12,35	72,92	79,11	13,34	69,49	78,86	13,90	72,38
19	18	518	79,03	11,64	68,61	80,77	11,47	68,45	79,41	12,62	69,49	81,21	12,42	69,05
20	19	547	80,25	9,74	70,16	78,85	11,79	70,05	79,94	11,48	69,37	79,13	12,88	70,42
21	20	498	77,16	13,07	71,89	79,22	11,07	71,83	77,10	14,69	71,56	77,98	13,99	69,65
22	21	555	79,91	9,60	68,76	79,83	10,44	68,90	79,30	11,71	67,11	79,51	12,04	68,50
23	22	606	77,54	12,91	73,55	76,20	14,41	74,57	77,06	15,25	72,26	76,25	15,69	74,65
24	23	302	76,00	14,60	72,48	75,09	15,22	73,51	76,24	16,06	71,84	75,72	16,17	75,22
25	24	492	78,82	10,28	69,91	82,27	6,61	67,04	78,86	11,78	69,78	80,97	9,55	65,06
26	25	454	77,07	13,68	72,11	77,10	13,52	72,23	77,11	15,03	71,81	77,39	14,55	72,83
27	26	417	77,20	12,43	73,43	76,61	14,78	75,83	75,87	15,72	70,46	76,76	16,36	75,70
28	27	427	78,51	10,87	72,96	78,07	11,45	69,55	78,36	12,57	72,54	78,48	12,23	70,50
29	28	503	76,95	13,42	70,88	81,48	8,80	69,46	77,04	14,79	70,89	81,10	10,66	68,40
30	29	559	80,63	10,26	69,96	78,97	10,77	67,63	79,14	13,61	67,53	79,52	11,59	69,40

(*) A manga N° 1 foi retirada após constatação de que estava machucada, internamente.

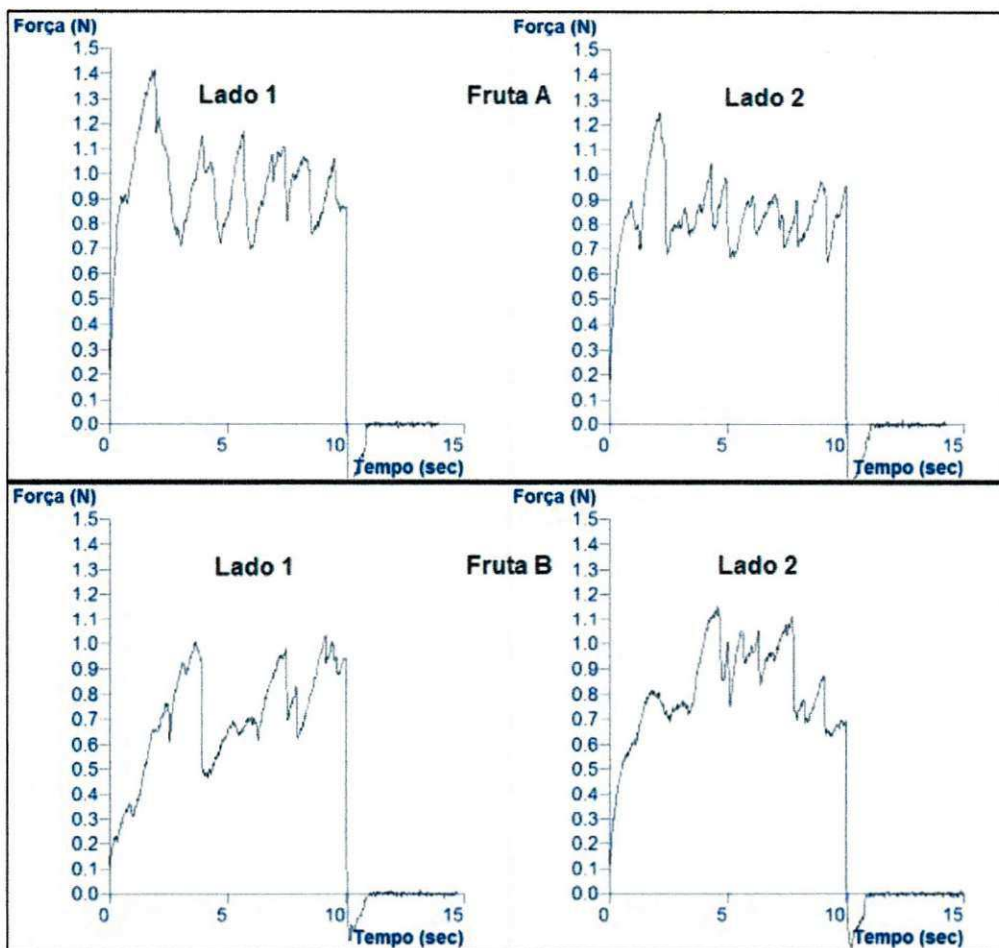


Figura 93 - Exemplos de registros gráficos de medição de firmeza com o analisador de textura. A linha superior contém registros dos dois lados de uma mesma fruta (A), enquanto a linha inferior contém registros de dois lados de outra fruta (B).

Na Figura 94 é apresentado um registro gráfico típico destas perfurações e os parâmetros que foram calculados:

- Coordenadas do primeiro pico: tempo (t) e força (F) de P2;
- Coordenadas do pico máximo: tempo (t) e força (F) de P3;
- Inclinação do início ao primeiro pico (Inc1-2)
- Inclinação do início ao pico máximo (Inc1-3);
- Área do início ao primeiro pico (A1-2);
- Área do início ao pico máximo (A1-3);
- Área total sob a curva (At).

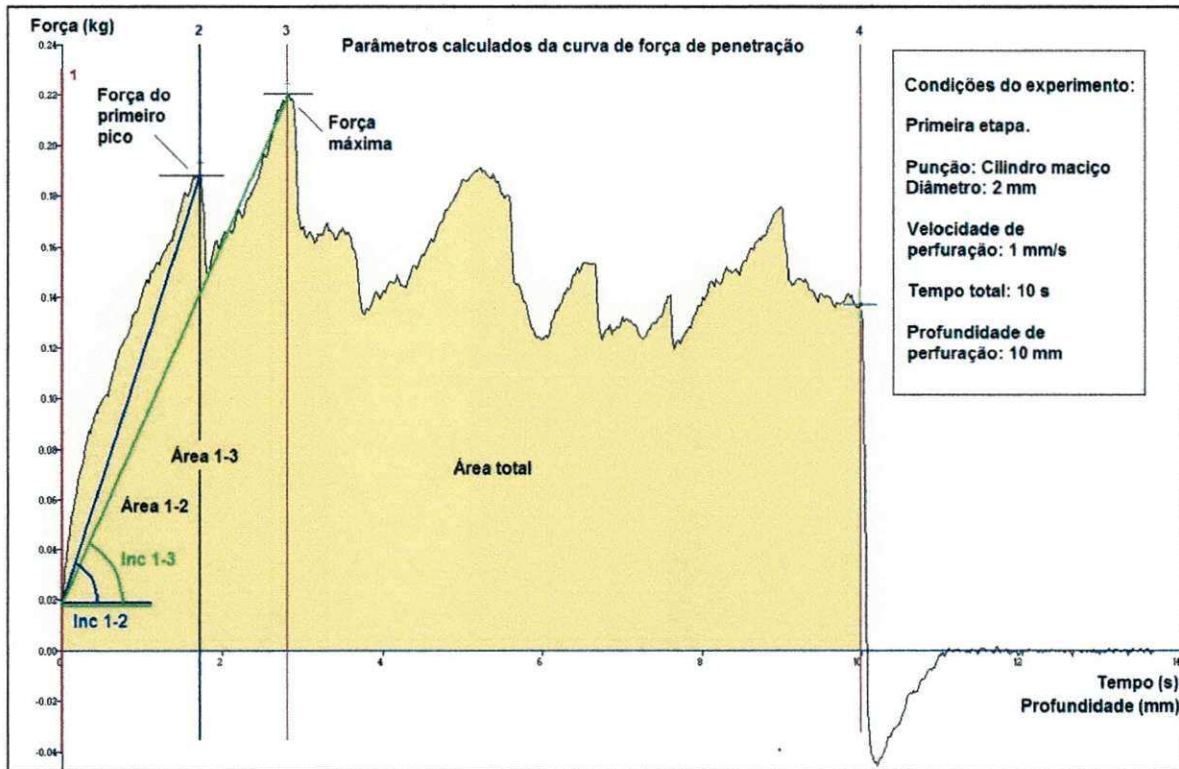


Figura 94 - Exemplo de registros gráficos de medição de firmeza com o analisador de textura, com indicação dos parâmetros calculados.

Na Tabela 21 são apresentados os resultados obtidos para um dos lados das 29 frutas testadas.

As análises iniciais dos dados mostraram alta variabilidade das posições (tempo) do primeiro pico e do pico máximo, o que influenciou diretamente a alta variabilidade também das inclinações. Assim, estes dois grupos de parâmetros (tempo dos picos e inclinações) não foram incluídos nas análises de correlação posteriores. Restaram as forças (amplitudes) dos picos (P2 e P3) e a área total (At), que foram analisados objetivando-se estabelecer correlações entre estes e os indicadores de cor da polpa ($L^*a^*b^*$), que formaram o outro parâmetro de referência.

Tabela 21 - Parâmetros relativos à firmeza, método destrutivo, calculados dos gráficos de força de penetração – primeira etapa.

Manga	Firmeza – Método Destrutivo – Primeira Etapa - Lado 1								
	Coordenadas		Coordenadas		Inclinações		Áreas		
	P2		P3		Inc1-2	Inc1-3	A1-2	A1-3	At
	t	F	t	F					
(s)	(kgf)	(s)	(kgf)						
1	0.480	0.093	1.920	0.144	0.150	0.066	0.032	0.194	0.973
2	0.900	0.037	3.640	0.103	0.023	0.024	0.024	0.213	0.709
3	1.060	0.126	2.480	0.196	0.105	0.073	0.093	0.315	1.223
4	1.720	0.189	2.820	0.220	0.098	0.070	0.212	0.412	1.500
5	2.320	0.107	7.520	0.136	0.039	0.016	0.139	0.559	0.764
6	2.480	0.047	7.060	0.085	0.015	0.011	0.054	0.298	0.456
7*	-	-	1.440	0.143	-	0.090	-	0.141	1.011
8	0.920	0.138	2.640	0.166	0.134	0.057	0.094	0.344	1.169
9	0.880	0.071	6.500	0.105	0.067	0.014	0.043	0.445	0.720
10	1.320	0.075	6.700	0.101	0.044	0.012	0.067	0.445	0.684
11	1.180	0.049	5.180	0.073	0.031	0.012	0.032	0.224	0.465
12	1.160	0.035	6.260	0.079	0.022	0.011	0.030	0.286	0.504
13	0.940	0.050	5.300	0.083	0.039	0.013	0.034	0.287	0.575
14	1.100	0.073	6.940	0.128	0.049	0.016	0.058	0.625	0.942
15	0.420	0.075	2.860	0.135	0.136	0.041	0.022	0.285	1.014
16	1.520	0.074	2.260	0.077	0.037	0.026	0.073	0.126	0.566
17	1.480	0.091	1.660	0.131	0.075	0.070	0.134	0.156	0.945
18	1.220	0.087	8.620	0.128	0.056	0.013	0.081	0.810	0.967
19	1.320	0.112	6.220	0.139	0.073	0.020	0.092	0.546	0.823
20	0.300	0.030	5.920	0.150	0.043	0.023	0.007	0.460	0.808
21	1.280	0.094	2.980	0.117	0.064	0.035	0.081	0.240	0.770
22	1.980	0.080	5.040	0.098	0.032	0.016	0.098	0.287	0.588
23	0.580	0.046	5.120	0.060	0.053	0.009	0.020	0.230	0.465
24	1.000	0.056	3.620	0.122	0.044	0.030	0.041	0.247	0.705
25	2.300	0.056	4.680	0.083	0.021	0.016	0.097	0.244	0.579
26	1.580	0.054	3.520	0.082	0.024	0.019	0.055	0.168	0.511
27	2.060	0.065	7.100	0.093	0.023	0.011	0.093	0.413	0.579
28	0.560	0.093	2.000	0.121	0.138	0.053	0.036	0.176	0.860
29	1.500	0.084	6.600	0.171	0.043	0.023	0.091	0.656	0.982

(*) Na manga 7 ocorreu somente um pico.

4.5.1.5. Correlações entre os parâmetros de referência - primeira etapa

Na Tabela 22 são apresentados os coeficientes de correlação entre os parâmetros de cor e os extraídos da curva de penetração, onde cada célula representa uma correlação linear (L) ou quadrática (Q). Pode-se observar que a melhor correlação ($r = 0.84$) foi encontrada entre o parâmetro b^* (que representa o eixo azul-amarelo do espaço *CIELAB*) e a área total da curva de penetração.

A partir das análises dos resultados obtidos nesta primeira etapa decidiu-se que a área total seria, então, o primeiro parâmetro destrutivo de referência para análises de correlações com os parâmetros obtidos das formas de onda do acelerômetro e do microfone, uma vez que esta área, que representa o trabalho realizado para penetrar a fruta a determinada profundidade, está mais diretamente relacionada às características mecânicas (firmeza, módulo de elasticidade) da fruta. Decidiu-se também que o parâmetro b^* da cor da polpa seria analisado numa fase posterior.

Tabela 22 - Coeficientes de correlação lineares e quadráticos entre parâmetros de referência – primeira etapa

Coeficientes de correlação lineares (L) e quadráticos (Q) entre parâmetros de referência					
Primeira Etapa					
Parâmetros de cor da polpa (média dos dois lados)	Indicador	L/Q	Amplitudes (forças)		Área total
			P2	P3	At
L^*	CP-D65/10°	L	0.60	0.69	0.76
		Q	0.64	0.73	0.80
	CC-C/10°	L	0.60	0.71	0.77
		Q	0.61	0.72	0.78
a^*	CP-D65/10°	L	0.55	0.67	0.71
		Q	0.55	0.67	0.71
	CC-C/10°	L	0.54	0.69	0.71
		Q	0.58	0.71	0.72
b^*	CP-D65/10°	L	0.73	0.80	0.84
		Q	0.75	0.80	0.84
	CC-C/10°	L	0.73	0.79	0.84
		Q	0.76	0.79	0.84
$L^*a^*b^*$	CP-D65/10°	L	0.59	0.71	0.75
		Q	0.60	0.72	0.75
	CC-C/10°	L	0.58	0.71	0.74
		Q	0.59	0.73	0.74

4.5.1.6. Correlação entre área total da curva de penetração e acelerômetro - primeira etapa

Na Tabela 23 são apresentados os coeficientes de correlação lineares (L) e quadráticos (Q) entre o parâmetro de referência (At = área total sob a curva de penetração) e os parâmetros extraídos das curvas do acelerômetro (A = área; Amp = amplitude; Inc = inclinação), como mostrado na Figura 88. Observam-se

muito baixas correlações entre a maioria dos parâmetros, com o melhor caso sendo relacionado à área da curva de impacto, 30° ($r = 0.73$, quadrático).

Estas baixas correlações começaram a evidenciar algum problema na metodologia utilizada para captura dos sinais, nesta primeira etapa. A análise continuou, estudando-se a correlação com os parâmetros do microfone de eletreto.

Tabela 23 - Coeficientes de correlação lineares e quadráticos entre parâmetro de referência e parâmetros extraídos da curva do acelerômetro– primeira etapa

Coeficientes de correlação lineares (L) e quadráticos (Q) entre parâmetro de referência (At) e parâmetros extraídos da curva do acelerômetro										
Primeira Etapa										
Parâmetro de referência (destrutivo)	L/Q	Parâmetros das curvas do acelerômetro (método não destrutivo)								
		15°			30°			45°		
		A	Amp	Inc	A	Amp	Inc	A	Amp	Inc
At	L	0.23	0.50	0.51	0.70	0.61	0.56	0.59	0.56	0.55
	Q	0.28	0.52	0.51	0.73	0.63	0.57	0.60	0.58	0.56

4.5.1.7. Correlação entre área total da curva de penetração e microfone de eletreto - primeira etapa

Na Tabela 24 são apresentados os coeficientes de correlação lineares (L) e quadráticos (Q) entre o parâmetro de referência, At (área total sob a curva de penetração) e os parâmetros extraídos das curvas do microfone de eletreto (A1, A2, A3 = áreas; Amp1, Amp2, Amp3 = amplitudes; e Inc1, Inc 2, Inc3 = inclinações das ondas que compõem o sinal do microfone), como mostrado na Figura 89. Observam-se, também como no caso anterior, muito baixas correlações entre a maioria dos parâmetros, com o melhor caso sendo relacionado à área da curva 2, 30° ($r = 0.57$, linear ou quadrático).

Além disso, a distribuição dos valores no gráfico de correlação de amplitudes entre acelerômetro e microfone (Figura 92) não foi tão uniforme quanto a distribuição dos valores na melhor correlação entre os parâmetros destrutivos de referência (At versus b^* , 45°, $r = 0,84$), discrepância esta que foi

considerada como mais um resultado da primeira etapa que contribuiu para a suspeita de que os apoios da fruta afetaram significativamente os valores obtidos, acima do que o inicialmente previsto.

Tabela 24 - Coeficientes de correlação lineares e quadráticos entre parâmetro de referência e parâmetros extraídos das ondas do microfone de eletreto – primeira etapa

Coeficientes de correlação lineares (L) e quadráticos (Q) entre parâmetro de referência (At) e parâmetros extraídos das ondas do microfone de eletreto										
Primeira Etapa										
Parâmetro de referência (destrutivo)	L/Q	Parâmetros das curvas do microfone de eletreto (método não destrutivo)								
		A1	A2	A3	Amp1	Amp2	Amp3	Inc1	Inc2	Inc3
At	15°									
	L	0.51	0.52	0.37	0.57	0.51	0.33	0.53	0.53	0.13
	Q	0.51	0.53	0.4	0.57	0.54	0.33	0.56	0.55	0.13
	30°									
	L	0.57	0.57	0.15	0.53	0.55	0.35	0.41	0.51	0.28
	Q	0.57	0.57	0.17	0.53	0.56	0.35	0.43	0.52	0.29
	45°									
	L	0.57	0.56	0.06	0.48	0.55	0.41	0.41	0.54	0.2
	Q	0.57	0.57	0.06	0.48	0.56	0.41	0.42	0.56	0.21

4.5.1.8. Resultados preliminares - primeira etapa

À luz dos resultados obtidos, naquele momento do trabalho, duas hipóteses foram consideradas:

- os sinais capturados do acelerômetro e do microfone realmente não possuíam boa correlação com os parâmetros destrutivos de referência; ou
- havia problema(s) com a metodologia utilizada para captura dos sinais, o que acabou comprometendo os resultados, tanto do acelerômetro quanto do microfone de eletreto.

Após diversos estudos investigativos sobre a questão, foi formulada nova hipótese, a de que o apoio metálico pesado (ferro maciço) colocado ao lado da fruta, juntamente com o suporte anelar, teriam alterado significativamente os

resultados. Como descrito anteriormente, neste mesmo capítulo, é evidente que a escolha inicial, de apoiar a fruta na barra metálica e no suporte anelar, evitando-se a movimentação da fruta quando do impacto e permitindo a captura, também, dos tempos entre impactos sucessivos (visando a obtenção do coeficiente de restituição), poderia ter efeitos colaterais indesejados. Isso interferiria no sinal de desaceleração do bastão e na firmeza aparente da fruta, uma vez que o bastão estaria impactando um sistema “fruta + apoio metálico” e não somente a fruta. No entanto, esperava-se que esta interferência fosse pequena, o que não comprometeria o resultado final.

Decidiu-se, assim, testar a segunda hipótese acima, refazendo-se completamente os experimentos, com a fruta livre (sem apoios), como mostrado na Figura 95, abandonando-se o cálculo do coeficiente de restituição em favor da possível melhoria das correlações dos sinais já obtidos. Isto motivou a realização da segunda etapa, descrita no item seguinte.

Os sinais dos outros sensores, DS1 (som do impacto do bastão com a fruta) e DS4 (velocidade do som na fruta) não foram analisados, uma vez que foi considerado que todo o processo da primeira etapa foi comprometido pela “fixação da fruta”. Por outro lado, todo o trabalho de definição das metodologias de cálculo e análise dos resultados pode ser aproveitado para a segunda etapa.

4.6. MATERIAIS E MÉTODOS – SEGUNDA ETAPA

Neste item são descritos os materiais e métodos da segunda etapa de experimentos, realizada após uma modificação no aparato experimental utilizado (Figura 95). Nesta nova etapa, a fruta foi apenas colocada sobre a base metálica, permanecendo em seu estado de repouso natural, sem o apoio anelar inferior nem o apoio de ferro maciço lateral. Quando dos impactos do bastão, as frutas passaram a sofrer pequenas movimentações (balanços) laterais para a direita. Esta configuração teve a vantagem de simular uma situação real em uma esteira transportadora, onde o impacto de um pêndulo em repouso com uma fruta em movimento provocaria movimentação semelhante.

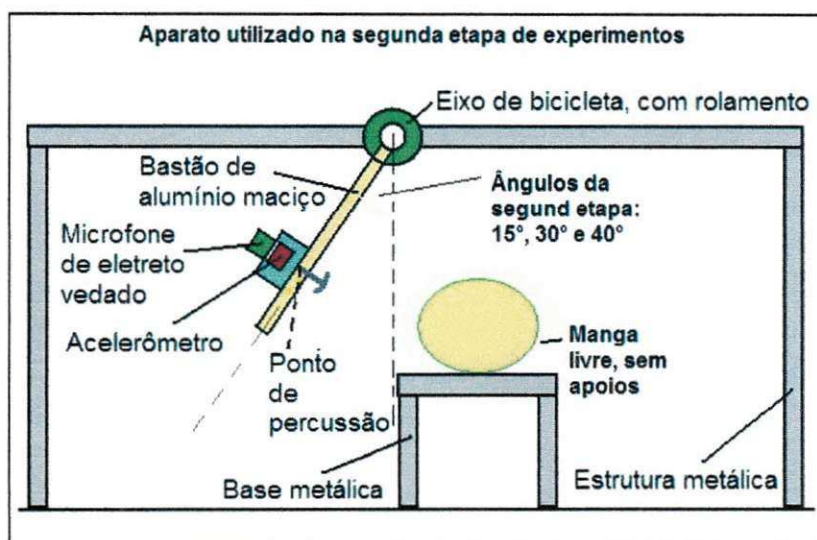


Figura 95 - Aparato utilizado na segunda etapa de experimentos.

4.6.1. Acelerômetro, microfone, FACS1 e placas de som – segunda etapa

Nesta segunda etapa dos experimentos, o acelerômetro, o microfone, a placa FACS1 e os *notebooks* (com placas de som) foram exatamente os mesmos descritos na primeira etapa.

4.6.2. Dispositivo Sensor 1 (DS1): microfone de eletreto capturando som do impacto

Nesta etapa, DS1 não foi utilizado, uma vez que passou a existir movimentação da fruta quando do impacto do bastão, provocando variação não controlada da distância da fruta ao microfone naquele momento. Isto inviabilizou a captura do som no presente trabalho, embora a técnica possa ser utilizada após a realização de maiores estudos sobre a influência desta movimentação no sinal capturado.

4.6.3. Dispositivo Sensor 2 (DS2): acelerômetro *MEMS* – segunda etapa

O DS2 da segunda etapa foi exatamente o mesmo DS2 da primeira etapa.

4.6.4. Dispositivo Sensor 3 (DS3): microfone de eletreto como acelerômetro – segunda etapa

O DS3 da segunda etapa foi exatamente o mesmo DS3 da primeira etapa.

4.6.5. Dispositivos Sensores 4 (DS4): microfones de eletreto acoplados à fruta

Nesta etapa, DS4 não foi utilizado, uma vez que com a movimentação da fruta quando do impacto, não foi mais possível manter os sensores adequadamente presos à fruta, ocorrendo alterações significativas dos sinais capturados. Isto inviabilizou a captura da velocidade do som na fruta, no presente trabalho.

4.6.6. Métodos de referência do estágio de maturação da fruta

4.6.6.1. Cor da Polpa

A metodologia de medição da cor da polpa foi a mesma da primeira etapa.

4.6.6.2. Metodologia de medição de firmeza com o texturômetro

A metodologia de medição de firmeza com o texturômetro, nesta segunda etapa, sofreu algumas alterações em relação à primeira etapa. Observaram-se, naqueles primeiros experimentos, grandes variações de força (grandes picos e vales) ao longo da penetração do punção cilíndrico de 2 mm. Este fato possivelmente tem relação com o pequeno diâmetro do punção em relação às dimensões das fibras das polpas, provocando este efeito de ruptura periódica. Na tentativa de minimizar estas variações, foi utilizado um punção cilíndrico de 6 mm de diâmetro.

Outra modificação foi a inclusão de mais dois outros registros, as forças de compressão da fruta inteira (não descascada) até as profundidades de 2 mm e 4 mm, ambos realizados com uma ponta de prova chata plana, de 35 mm de diâmetro. Estes registros foram realizados antes do corte para o registro da força de perfuração.

Os parâmetros e condições do experimento desta segunda etapa estão descritos na Tabela 25.

Tabela 25 - Parâmetros e condições do experimento de medição de firmeza com o analisador de textura – segunda etapa

Parâmetros e condições do experimento de medição de firmeza com o analisador de textura – segunda etapa			
Equipamento	Analisador de Textura		
Marca	Stable Microsystems		
Modelo	TA-XT2		
Experimento	1	2	3
Tipo de teste	Compressão	Compressão	Perfuração
Ponta de prova	Cilíndrica plana		Punção cilíndrico (ponta plana)
Material da ponta de prova	Alumínio		Aço inox
Diâmetro da ponta de prova	35 mm		6 mm
Velocidade antes do toque na fruta	10 mm/s		
Velocidade durante o experimento	0,5 mm/s		1 mm/s
Tempo	4 s	8 s	10 s
Profundidade	2 mm	4 mm	10 mm
Data de realização	23/04/2011		
Temperatura ambiente	24 °C		
Local	LAPPA/UFCG		
Cidade	C. Grande (PB)		

4.6.7. Espectro de Resposta ao Choque (*SRS - Shock Response Spectrum*)

Nesta segunda etapa, além dos parâmetros dimensionais **Tt**, **Amp**, **A** e **Inc**, foram incluídos novos parâmetros calculados a partir das formas de onda tanto do acelerômetro quanto do microfone de eletreto.

Estes parâmetros são do Espectro de Resposta ao Choque - ERC (*Shock Response Spectrum* ou *SRS*, em inglês), que é uma técnica de análise, no domínio da frequência, de sinais de aceleração em função do tempo decorrentes

de choques mecânicos. Esta técnica, diferentemente da transformada rápida de Fourier, é especialmente adequada para análise de sinais não-estacionários transitórios, como os ocorridos em um choque entre dois objetos ou em explosões.

De acordo com DLIENGINEERING (2009):

A primeira divisão natural de todos os sinais é nas categorias estacionários ou não-estacionários. Sinais estacionários tem seus parâmetros estatísticos constantes ao longo do tempo. Se você olhar para um sinal estacionário por alguns instantes, depois esperar uma hora e observá-lo novamente, ele será essencialmente o mesmo, ou seja, seu nível global será quase o mesmo e sua distribuição de amplitude e desvio padrão será aproximadamente a mesma. Máquinas rotativas em geral produzem vibrações estacionárias. Sinais não-estacionários são divididos em contínuos e transitórios. Exemplos de sinais não-estacionários contínuos são uma vibração produzida por uma britadeira e o som durante uma queima de fogos de artifício. Sinais transitórios são definidos como sinais que começam e terminam no nível zero, em uma quantidade finita de tempo. Eles podem ser muito curtos ou bastante longos. Exemplos de sinais transitórios são um golpe de martelo, um ruído de uma turbina de avião ou a assinatura de vibração de um motor ao ser ligado ou desligado.

Assim, pode-se aplicar a ERC para a análise dos sinais capturados dos sensores DS2 e DS3, uma vez que representam um choque entre o bastão e a fruta, onde há a geração de sinais de aceleração não-estacionários transitórios, uma condição ótima para a aplicação da ERC, em contraposição à transformada rápida de Fourier, que tem melhor aplicação na análise de sinais estacionários.

Exemplos dos resultados da aplicação do ERC a sinais típicos do acelerômetro e do microfone de eletreto estão mostrados nas Figuras 96 e 97, respectivamente. Os parâmetros relevantes para o presente trabalho, extraídos da aplicação desta técnica aos sinais dos sensores propostos, são:

- as amplitudes máximas (picos) dos espectros positivo e negativo do ERC (o ERC é simétrico), denominadas **Amp+** e **Amp-**;
- as frequências onde ocorreram as amplitudes máximas, denominadas **Freq+** e **Freq-**.

O código *Matlab®* para cálculo do ERC está listado no Anexo 4.1. Foi desenvolvido por Tom Irvine (IRVINE, 2006) e está disponível gratuitamente no endereço de internet citado nesta referência.

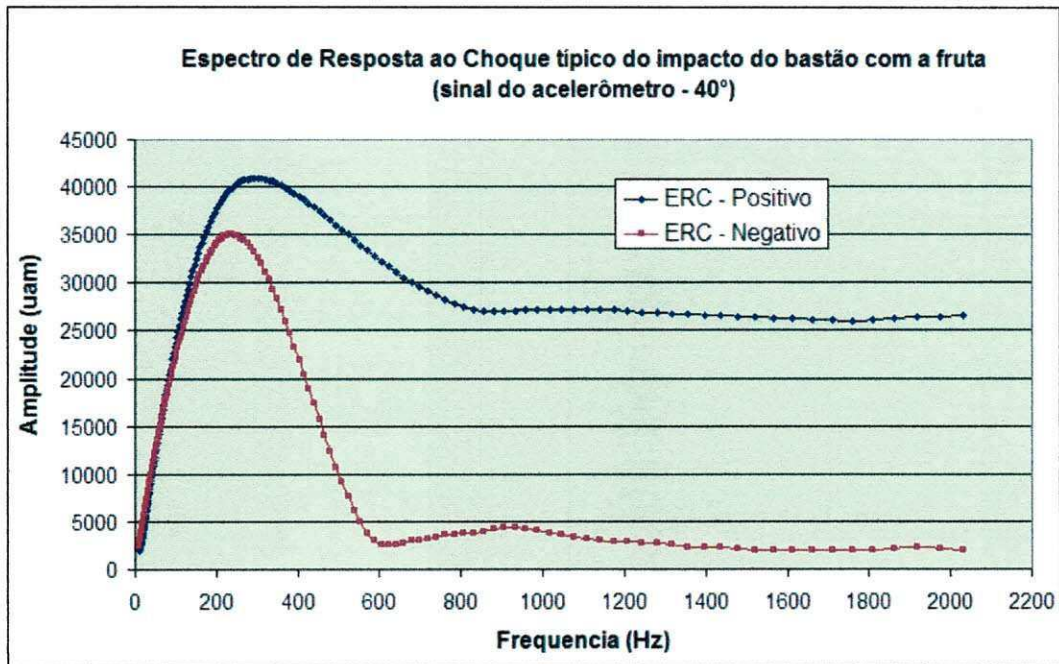


Figura 96 - Espectro de resposta ao choque de um sinal típico do acelerômetro (segunda etapa de experimentos).

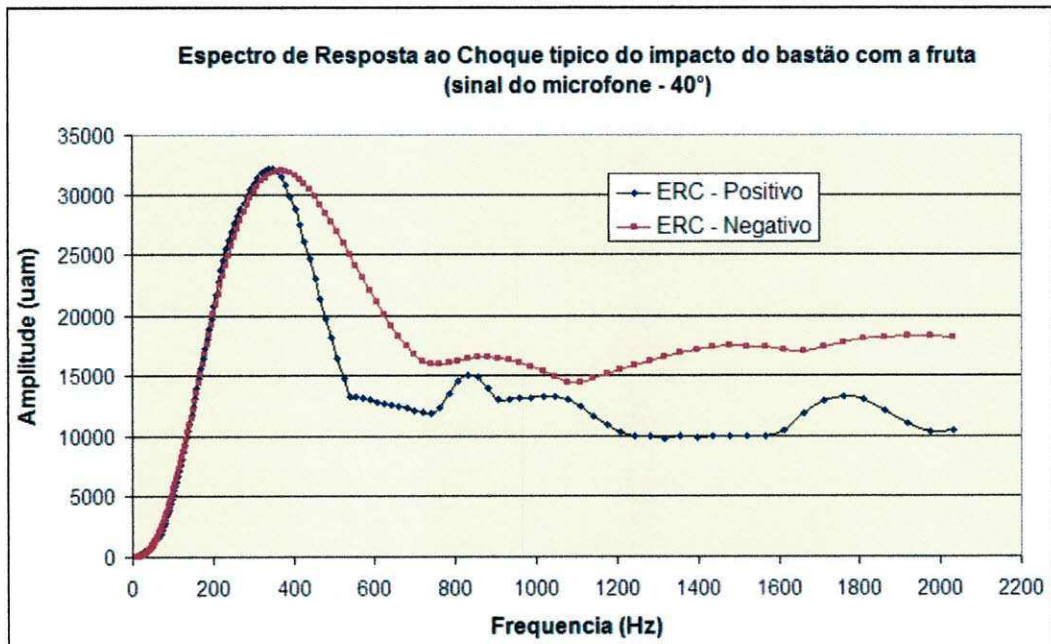


Figura 97 - Espectro de resposta ao choque de um sinal típico do microfone (segunda etapa de experimentos).

4.7. RESULTADOS E DISCUSSÃO – SEGUNDA ETAPA

Os resultados descritos neste item referem-se aos experimentos realizados com o aparato descrito na Figura 95, onde a fruta esteve em repouso, livre sobre uma base metálica. Os parâmetros calculados foram **Tt**, **Amp**, **A**, **Inc** (dimensionais), **Amp+**, **Amp-**, **Freq+** e **Freq-** (do ERC).

Diferentemente da situação da primeira etapa, nestes novos experimentos, quando do impacto do bastão, as frutas movimentaram-se lateralmente, comprometendo os tempos entre impactos sucessivos e inviabilizando o cálculo do coeficiente de restituição do impacto.

O registro do som do impacto também foi inviabilizado uma vez que, com a movimentação, a distância entre a fruta e o microfone sofreu variação durante o impacto, influenciando de maneira não controlada a amplitude e fase do sinal de áudio capturado.

O registro da velocidade do som na fruta, com microfones de eletreto embutidos em duas ventosas presas na fruta, como descrito na primeira fase, também ficou inviabilizado, pela mesma razão, a movimentação da fruta no impacto. Assim, os experimentos desta segunda etapa foram focados nos registros dos sinais do acelerômetro e do microfone de eletreto presos no bastão, ou seja, dos sensores DS2 e DS3 descritos anteriormente.

Outra diferença em relação à primeira etapa foi a pequena redução no terceiro ângulo de impacto, de 45° para 40°, motivada pela necessidade de se manter os sinais capturados simultaneamente (em entrada estéreo) em níveis que não provocassem saturação em nenhum dos canais de entrada.

De posse dos dados analisados da primeira etapa, foi possível a definição de novos parâmetros de referência combinados entre a cor da polpa e as forças de penetração da fruta. Assim, foram estudadas as correlações dos sinais de DS2 e DS3 com 11 parâmetros de referência:

- Produto L^*a^*b , definido como **cor total da polpa**;
- **Tom amarelado (TA) da polpa**, calculado com base na fórmula padrão descrita no Anexo 4.2 deste trabalho, que é função de L^* , a^* e b^* (HUNTERLAB, 2008a);
- **FC4mm**, a força máxima de compressão para a profundidade de 4 mm;
- **FC2mm**, a força máxima de compressão para a profundidade de 2 mm;
- **FPerf**, a força máxima de perfuração da polpa com um punção de 6 mm, até a profundidade de 10 mm da polpa;
- $L^*a^*b/FC4mm$, $L^*a^*b/FC2mm$ e $L^*a^*b/FPerf$;
- $TA/FC4mm$, $TA/FC2mm$ e $TA/FPerf$;

Foram calculados 18 parâmetros das formas de onda obtidas, a saber:

- Áreas dos lados 1 e 2 - **A1, A2**;
- Área média – **Am**;
- Tempo total dos lados 1 e 2 - **Tt1, Tt2**
- Tempo médio – **Tm**;
- Amplitudes dos lados 1 e 2- **Amp1, Amp2**;
- Amplitude média – **Ampm**;
- Inclinações dos lados 1 e 2- **Inc1, Inc2**;
- Inclinação média – **Incm**;
- Amplitudes do ERC+ dos lados 1 e 2 - **Amp+1, Amp+2**;
- Amplitude do ERC+ média - **A+m**;
- Amplitude do ERC- dos lados 1 e 2 - **Amp-1; Amp-2**
- Amplitude do ERC- média - **A-m**.

4.7.1. Desempenho dos parâmetros de referência combinados

Nas Tabelas 26 a 28 são mostrados os parâmetros calculados dos sinais capturados do acelerômetro, para os ângulos de 15°, 30° e 40°, respectivamente. As amplitudes e as inclinações são os parâmetros normalmente utilizados para comparações com as referências, em estudos semelhantes. No presente estudo, também tiveram bons desempenhos, no entanto, os resultados,

quando comparados com as referências isoladas, ou seja, somente com a cor da polpa ou somente com a força de penetração, apresentaram problemas de heterocedasticidade. Exemplos de heterocedasticidades das amplitudes médias com relação a $L^*a^*b^*$ e a FC4mm (valores normalizados pelo máximo) são mostrados na Figura 98. Estes problemas reduzem o desempenho das estimativas e é mais grave na comparação com a referência FC4mm, porque ocorre exatamente na região mais importante para uma proposta de classificação não-destrutiva em galpões de processamento, que é a região de maior firmeza das frutas, correspondente aos valores mais altos na curva normalizada. Este fenômeno também foi relatado em trabalhos anteriores.

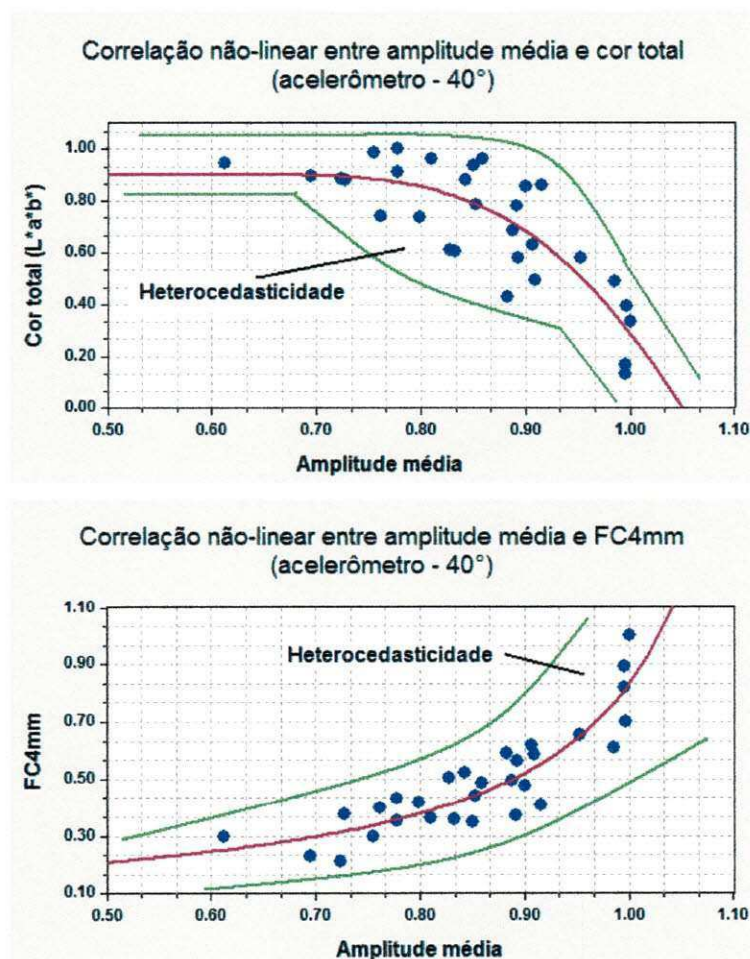


Figura 98 - Heterocedasticidades observadas nos gráficos de amplitude x cor e amplitude x FC4mm, do acelerômetro (superior) e microfone (inferior).

Por outro lado, embora as correlações obtidas para amplitudes e inclinações sejam semelhantes às obtidas para o parâmetro combinado

TA/FC4mm, este, além de melhorar a correlação, também reduz significativamente a heterocedasticidade. Isto porque a cor total reduz com o aumento da firmeza, enquanto que a força de compressão aumenta com o aumento da firmeza, fazendo com que haja uma “compensação” das heterocedasticidades isoladas quando se usa o parâmetro combinado. Em outras palavras, com a utilização da referência “cor/força” ocorre uma maior uniformização da distribuição dos resíduos, reduzindo-se a heterocedasticidade, além do aumento da correlação (Figura 99).

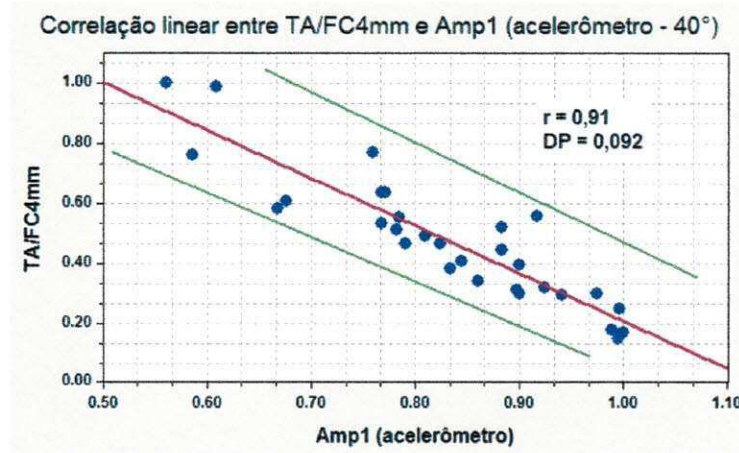


Figura 99 - A correlação da amplitude com o parâmetro combinado TA/FC4mm é maior e reduz as heterocedasticidades das correlações com os parâmetros “cor” ou “força de penetração” isolados, além de linearizar a resposta. Valores normalizados pelo máximo.

4.7.2. Resultados do acelerômetro – segunda etapa

A partir da análise das Tabelas 30 a 32 fica evidente que o melhor desempenho desta metodologia de estimativa não-destrutiva de firmeza de mangas ocorreu com o maior ângulo de impacto, 40°. Observam-se correlações crescentes do menor para o maior ângulo, sendo que as melhores correlações entre os parâmetros testados foram as obtidas entre TA/FC4mm e as amplitudes do ERC (positivas e negativas), sendo a máxima $r = -0,90$ (lado 1).

Acelerômetro - 15° (Segunda etapa)																									
Manga	Parâmetros dimensionais da forma de onda												Espectro de Resposta ao Choque (Shock Response Spectrum)												
	Área			Tempo total (Tt)			Amplitude (Amp)			Inclinação (Inc) x 10 ⁵			Freq +			Amplitude +			Freq -			Amplitude -			
	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	
Nº	Peso (g)	(ua)			(s)			(uam)			(uam/s)			(Hz)			(uam)			(Hz)			(uam)		
1	389	15.22	16.63	15.92	0.00431	0.00368	0.00400	6602	8317	7459.5	1.53	2.26	1.90	219.8	254.0	236.9	10446.8	13273.8	11860.3	174.5	201.6	188.0	8994.2	11374.3	10184.3
2	460	15.21	16.17	15.69	0.00391	0.00361	0.00376	6757	7960	7358.5	1.73	2.20	1.97	239.7	254.0	246.9	11102.4	12797.2	11949.8	184.9	213.6	199.2	9533.0	10869.5	10201.2
3	464	14.92	15.87	15.40	0.00374	0.00352	0.00363	6897	7867	7392.0	1.84	2.23	2.04	246.8	261.4	254.1	11283.7	12835.0	12059.3	190.3	201.6	195.9	9769.6	11006.4	10388.0
4	415	15.97	16.31	16.14	0.00402	0.00420	0.00411	6874	6928	6901.0	1.71	1.65	1.68	232.9	226.3	229.6	11322.0	11334.6	11328.3	184.9	179.6	182.2	9452.6	9257.9	9355.3
5	430	16.59	16.09	16.34	0.00360	0.00354	0.00357	8104	8099	8101.5	2.25	2.29	2.27	254.0	269.1	261.5	13120.9	13194.6	13157.7	195.9	207.5	201.7	11303.1	11302.2	11302.6
6	355	14.24	15.18	14.71	0.00525	0.00421	0.00473	4914	6727	5820.5	0.94	1.60	1.27	179.6	226.3	202.9	7902.6	10704.8	9303.7	146.7	184.9	165.8	6411.8	8839.8	7625.8
7	538	15.25	15.85	15.55	0.00415	0.00425	0.00420	6427	6460	6443.5	1.55	1.52	1.53	219.8	213.6	216.7	10463.3	10535.1	10499.2	174.5	164.7	169.6	9074.3	9087.5	9080.9
8	400	16.42	13.55	14.99	0.00374	0.00406	0.00390	7798	5953	6875.5	2.09	1.47	1.78	246.8	226.3	236.5	12639.8	9601.1	11120.5	195.9	179.6	187.7	10866.9	8285.9	9576.4
9	447	14.91	16.42	15.66	0.00499	0.00349	0.00424	5256	8203	6729.5	1.05	2.35	1.70	190.3	269.1	229.7	8568.0	13453.3	11010.7	146.7	207.5	177.1	7199.1	11548.8	9373.9
10	546	16.00	15.73	15.87	0.00348	0.00336	0.00342	8222	8187	8204.5	2.36	2.44	2.40	269.1	277.0	273.0	13348.2	13352.1	13350.2	207.5	213.6	210.5	11487.9	11474.6	11481.2
11	434	15.59	14.87	15.23	0.00379	0.00399	0.00389	7259	6744	7001.5	1.92	1.69	1.80	246.8	232.9	239.8	11831.6	10824.1	11327.8	190.3	184.9	187.6	10168.1	9325.8	9746.9
12	405	17.29	16.62	16.95	0.00365	0.00349	0.00357	8498	8593	8545.5	2.33	2.46	2.40	254.0	269.1	261.5	13737.6	13914.2	13825.9	201.6	207.5	204.5	11837.8	12000.6	11919.2
13	368	16.86	16.13	16.50	0.00354	0.00373	0.00364	8517	7810	8163.5	2.41	2.09	2.25	261.4	254.0	257.7	13817.2	12651.6	13234.4	207.5	195.9	201.7	11867.8	10829.6	11348.7
14	352	13.87	15.06	14.47	0.00496	0.00389	0.00442	4814	6709	5761.5	0.97	1.72	1.35	184.9	232.9	208.9	7861.9	10987.5	9424.7	138.5	184.9	161.7	6864.5	9510.2	8187.4
15	427	16.08	15.93	16.00	0.00431	0.00383	0.00407	6762	7644	7203.0	1.57	2.00	1.78	219.8	246.8	233.3	10888.0	12284.7	11586.4	169.5	195.9	182.7	9454.5	10573.1	10013.8
16	616	16.91	16.97	16.94	0.00313	0.00317	0.00315	9420	9505	9462.5	3.01	3.00	3.00	293.4	293.4	293.4	15408.2	15510.7	15459.4	226.3	232.9	229.6	13252.8	13339.4	13296.1
17	396	15.26	15.61	15.44	0.00537	0.00480	0.00509	4935	5793	5364.0	0.92	1.21	1.06	169.5	195.9	182.7	8088.5	9411.9	8750.2	127.0	146.7	136.9	6993.3	8092.9	7543.1
18	377	15.44	16.76	16.10	0.00487	0.00401	0.00444	5590	7478	6534.0	1.15	1.86	1.51	190.3	232.9	211.6	9030.7	12164.4	10597.5	142.5	184.9	163.7	7803.5	10430.0	9116.8
19	415	15.57	15.41	15.49	0.00435	0.00446	0.00441	6492	6303	6397.5	1.49	1.41	1.45	213.6	207.5	210.5	10402.3	10084.9	10243.6	164.7	160.0	162.3	8961.3	8657.4	8809.4
20	394	15.86	15.86	15.86	0.00398	0.00368	0.00383	6955	7443	7199.0	1.75	2.02	1.89	232.9	254.0	243.4	11360.2	12206.2	11783.2	179.6	195.9	187.7	9773.3	10481.8	10127.5
21	359	15.77	16.72	16.25	0.00443	0.00367	0.00405	6380	8308	7344.0	1.44	2.26	1.85	207.5	261.4	234.5	10316.5	13433.0	11874.8	160.0	201.6	180.8	8826.3	11490.8	10158.6
22	418	16.40	15.93	16.16	0.00376	0.00337	0.00357	7746	8445	8095.5	2.06	2.51	2.28	246.8	285.1	265.9	12579.8	13842.8	13211.3	195.9	219.8	207.8	10817.1	11889.9	11353.5
23	659	17.26	17.40	17.33	0.00421	0.00367	0.00394	7182	8393	7787.5	1.71	2.29	2.00	219.8	254.0	236.9	11716.6	13661.2	12688.9	169.5	195.9	182.7	10148.7	11748.5	10948.6
24	724	17.39	16.67	17.03	0.00353	0.00372	0.00362	8762	8307	8534.5	2.48	2.23	2.36	261.4	254.0	257.7	14130.7	13265.2	13697.9	207.5	201.6	204.5	12173.8	11489.3	11831.5
25	546	15.96	15.44	15.70	0.00372	0.00388	0.00380	7584	7182	7383.0	2.04	1.85	1.94	246.8	239.7	243.2	12269.2	11622.7	11945.9	195.9	190.3	193.1	10593.6	10012.6	10303.1
26	463	17.04	16.01	16.52	0.00405	0.00382	0.00393	7676	7493	7584.5	1.90	1.96	1.93	232.9	246.8	239.8	12439.2	12198.3	12318.7	184.9	195.9	190.4	10679.3	10464.5	10571.9
27	325	16.36	16.55	16.45	0.00395	0.00380	0.00388	7576	7965	7770.5	1.92	2.10	2.01	239.7	277.0	258.4	12166.8	12042.5	12104.7	190.3	207.5	198.9	10510.5	9122.6	9816.5
28	461	15.53	15.73	15.63	0.00467	0.00446	0.00457	6002	6238	6120.0	1.29	1.40	1.34	195.9	207.5	201.7	9597.7	10125.8	9861.8	155.5	160.0	157.7	8307.3	8729.1	8518.2
29	462	16.07	17.10	16.58	0.00354	0.00310	0.00332	8089	10012	9050.5	2.29	3.23	2.76	261.4	310.9	286.2	13097.4	16226.3	14661.9	201.6	239.7	220.7	11298.0	13877.4	12587.7
30	413	14.66	15.56	15.11	0.00440	0.00381	0.00411	5957	7299	6628.0	1.35	1.92	1.63	213.6	246.8	230.2	9596.5	11786.2	10691.3	160.0	190.3	175.1	8240.0	10177.2	9208.6

Tabela 26 - Parâmetros obtidos das curvas do acelerômetro – 15°, segunda etapa

Acelerômetro - 30° (Segunda etapa)																									
Manga	Parâmetros dimensionais da forma de onda												Espectro de Resposta ao Choque (Shock Response Spectrum)												
	Área			Tempo total (Tt)			Amplitude (Amp)			Inclinação (Inc) x 10 ⁶			Freq +			Amplitude +			Freq -			Amplitude -			
	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	
Nº	Peso (g)	(ua)			(s)			(uam)			(uam/s)			(Hz)			(uam)			(Hz)			(uam)		
1	389	31.70	32.86	32.28	0.00358	0.00324	0.00341	17165	19162	18163.5	4.79	5.91	5.35	269.1	302.0	285.6	27061.5	30617.0	28839.2	213.6	232.9	223.2	23183.9	26223.8	24703.9
2	460	29.85	30.89	30.37	0.00365	0.00322	0.00343	14534	17241	15887.5	3.98	5.35	4.67	261.4	293.4	277.4	23848.5	27932.4	25890.5	195.9	226.3	211.1	20295.7	23978.9	22137.3
3	464	31.22	30.68	30.95	0.00346	0.00326	0.00336	16116	16801	16458.5	4.66	5.15	4.91	277.0	293.4	285.2	26319.1	27660.5	26989.8	207.5	226.3	216.9	22543.8	23648.3	23096.0
4	415	30.13	29.63	29.88	0.00383	0.00391	0.00387	14332	13986	14159.0	3.74	3.58	3.66	254.0	254.0	254.0	23546.4	22741.0	23143.7	195.9	190.3	193.1	19964.8	19275.6	19620.2
5	430	31.60	31.36	31.48	0.00331	0.00335	0.00333	17349	16961	17155.0	5.24	5.06	5.15	285.1	293.4	289.3	28230.3	27943.2	28086.8	219.8	219.8	219.8	24092.4	23734.1	23913.2
6	355	29.52	30.64	30.08	0.00443	0.00360	0.00402	12852	16149	14500.5	2.90	4.49	3.69	226.3	269.1	247.7	20456.8	25870.4	23163.6	174.5	213.6	194.0	17334.9	22095.8	19715.4
7	538	31.58	31.33	31.45	0.00375	0.00388	0.00382	15116	14716	14916.0	4.03	3.79	3.91	254.0	246.8	250.4	24733.8	23826.3	24280.0	195.9	190.3	193.1	21181.1	20265.7	20723.4
8	400	31.49	30.63	31.06	0.00344	0.00354	0.00349	16736	16147	16441.5	4.87	4.56	4.71	277.0	277.0	277.0	27105.5	25977.1	26541.3	213.6	213.6	213.6	23209.3	22196.6	22703.0
9	447	27.92	30.48	29.20	0.00478	0.00334	0.00406	10509	16220	13364.5	2.20	4.86	3.53	207.5	293.4	250.5	17340.5	26791.7	22066.1	151.0	219.8	185.4	14616.6	22770.4	18693.5
10	546	33.41	33.56	33.49	0.00315	0.00312	0.00314	19103	19283	19193.0	6.06	6.18	6.12	302.0	302.0	302.0	31193.0	31371.0	31282.0	232.9	232.9	232.9	26629.1	26834.1	26731.6
11	434	31.20	31.70	31.45	0.00346	0.00343	0.00345	16491	17415	16953.0	4.77	5.08	4.92	277.0	285.1	281.0	26855.3	27955.4	27405.3	213.6	219.8	216.7	22938.0	23965.6	23451.8
12	405	32.21	32.71	32.46	0.00335	0.00320	0.00328	17678	18377	18027.5	5.28	5.74	5.51	293.4	302.0	297.7	28796.0	30187.8	29491.9	226.3	232.9	229.6	24601.9	25797.9	25199.9
13	368	31.07	30.97	31.02	0.00330	0.00337	0.00334	16965	17090	17027.5	5.14	5.07	5.11	293.4	293.4	293.4	27878.1	27704.7	27791.4	219.8	226.3	223.1	23738.0	23643.7	23690.8
14	352	28.21	29.13	28.67	0.00460	0.00365	0.00412	10975	14264	12619.5	2.39	3.91	3.15	207.5	261.4	234.5	18000.4	23484.1	20742.3	160.0	201.6	180.8	15455.0	20029.2	17742.1
15	427	30.50	30.22	30.36	0.00379	0.00339	0.00359	14734	16485	15609.5	3.89	4.86	4.38	254.0	285.1	269.5	23902.2	26717.8	25310.0	195.9	219.8	207.8	20508.1	22887.1	21697.6
16	616	32.94	32.87	32.90	0.00293	0.00295	0.00294	20195	20415	20305.0	6.89	6.92	6.91	320.0	329.4	324.7	32639.4	33108.0	32873.7	246.8	254.0	250.4	27893.2	28286.0	28089.6
17	396	28.75	28.61	28.68	0.00493	0.00443	0.00468	10773	11728	11250.5	2.19	2.65	2.42	195.9	219.8	207.8	17480.6	19298.7	18389.6	146.7	164.7	155.7	14843.7	16357.2	15600.4
18	377	29.61	30.92	30.27	0.00445	0.00374	0.00410	12173	15181	13677.0	2.74	4.06	3.40	213.6	261.4	237.5	19722.2	24718.0	22220.1	164.7	201.6	183.1	16860.5	20994.0	18927.2
19	415	29.95	31.18	30.56	0.00386	0.00390	0.00388	14535	14959	14747.0	3.77	3.84	3.80	254.0	246.8	250.4	23391.4	24141.9	23766.7	195.9	195.9	195.9	19998.4	20606.9	20302.7
20	394	30.66	29.25	29.96	0.00371	0.00352	0.00361	14858	14611	14734.5	4.00	4.15	4.08	261.4	269.1	265.3	24320.3	24136.7	24228.5	195.9	207.5	201.7	20773.7	20557.0	20665.4
21	359	30.35	29.46	29.90	0.00398	0.00337	0.00368	14022	16642	15332.0	3.52	4.94	4.23	246.8	293.4	270.1	22813.7	26952.0	24882.9	190.3	226.3	208.3	19340.1	22878.7	21109.4
22	418	30.81	31.63	31.22	0.00343	0.00310	0.00327	16490	18379	17434.5	4.81	5.93	5.37	285.1	310.9	298.0	26776.7	30004.6	28390.6	213.6	239.7	226.7	22836.1	25574.1	24205.1
23	659	32.41	32.51	32.46	0.00393	0.00349	0.00371	14898	16624	15761.0	3.79	4.76	4.28	246.8	277.0	261.9	24292.7	27272.9	25782.8	190.3	207.5	198.9	20831.0	23284.3	22057.7
24	724	34.24	33.45	33.84	0.00317	0.00330	0.00324	19489	19100	19294.5	6.15	5.79	5.97	302.0	293.4	297.7	31643.9	30776.7	31210.3	232.9	232.9	232.9	27138.1	26430.8	26784.5
25	546	32.32	31.39	31.85	0.00340	0.00349	0.00345	17153	16614	16883.5	5.04	4.76	4.90	277.0	277.0	277.0	28010.0	26991.0	27500.5	219.8	213.6	216.7	23989.4	23057.3	23523.4
26	463	31.53	30.21	30.87	0.00365	0.00354	0.00360	16002	15384	15693.0	4.38	4.35	4.36	269.1	269.1	269.1	25971.8	26157.8	26564.8	207.5	207.5	207.5	22128.1	21436.9	21782.5
27	325	31.72	30.64	31.18	0.00347	0.00344	0.00346	16996	16545	16770.5	4.90	4.81	4.85	277.0	277.0	277.0	27348.5	26685.4	27016.9	213.6	219.8	216.7	23453.9	22863.3	23158.6
28	461	31.37	30.92	31.15	0.00403	0.00406	0.00404	14434	13916	14175.0	3.58	3.43	3.50	239.7	239.7	239.7	23261.2	22569.5	22915.3	184.9	179.6	182.2	19907.7	19285.6	19596.6
29	462	31.81	31.83	31.82	0.00316	0.00289	0.00303	18154	20644	19399.0	5.74	7.14	6.44	302.0	339.0	320.5	29646.5	33162.1	31404.3	232.9	261.4	247.2	25258.1	28151.0	26704.5
30	413	29.43	30.67	30.00	0.00391	0.00351	0.00371	13945	15853	14899.0	3.57	4.52	4.04	246.8	277.0	261.9	22533.8	26771.3	24152.5	190.3	213.6	201.9	19211.4	22030.1	20620.8

Tabela 27 - Parâmetros obtidos das curvas do acelerômetro – 30°, segunda etapa

Acelerômetro - 40° (Segunda etapa)																									
Manga	Parâmetros dimensionais da forma de onda												Espectro de Resposta ao Choque (Shock Response Spectrum)												
	Área			Tempo total (Tt)			Amplitude (Amp)			Inclinação (Inc) x 10 ⁵			Freq +			Amplitude +			Freq -			Amplitude -			
	N°	Peso (g)	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2
1	389	43.72	43.49	43.61	0.00333	0.00304	0.00319	25903	26490	26196.5	15.56	17.43	16.49	302.0	320.0	311.0	40929.1	43140.9	42035.0	239.7	254.0	246.9	34994.0	36889.8	35941.9
2	460	40.86	41.59	41.23	0.00355	0.00308	0.00332	20999	24657	22828.0	11.83	16.01	13.92	285.1	320.0	302.5	34520.9	40064.3	37292.6	213.6	239.7	226.7	29183.9	34196.1	31690.0
3	464	41.91	42.10	42.01	0.00334	0.00312	0.00323	22866	24600	23733.0	13.69	15.77	14.73	285.1	320.0	302.5	37437.3	40089.9	38763.6	226.3	239.7	233.0	31895.7	34158.7	33027.2
4	415	39.82	39.58	39.70	0.00370	0.00375	0.00372	20163	19973	20068.0	10.90	10.65	10.78	269.1	269.1	269.1	32991.9	32364.6	32678.3	201.6	201.6	201.6	27812.2	27345.8	27579.0
5	430	42.22	41.79	42.00	0.00315	0.00327	0.00321	24541	23771	24156.0	15.58	14.54	15.06	302.0	302.0	302.0	40126.4	38789.4	39457.9	239.7	226.3	233.0	34105.7	32857.1	33481.4
6	355	37.93	41.05	39.49	0.00409	0.00340	0.00375	17963	23350	20656.5	8.78	13.74	11.26	239.7	285.1	262.4	28686.8	37335.1	33011.0	190.3	226.3	208.3	24203.3	31875.7	28039.5
7	538	41.92	41.46	41.69	0.00360	0.00373	0.00367	21528	20933	21230.5	11.96	11.22	11.59	269.1	269.1	269.1	35172.6	33749.9	34461.3	213.6	201.6	207.6	29922.9	28607.7	29265.3
8	400	42.54	41.10	41.82	0.00328	0.00335	0.00331	23912	23319	23615.5	14.58	13.92	14.25	302.0	302.0	302.0	38966.2	37601.1	38283.7	226.3	226.3	226.3	33184.1	31970.7	32577.4
9	447	37.35	41.95	39.65	0.00466	0.00326	0.00396	14895	23573	19234.0	6.39	14.46	10.43	213.6	302.0	257.8	24423.4	38591.2	31507.3	160.0	226.3	193.1	20476.6	32645.5	26561.0
10	546	44.24	44.29	44.26	0.00304	0.00304	0.00304	26445	26481	26463.0	17.40	17.42	17.41	320.0	320.0	320.0	43271.8	43328.8	43300.3	239.7	254.0	246.9	36836.8	36986.2	36911.5
11	434	41.80	41.45	41.63	0.00331	0.00321	0.00326	23455	23488	23921.5	14.17	15.20	14.68	302.0	302.0	302.0	38382.0	39355.4	38868.7	226.3	239.7	233.0	32569.9	33600.4	33085.2
12	405	43.06	43.28	43.17	0.00315	0.00310	0.00312	25014	25678	25346.0	15.88	16.57	16.22	302.0	320.0	311.0	40860.1	41827.3	41343.7	239.7	239.7	239.7	34809.6	35650.9	35230.3
13	368	41.46	41.22	41.34	0.00319	0.00320	0.00320	23857	24352	24104.5	14.96	15.22	15.09	302.0	320.0	311.0	38923.4	39515.6	39219.5	226.3	239.7	233.0	33029.0	33609.5	33319.2
14	352	37.97	39.71	38.84	0.00438	0.00358	0.00398	16174	20798	18486.0	7.39	11.62	9.50	226.3	285.1	255.7	26272.1	34203.7	30237.9	169.5	213.6	191.5	22398.7	28917.7	25658.8
15	427	41.46	40.71	41.08	0.00356	0.00325	0.00340	21886	23448	22667.0	12.30	14.43	13.36	269.1	302.0	285.6	35341.8	38197.5	36769.7	213.6	239.7	226.7	30242.6	32568.9	31405.8
16	616	43.74	43.36	43.55	0.00286	0.00288	0.00287	26577	26599	26588.0	18.59	18.47	18.53	320.0	339.0	329.5	44565.2	44888.2	44726.7	254.0	269.1	261.5	38204.2	38462.5	38333.3
17	396	38.23	38.38	38.31	0.00472	0.00423	0.00447	15570	16954	16262.0	6.60	8.02	7.31	213.6	239.7	226.7	25203.3	27824.6	26514.0	160.0	179.6	169.8	21204.9	23419.7	22312.3
18	377	39.89	41.06	40.47	0.00422	0.00362	0.00392	17757	20931	19344.0	8.42	11.56	9.99	239.7	269.1	254.4	28751.5	34217.3	31484.4	179.6	201.6	190.6	24479.1	28955.0	26717.1
19	415	41.40	42.13	41.76	0.00360	0.00367	0.00364	22146	21842	21994.0	12.30	11.90	12.10	269.1	269.1	269.1	35367.3	35105.8	35236.6	213.6	213.6	213.6	30104.0	29846.7	29975.3
20	394	40.43	40.25	40.34	0.00360	0.00347	0.00353	20413	20935	20674.0	11.34	12.07	11.70	269.1	285.1	277.1	33534.3	34709.1	34121.7	201.6	213.6	207.6	28469.1	29398.4	28933.7
21	359	40.63	40.45	40.54	0.00378	0.00316	0.00347	20410	24769	22589.5	10.80	15.68	13.24	269.1	320.0	294.5	32928.5	39985.4	36456.9	201.6	254.0	227.8	27919.6	33785.7	30852.6
22	418	41.03	41.39	41.21	0.00323	0.00300	0.00311	23482	25167	24324.5	14.54	16.78	15.66	302.0	320.0	311.0	38233.8	40852.4	39543.1	226.3	254.0	240.1	32424.5	34712.4	33568.5
23	659	42.75	44.32	43.53	0.00376	0.00344	0.00360	20839	23420	22129.5	11.08	13.62	12.35	254.0	285.1	269.5	33895.5	38573.8	36234.7	201.6	213.6	207.6	28915.2	32803.8	30859.5
24	724	44.49	45.05	44.77	0.00303	0.00312	0.00308	26458	26526	26492.0	17.46	17.00	17.23	320.0	320.0	320.0	43218.8	43777.0	43497.9	239.7	254.0	246.9	36983.5	37611.3	37297.4
25	546	43.41	41.36	42.39	0.00323	0.00336	0.00329	24358	23065	23711.5	15.08	13.73	14.41	302.0	302.0	302.0	39941.5	37656.6	38799.1	226.3	226.3	226.3	33986.5	32044.8	33015.6
26	463	41.99	41.98	41.99	0.00351	0.00343	0.00347	22428	22356	22392.0	12.78	13.04	12.91	285.1	285.1	285.1	36616.9	36816.1	36716.5	213.6	213.6	213.6	31010.9	31207.8	31109.3
27	325	41.69	40.49	41.09	0.00330	0.00330	0.00330	23898	23025	23461.5	14.48	13.95	14.22	302.0	302.0	302.0	38479.1	37287.1	37883.1	226.3	226.3	226.3	32882.3	31845.8	32364.0
28	461	41.72	40.95	41.33	0.00380	0.00389	0.00384	20790	19705	20247.5	10.94	10.13	10.54	254.0	254.0	254.0	33463.3	31775.7	32619.5	201.6	190.3	195.9	28495.8	27052.5	27774.2
29	462	42.60	42.26	42.43	0.00301	0.00280	0.00290	26293	26626	26459.5	17.47	19.02	18.24	320.0	339.0	329.5	42531.2	45176.1	43853.6	254.0	269.1	261.5	36071.9	38600.6	37336.3
30	413	39.68	41.52	40.60	0.00365	0.00341	0.00353	20503	22601	21552.0	11.23	13.26	12.25	269.1	285.1	277.1	33033.8	36943.2	34988.5	201.6	226.3	213.9	28056.9	31368.7	29712.8

Tabela 28 - Parâmetros obtidos das curvas do acelerômetro – 40°, segunda etapa

Confirmando a percepção ao longo dos experimentos, o ângulo de 15° provocou um impacto muito pequeno do bastão com a manga. Os parâmetros extraídos neste ângulo tiveram o menor desempenho, exatamente devido ao muito baixo impacto, afetando substancialmente os sinais capturados.

Ocorreram diferenças significativas entre as correlações obtidas para os lados 1 e 2 da fruta. O lado 1 é o lado do bico, com o ponto de impacto próximo da linha média (equador) da fruta em repouso natural. De uma forma geral, o lado do bico teve desempenho superior em todos os parâmetros. Este fato pode ter ocorrido devido à naturalmente maior curvatura da fruta no ponto de impacto do lado 2, curvatura esta que, de acordo com estudos anteriores, tem influência direta nos parâmetros do impacto.

Esta diferença entre os lados foi sistemática em todos os parâmetros e em todos os ângulos, mas sua influência não pode ser caracterizada, no escopo deste trabalho, pela grande dificuldade de medição precisa da curvatura da fruta exatamente no ponto de impacto. Como não houve nenhuma outra mudança no experimento, quando do registro do impacto de um lado ou de outro (registrados um imediatamente após o outro), não há razão para supor que estas diferenças não tenham ocorrido pelas diferenças de curvaturas entre os lados, uma vez que a curvatura do ponto de impacto do bastão (cabeça arredondada do parafuso) manteve-se constante.

Um desempenho também elevado foi o da amplitude, maior até do que o da inclinação (Tabela 32). Como é mais fácil e rápido para um computador, do ponto de vista da exigência de capacidade de processamento de dados, calcular a amplitude máxima do que calcular a inclinação máxima (um algoritmo de identificação do pico máximo é mais simples do que um algoritmo de cálculo de derivadas), este fato abre uma importante linha de pesquisa com a utilização deste simples parâmetro para estimativa não-destrutiva de materiais biológicos. Para este alto desempenho da amplitude, pode ter havido uma contribuição importante do posicionamento do sensor próximo ao centro de percussão do

bastão, o que pode ter reduzido as vibrações indesejáveis (componentes de alta frequência) do impacto, funcionando como um “filtro mecânico” natural.

Pode-se observar, também, o melhor desempenho dos parâmetros extraídos do ERC em relação aos parâmetros dimensionais (amplitude, tempo total, inclinação), devido, possivelmente, ao ERC levar em consideração os componentes de mais alta frequência do sinal. Este melhor desempenho do ERC ficou evidenciado tanto no ângulo de 30° quanto no de 40°, o que dá maior robustez à afirmativa de melhor desempenho global.

Não foram identificados, nos artigos científicos pesquisados, estudos com a utilização de parâmetros do ERC do sinal de um acelerômetro *MEMS* de baixo custo, posicionado no centro de percussão de um bastão, para estimativa de firmeza de frutas utilizando a técnica de impacto de pequena massa.

Na Figura 100 é mostrado um exemplo de uma boa correlação não-linear entre um dos parâmetros estudados do acelerômetro, a amplitude média do ERC negativo (Amp-m), 40°, e a força máxima de compressão para a profundidade de 4mm (FC4mm), $r = 0,92$. Observa-se que a heterocedasticidade não é tão elevada quanto às ocorridas com os parâmetros dimensionais, o que sugere que o ERC, além de aumentar as correlações (mesmo que levemente), também contribui para a redução da heterocedasticidade.

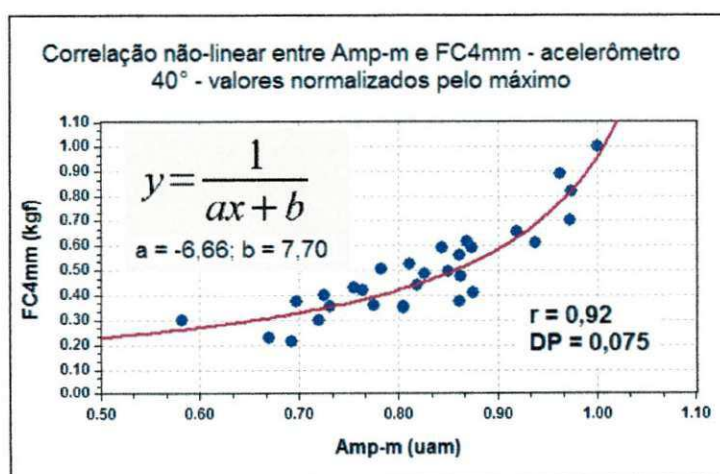


Figura 100 - Correlação não-linear entre Amp-m e a força de compressão (4 mm) do acelerômetro, 40°.

Na Tabela 29 são mostrados os valores calculados dos onze parâmetros de referência utilizados para os cálculos das correlações apresentadas nas Tabelas 30 a 32.

Tabela 29 - Parâmetros de referência para cálculos das correlações lineares, segunda etapa.

Manga	Parâmetros de referência para cálculos das correlações lineares - segunda etapa										
	L*a*b*	TA	FC4mm	FC2mm	FPerf	L*a*b*	L*a*b*	L*a*b*	TA	TA	TA
	(CIELAB)		(kgf)			FC4mm	FC2mm	Fperf	FC4mm	FC2mm	Fperf
	(CIELAB/kgf)										
1	73515.3	110.45	7.74	3.70	1.50	9498.1	19869.0	49010.2	14.27	29.85	73.63
2	145128.4	137.10	6.16	3.13	0.35	23559.8	46366.9	414652.6	22.26	43.80	391.71
3	87210.5	116.03	7.15	3.93	0.65	12197.3	22191.0	134170.1	16.23	29.52	178.51
4	149012.2	138.42	3.77	2.35	0.35	39525.8	63409.4	425749.0	36.72	58.90	395.47
5	74165.4	113.53	7.48	3.77	0.51	9915.2	19672.5	145422.3	15.18	30.12	222.61
6	137174.9	130.62	4.50	2.71	0.55	30483.3	50618.1	249409.0	29.03	48.20	237.48
7	110723.1	123.99	5.30	2.94	0.50	20891.1	37660.9	221446.1	23.39	42.17	247.98
8	103061.2	118.48	6.31	3.05	0.70	16333.0	33790.6	147230.3	18.78	38.85	169.26
9	133473.7	128.49	2.70	1.67	0.32	49434.7	79924.4	417105.3	47.59	76.94	401.53
10	19722.9	80.92	11.35	5.37	2.31	1737.7	3672.8	8538.0	7.13	15.07	35.03
11	128772.3	128.22	6.03	3.63	0.76	21355.3	35474.5	169437.3	21.26	35.32	168.71
12	87592.9	116.39	8.35	3.88	0.71	10490.2	22575.5	123370.2	13.94	30.00	163.92
13	95296.8	116.82	7.84	3.69	0.60	12155.2	25825.7	158828.0	14.90	31.66	194.70
14	135029.3	136.97	2.91	1.23	0.31	46401.8	109780.0	435578.5	47.07	111.36	441.85
15	118208.8	123.53	5.57	2.62	0.52	21222.4	45117.9	227324.6	22.18	47.15	237.57
16	50521.2	102.45	12.71	5.56	1.79	3974.9	9086.6	28224.1	8.06	18.43	57.24
17	142419.6	137.70	3.78	1.42	0.35	37677.1	100295.5	406913.1	36.43	96.97	393.43
18	132979.5	131.80	4.76	2.82	0.32	27936.9	47155.8	415560.9	27.69	46.74	411.87
19	91972.2	116.56	6.39	2.96	0.64	14393.1	31071.7	143706.5	18.24	39.38	182.13
20	150640.2	138.14	5.45	1.79	0.36	27640.4	84156.6	418445.1	25.35	77.17	383.72
21	141193.2	134.32	4.44	2.40	0.59	31800.3	58830.5	239310.6	30.25	55.97	227.67
22	129478.1	128.80	5.19	3.25	0.41	24947.6	39839.4	315800.2	24.82	39.63	314.14
23	91325.0	119.36	4.53	3.51	0.41	20160.0	26018.5	222743.9	26.35	34.01	291.12
24	59648.9	106.28	8.92	6.74	1.65	6687.1	8850.0	36150.8	11.91	15.77	64.41
25	117999.5	126.08	4.74	2.80	0.49	24894.4	42142.7	240815.4	26.60	45.03	257.31
26	133154.1	128.70	6.65	3.00	0.51	20023.2	44384.7	261086.4	19.35	42.90	252.36
27	64814.7	105.82	7.49	3.61	1.64	8653.5	17954.2	39521.2	14.13	29.31	64.52
28	111240.7	124.30	5.10	2.61	0.49	21811.9	42621.0	227021.8	24.37	47.63	253.68
29	25009.3	87.78	10.43	4.99	3.02	2397.8	5011.9	8281.2	8.42	17.59	29.07
30	144980.2	138.76	4.58	2.33	0.20	31655.1	62223.3	724901.1	30.30	59.55	693.78

Tabela 30 - Coeficientes de correlação linear entre parâmetros de referência (colunas) e parâmetros calculados das curvas do acelerômetro (linhas), 15°, segunda etapa

Parâmetros não-destrutivos	Coeficientes de correlação linear - Acelerômetro - 15° (Segunda etapa)											
	Parâmetros de referência (métodos destrutivos)											Média ABS
	L'a'b'	TA	FC4mm	FC2mm	FPerf	L'a'b'/FC4mm	L'a'b'/FC2mm	L'a'b'/FPerf	TA/FC4mm	TA/FC2mm	TA/FPerf	
Área lado 1 - A1	-0.44	-0.42	0,52	0.58	0.29	-0.59	-0.58	-0.51	-0.59	-0.60	-0.48	0.508
Área lado 2 - A2	-0.32	-0.28	0,29	0.36	0.32	-0.23	-0.31	-0.19	-0.20	-0.30	-0.18	0.271
Área média - Am	-0.46	-0.43	0,50	0.57	0.36	-0.51	-0.55	-0.43	-0.49	-0.55	-0.41	0.479
Tempo total 1 - Tt1	0.59	0.59	-0,75	-0.74	-0.50	0.75	0.73	0.56	0.76	0.74	0.55	0.659
Tempo total 2 - Tt2	0.49	0.50	-0,57	-0.53	-0.50	0.42	0.46	0.31	0.42	0.46	0.31	0.451
Tempo médio - Tm	0.61	0.61	-0,75	-0.72	-0.55	0.68	0.68	0.51	0.69	0.69	0.50	0.635
Amplitude lado 1 - Amp1	-0.65	-0.64	0,80	0.79	0.53	-0.79	-0.76	-0.64	-0,80	-0.77	-0.63	0.709
Amplitude lado 2 - Amp2	-0.56	-0.55	0,60	0.60	0.59	-0.47	-0.53	-0.39	-0.46	-0.52	-0.39	0.515
Amplitude média - Ampm	-0.68	-0.67	0,80	0.79	0.63	-0.73	-0.74	-0.60	-0.73	-0.74	-0.59	0.701
Inclinação lado 1 - Inc1	-0,66	-0,65	0,83	0,80	0,56	-0,77	-0,74	-0,63	-0,79	-0,75	-0,62	0,710
Inclinação lado 2 - Inc2	-0,58	-0,58	0,63	0,60	0,61	-0,48	-0,51	-0,39	-0,47	-0,50	-0,39	0,522
Inclinação média - Incm	-0,69	-0,69	0,82	0,79	0,65	-0,71	-0,71	-0,58	-0,71	-0,70	-0,57	0,691
Amp. ERC+ lado 1 - Amp+1	-0.63	-0.62	0,79	0.78	0.52	-0.77	-0.75	-0.63	-0.78	-0.75	-0.62	0.695
Amp. ERC+ lado 2 - Amp+2	-0.52	-0.52	0,58	0.57	0.55	-0.43	-0.49	-0.35	-0.42	-0.49	-0.35	0.479
Amp. ERC+ média - A+m	-0.66	-0.65	0,79	0.78	0.61	-0.70	-0.71	-0.57	-0.70	-0.72	-0.56	0.676
Amp. ERC- lado 1 - Amp-1	-0.64	-0.63	0,79	0.78	0.52	-0.78	-0.75	-0.63	-0.79	-0.75	-0.61	0.698
Amp. ERC- lado 2 - Amp-2	-0.50	-0.49	0,56	0.56	0.51	-0.41	-0.46	-0.32	-0.40	-0.46	-0.31	0.454
Amp. ERC- média - A-m	-0.66	-0.64	0,78	0.77	0.59	-0.70	-0.70	-0.55	-0.70	-0.70	-0.54	0.666
Mínimo	0.61	0.61	0,83	0.80	0.65	0.75	0.73	0.56	0.76	0.74	0.55	
Máximo	-0.69	-0.69	-0,75	-0.74	-0.55	-0.79	-0.76	-0.64	-0.80	-0.77	-0.63	
Média de absolutos	0.57	0.56	0,67	0.67	0.52	0.61	0.62	0.49	0.60	0.62	0.48	

Tabela 31 - Coeficientes de correlação linear entre parâmetros de referência (colunas) e parâmetros calculados das curvas do acelerômetro (linhas), 30°, segunda etapa.

Parâmetros não-destrutivos	Coeficientes de correlação linear - Acelerômetro - 30° (Segunda etapa)											
	Parâmetros de referência (métodos destrutivos)											Média ABS
	L'a'b'	TA	FC4mm	FC2mm	FPerf	L'a'b'/FC4mm	L'a'b'/FC2mm	L'a'b'/FPerf	TA/FC4mm	TA/FC2mm	TA/FPerf	
Área lado 1 - A1	-0.72	-0.71	0.75	0,84	0.60	-0.83	-0.82	-0.75	-0.81	-0.81	-0.73	0.762
Área lado 2 - A2	-0.74	-0.73	0.70	0,84	0.59	-0.73	-0.83	-0.64	-0.69	-0.81	-0.61	0.719
Área média - Am	-0.78	-0.76	0.77	0,90	0.63	-0.83	-0.88	-0.74	-0.80	-0.86	-0.71	0.788
Tempo total 1 - Tt1	0.65	0.65	-0.80	-0,78	-0.57	0.84	0.82	0.65	0.86	0.82	0.64	0.735
Tempo total 2 - Tt2	0.52	0.55	-0.63	-0,62	-0.55	0.52	0.58	0.43	0.53	0.58	0.44	0.542
Tempo médio - Tm	0.66	0.66	-0.80	-0,78	-0.61	0.78	0.79	0.61	0.79	0.79	0.61	0.718
Amplitude lado 1 - Amp1	-0.75	-0.74	0.87	0,87	0.67	-0.89	-0.86	-0.75	-0.89	-0.85	-0.74	0.807
Amplitude lado 2 - Amp2	-0.70	-0.72	0.77	0,81	0.72	-0.69	-0.76	-0.62	-0.69	-0.76	-0.63	0.716
Amplitude média - Ampm	-0.78	-0.78	0.87	0,89	0.73	-0.85	-0.86	-0.73	-0.85	-0.86	-0.74	0.814
Inclinação lado 1 - Inc1	-0.76	-0.75	0.89	0,87	0.68	-0.87	-0.83	-0.73	-0.88	-0.83	-0.72	0.801
Inclinação lado 2 - Inc2	-0.68	-0.69	0.76	0,76	0.72	-0.64	-0.69	-0.57	-0.64	-0.69	-0.58	0.675
Inclinação média - Incm	-0.77	-0.77	0.88	0,87	0.74	-0.81	-0.82	-0.70	-0.82	-0.81	-0.70	0.791
Amp. ERC+ lado 1 - Amp+1	-0,75	-0,74	0,86	0,87	0,66	-0,88	-0,85	-0,74	-0,88	-0,85	-0,73	0,800
Amp. ERC+ lado 2 - Amp+2	-0.70	-0.71	0.77	0,80	0,70	-0.68	-0.74	-0.61	-0.67	-0.74	-0.61	0.703
Amp. ERC+ média - A+m	-0.77	-0.77	0.87	0,89	0.72	-0.84	-0.85	-0.72	-0.84	-0.85	-0.72	0.805
Amp. ERC- lado 1 - Amp-1	-0,75	-0,74	0,86	0,87	0,66	-0,88	-0,85	-0,74	-0,89	-0,84	-0,73	0,800
Amp. ERC- lado 2 - Amp-2	-0.70	-0.71	0.77	0,81	0.70	-0.68	-0.75	-0.61	-0.68	-0.74	-0.61	0.705
Amp. ERC- média - A-m	-0.77	-0.77	0.87	0,89	0.72	-0.84	-0.86	-0.72	-0.84	-0.85	-0.72	0.807
Mínimo	0.66	0.66	0.89	0,90	0.74	0.84	0.82	0.65	0.86	0.82	0.64	
Máximo	-0.78	-0.78	-0.80	-0,78	-0.61	-0.89	-0.88	-0.75	-0.89	-0.86	-0.74	
Média de absolutos	0.72	0.72	0.81	0,83	0.67	0.78	0.80	0.67	0.78	0.80	0.67	

Tabela 32 - Coeficientes de correlação linear entre parâmetros de referência (colunas) e parâmetros calculados da onda 2 do acelerômetro (linhas), 40°, segunda etapa.

Parâmetros não-destrutivos	Coeficientes de correlação linear - Acelerômetro - 40° (Segunda etapa)											
	Parâmetros de referência (métodos destrutivos)											Média ABS
	L'a'b'	TA	FC4mm	FC2mm	FPerf	L'a'b'/FC4mm	L'a'b'/FC2mm	L'a'b'/FPerf	TA/FC4mm	TA/FC2mm	TA/FPerf	
Área lado 1 - A1	-0,73	-0,71	0,75	0,80	0,58	-0,87	-0,84	-0,74	-0,85	-0,82	-0,72	0,764
Área lado 2 - A2	-0,67	-0,66	0,63	0,79	0,50	-0,64	-0,74	-0,55	-0,60	-0,72	-0,51	0,637
Área média - Am	-0,76	-0,74	0,75	0,86	0,59	-0,83	-0,86	-0,71	-0,80	-0,84	-0,68	0,765
Tempo total 1 - Tt1	0,65	0,65	-0,80	-0,78	-0,57	0,85	0,83	0,65	0,87	0,84	0,65	0,741
Tempo total 2 - Tt2	0,53	0,56	-0,64	-0,64	-0,57	0,55	0,61	0,49	0,56	0,63	0,50	0,571
Tempo médio - Tm	0,66	0,66	-0,80	-0,79	-0,62	0,80	0,81	0,64	0,81	0,82	0,64	0,731
Amplitude lado 1 - Amp1	-0,75	-0,75	0,84	0,83	0,67	-0,90	-0,87	-0,75	-0,91	-0,86	-0,74	0,807
Amplitude lado 2 - Amp2	-0,62	-0,64	0,69	0,75	0,61	-0,63	-0,72	-0,59	-0,63	-0,73	-0,60	0,658
Amplitude média - Ampm	-0,75	-0,76	0,84	0,86	0,69	-0,85	-0,87	-0,74	-0,85	-0,87	-0,74	0,800
Inclinação lado 1 - Inc1	-0,77	-0,76	0,87	0,85	0,69	-0,89	-0,86	-0,74	-0,89	-0,84	-0,73	0,809
Inclinação lado 2 - Inc2	-0,62	-0,64	0,71	0,73	0,65	-0,62	-0,68	-0,57	-0,63	-0,69	-0,59	0,648
Inclinação média - Incm	-0,75	-0,76	0,86	0,86	0,72	-0,83	-0,83	-0,71	-0,83	-0,83	-0,72	0,790
Amp. ERC+ lado 1 - Amp+1	-0,75	-0,74	0,85	0,84	0,66	-0,90	-0,87	-0,74	-0,90	-0,86	-0,73	0,802
Amp. ERC+ lado 2 - Amp+2	-0,65	-0,67	0,72	0,77	0,66	-0,64	-0,71	-0,59	-0,64	-0,71	-0,60	0,670
Amp. ERC+ média - A+m	-0,76	-0,76	0,86	0,87	0,71	-0,85	-0,86	-0,73	-0,85	-0,85	-0,73	0,801
Amp. ERC- lado 1 - Amp-1	-0,75	-0,74	0,85	0,84	0,66	-0,90	-0,87	-0,74	-0,90	-0,85	-0,74	0,804
Amp. ERC- lado 2 - Amp-2	-0,66	-0,68	0,73	0,78	0,67	-0,65	-0,72	-0,60	-0,65	-0,72	-0,61	0,679
Amp. ERC- média - A-m	-0,76	-0,76	0,86	0,88	0,71	-0,85	-0,86	-0,73	-0,85	-0,85	-0,73	0,804
Mínimo	0,66	0,66	0,87	0,88	0,72	0,85	0,83	0,65	0,87	0,84	0,65	
Máximo	-0,77	-0,76	-0,80	-0,79	-0,62	-0,90	-0,87	-0,75	-0,91	-0,87	-0,74	
Média de absolutos	0,70	0,70	0,78	0,81	0,64	0,78	0,80	0,67	0,78	0,80	0,66	

Na Figura 101 é mostrado um exemplo de uma boa correlação linear entre um dos parâmetros estudados do acelerômetro, a amplitude do lado 1 (40°) e o parâmetro combinado de referência, **TA/FC4mm**, ($r = 0,90$). Observa-se também baixa heterocedasticidade, o que sugere a utilização deste parâmetro combinado como referência para estimativa não-destrutiva de firmeza de mangas *Tommy Atkins*.

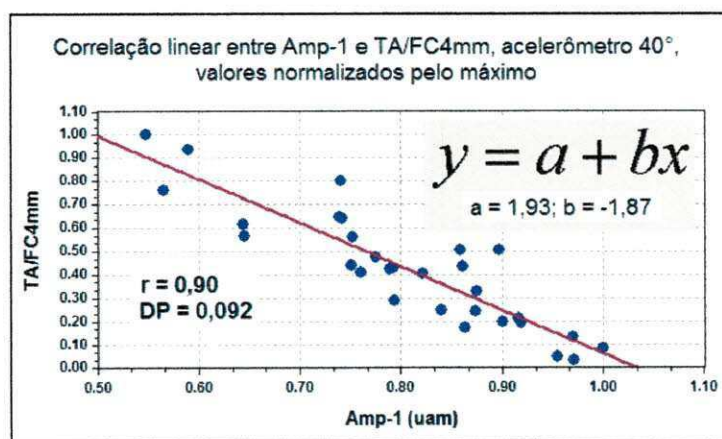


Figura 101 - Boa correlação linear entre Amp-1 e o parâmetro combinado TA/FC4mm do acelerômetro, 40°.

4.7.3. Resultados do microfone – segunda etapa

Nas Tabelas 33 a 38 observam-se desempenhos muito semelhantes do microfone em relação ao acelerômetro. Também aqui as correlações entre referências e sensores cresceram do menor para o maior ângulo de impacto (40°), sendo que as melhores correlações entre os parâmetros testados foram as obtidas entre TA/FC4mm e as amplitudes da onda 2, sendo a máxima $r = -0,91$ (lado 1).

Na Figura 102 é mostrada a alta correlação entre os valores de Amp+1 (amplitude do ERC positivo) do acelerômetro e do microfone, $r > 0,99$, o que comprova a utilização do microfone de eletreto vedado como acelerômetro, com as vantagens: possui uma maior banda passante, um custo mais baixo e maiores facilidades de aquisição e de conexão a um microcomputador, inclusive podendo ser conectado diretamente a uma placa de som.

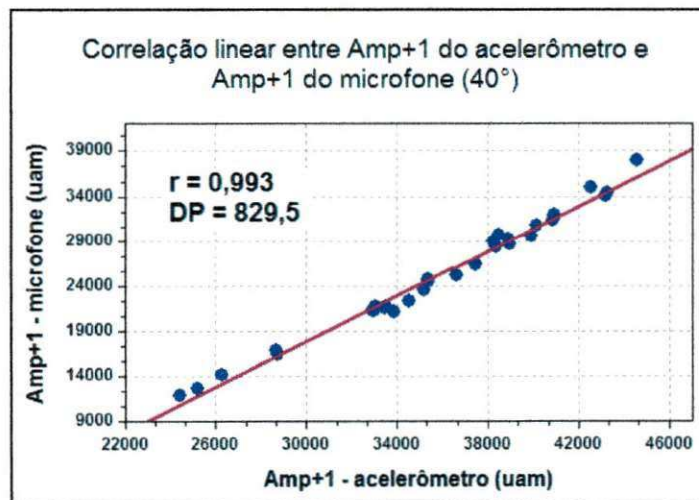


Figura 102 - Correlação linear entre os parâmetros Amp+1 do acelerômetro e do microfone.

Também no caso do microfone ocorreram diferenças significativas entre as correlações obtidas para os lados 1 e 2 da fruta, provavelmente pela mesma razão citada para o caso do acelerômetro.

Embora os desempenhos dos parâmetros extraídos do ERC tenham sido bons, o parâmetro dimensional amplitude da onda 2 obteve as melhores

correlações, o que sugere sua utilização em conjunto com o ERC do acelerômetro, ambos com relação à mesma referência (TA/FC4mm). A ocorrência das melhores correlações novamente com esta referência dá maior robustez à afirmativa de melhor desempenho global deste novo parâmetro combinado.

Não foram identificados, nos artigos científicos pesquisados, estudos com a utilização da amplitude do sinal de um microfone de eletreto de baixo custo, posicionado no centro de percussão de um bastão, para estimativa de firmeza de frutas utilizando a técnica de impacto de pequena massa.

Na Figura 103 é mostrado um exemplo de uma boa correlação não-linear entre um dos parâmetros estudados do microfone de eletreto, a amplitude do pico, lado 1 (Amp1), 40°, e a força máxima de compressão para a profundidade de 4mm (FC4mm), $r = 0,92$. Observa-se também uma heterocedasticidade relativamente elevada, como nos parâmetros dimensionais do acelerômetro.

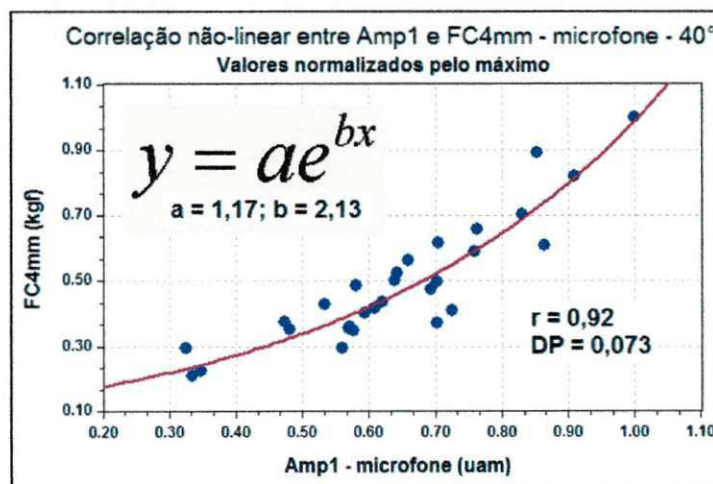


Figura 103 - Correlação não-linear entre Amp-m e força de compressão (4 mm) do microfone, 40°.

Microfone de eletreto - 15° (Segunda etapa)																									
Manga		Parâmetros dimensionais da forma de onda											Espectro de Resposta ao Choque (Shock Response Spectrum)												
		Área			Tempo total (Tt)			Amplitude (Amp)			Inclinação (Inc) x 10 ⁶			Freq +			Amplitude +			Freq -			Amplitude -		
		L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média
Nº	Peso (g)	(ua)			(s)			(uam)			(uam/s)			(Hz)			(uam)			(Hz)			(uam)		
1	389	3.39	4.49	3.94	0.00245	0.00208	0.00226	2434	3754	3094.0	0.99	1.80	1.40	261.4	302.0	281.7	5641.2	8548.7	7095.0	277.0	310.9	293.9	5335.2	8167.9	6751.5
2	460	3.74	4.41	4.07	0.00261	0.00195	0.00228	2578	3357	2967.5	0.99	1.72	1.35	239.7	261.4	250.6	6041.4	8047.1	7044.3	285.1	302.0	293.6	5854.2	7704.3	6779.2
3	464	3.71	3.65	3.68	0.00226	0.00306	0.00266	2891	3277	3084.0	1.28	1.07	1.18	806.4	269.1	537.7	6648.2	8170.2	7409.2	806.4	310.9	558.6	6415.8	8030.4	7223.1
4	415	3.64	3.81	3.72	0.00238	0.00260	0.00249	2724	2556	2640.0	1.14	0.98	1.06	783.4	783.4	783.4	6658.3	6329.1	6493.7	806.4	783.4	794.9	6339.4	6038.2	6188.8
5	430	4.38	4.34	4.36	0.00209	0.00202	0.00205	3450	3640	3545.0	1.65	1.80	1.73	293.4	806.4	549.9	8122.5	10516.7	9319.6	310.9	830.0	570.4	7828.0	10153.1	8990.5
6	355	2.39	3.69	3.04	0.00330	0.00258	0.00294	1398	2765	2081.5	0.42	1.07	0.75	195.9	239.7	217.8	3260.3	6025.1	4642.7	219.8	277.0	248.4	3021.1	5810.8	4416.0
7	538	3.46	3.49	3.47	0.00253	0.00248	0.00251	2456	2200	2328.0	0.97	0.89	0.93	806.4	232.9	519.6	5720.0	5388.3	5554.2	783.4	269.1	526.2	5387.1	5117.0	5252.1
8	400	4.35	3.32	3.84	0.00232	0.00233	0.00233	3297	2325	2811.0	1.42	1.00	1.21	254.0	239.7	246.9	7535.7	5366.6	6451.1	302.0	285.1	293.6	7275.0	5063.6	6169.3
9	447	2.56	5.00	3.78	0.00285	0.00232	0.00259	1566	3729	2647.5	0.55	1.61	1.08	1045.7	830.0	937.8	3850.0	11481.2	7665.6	2091.4	830.0	1460.7	3573.7	11062.7	7318.2
10	546	4.72	4.00	4.36	0.00231	0.00325	0.00278	3592	3955	3773.5	1.55	1.22	1.39	310.9	830.0	570.4	8534.5	12478.9	10506.7	320.0	830.0	575.0	8402.1	12016.6	10209.4
11	434	4.12	3.66	3.89	0.00246	0.00230	0.00238	3129	2858	2993.5	1.27	1.24	1.26	277.0	269.1	273.0	6942.2	6291.0	6616.6	302.0	285.1	293.6	6754.7	5992.0	6373.3
12	405	3.73	5.03	4.38	0.00320	0.00228	0.00274	3751	3914	3832.5	1.17	1.72	1.44	293.4	830.0	561.7	8635.1	10046.0	9340.5	310.9	830.0	570.4	8400.9	9950.9	9175.9
13	368	4.83	4.49	4.66	0.00233	0.00226	0.00230	3653	3370	3511.5	1.57	1.49	1.53	302.0	806.4	554.2	8769.0	8979.5	8874.2	320.0	806.4	563.2	8611.1	8603.5	8607.3
14	352	2.44	3.64	3.04	0.00323	0.00233	0.00278	1257	2751	2004.0	0.39	1.18	0.78	195.9	806.4	501.1	3328.5	8535.8	5932.1	226.3	806.4	516.3	3006.9	8250.6	5628.7
15	427	3.58	4.08	3.83	0.00248	0.00214	0.00231	2589	3337	2963.0	1.04	1.56	1.30	806.4	806.4	806.4	5901.3	7627.5	6764.4	783.4	806.4	794.9	5641.8	7254.1	6448.0
16	616	5.64	5.75	5.69	0.00213	0.00211	0.00212	4540	4764	4652.0	2.13	2.26	2.19	339.0	2031.9	1185.5	10717.7	11567.0	11142.3	349.0	349.0	349.0	10557.7	11016.0	10786.9
17	396	2.52	2.92	2.72	0.00357	0.00274	0.00315	1188	1728	1458.0	0.33	0.63	0.48	958.9	806.4	882.6	3669.7	4796.4	4233.0	806.4	806.4	806.4	3137.5	4556.8	3847.1
18	377	2.80	3.97	3.39	0.00317	0.00218	0.00268	1559	3128	2343.5	0.49	1.43	0.96	201.6	806.4	504.0	3954.7	8574.8	6264.8	232.9	806.4	519.6	3698.5	8186.6	5942.6
19	415	3.53	3.37	3.45	0.00269	0.00268	0.00268	2338	2167	2252.5	0.87	0.81	0.84	232.9	226.3	229.6	5425.7	5200.2	5312.9	269.1	261.4	265.3	5131.4	4863.0	4997.2
20	394	3.86	4.25	4.05	0.00257	0.00242	0.00250	2758	2821	2789.5	1.07	1.17	1.12	239.7	806.4	523.0	6324.4	8178.9	7251.7	285.1	806.4	545.7	6012.9	7941.2	6977.0
21	359	3.45	4.85	4.15	0.00267	0.00222	0.00245	2293	3650	2971.5	0.86	1.64	1.25	226.3	806.4	516.3	5287.7	10415.6	7851.7	261.4	806.4	533.9	5000.9	9939.2	7470.0
22	418	4.34	5.14	4.74	0.00236	0.00217	0.00227	3346	3812	3579.0	1.42	1.76	1.59	261.4	830.0	545.7	7665.9	11257.2	9461.6	302.0	830.0	566.0	7403.8	10947.3	9175.6
23	659	3.85	4.87	4.36	0.00290	0.00254	0.00272	2601	3488	3044.5	0.90	1.37	1.14	830.0	806.4	818.2	6641.3	9948.0	8294.6	830.0	806.4	818.2	6399.8	9426.4	7913.1
24	724	5.02	4.77	4.89	0.00254	0.00228	0.00241	3881	3632	3756.5	1.53	1.59	1.56	806.4	806.4	806.4	10284.4	9199.5	9741.9	806.4	806.4	806.4	9923.0	8791.7	9357.3
25	546	4.14	4.05	4.10	0.00217	0.00240	0.00228	3294	3074	3184.0	1.52	1.28	1.40	285.1	254.0	269.5	7481.8	6838.7	7160.2	302.0	293.4	297.7	7151.1	6644.2	6897.7
26	463	4.28	3.99	4.13	0.00253	0.00202	0.00228	3075	3140	3107.5	1.22	1.55	1.38	246.8	806.4	526.6	7010.8	8485.2	7748.0	285.1	806.4	545.7	6779.3	8322.4	7550.9
27	325	4.13	4.63	4.38	0.00226	0.00224	0.00225	3259	3485	3372.0	1.44	1.56	1.50	277.0	806.4	541.7	7199.3	8840.2	8019.8	293.4	806.4	549.9	6898.6	8467.5	7683.1
28	461	3.01	3.25	3.13	0.00271	0.00269	0.00270	1900	2076	1988.0	0.70	0.77	0.74	232.9	219.8	226.4	4508.8	4917.3	4713.0	246.8	261.4	254.1	4219.2	4646.9	4433.1
29	462	4.48	6.11	5.30	0.00227	0.00196	0.00211	3407	5099	4253.0	1.50	2.60	2.05	293.4	359.2	326.3	8477.5	12228.1	10352.8	320.0	369.7	344.9	8190.7	12162.7	10176.7
30	413	3.25	4.15	3.70	0.00272	0.00240	0.00256	2161	3106	2633.5	0.79	1.29	1.04	219.8	254.0	236.9	4851.2	7113.1	5982.1	261.4	293.4	277.4	4572.5	6835.6	5704.0

Tabela 33 - Parâmetros obtidos das curvas do microfone – 15°, segunda etapa.

Microfone de eletreto - 30° (Segunda etapa)																									
Manga		Parâmetros dimensionais da forma de onda											Espectro de Resposta ao Choque (Shock Response Spectrum)												
		Área			Tempo total (Tt)			Amplitude (Amp)			Inclinação (Inc) x 10 ⁴			Freq +			Amplitude +			Freq -			Amplitude -		
		L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média
Nº	Peso (g)	(ua)			(s)			(uam)			(uam/s)			(Hz)			(uam)			(Hz)			(uam)		
1	389	9.37	10.80	10.09	0.00220	0.00200	0.00210	8604	9803	9203.5	3.91	4.90	4.41	310.9	339.0	325.0	19116.5	23817.2	21466.8	339.0	359.2	349.1	18628.5	23388.6	21008.6
2	460	8.13	8.53	8.33	0.00262	0.00253	0.00258	5957	8797	7377.0	2.27	3.48	2.88	293.4	285.1	289.3	14406.9	19605.9	17006.4	310.9	349.0	329.9	14262.1	19932.1	17097.1
3	464	9.04	10.22	9.63	0.00255	0.00212	0.00233	6945	8130	7537.5	2.72	3.83	3.28	302.0	339.0	320.5	17633.8	20162.3	18898.0	329.4	349.0	339.2	17080.1	20023.0	18551.5
4	415	7.80	8.06	7.93	0.00238	0.00258	0.00248	5819	5979	5899.0	2.44	2.32	2.38	806.4	806.4	806.4	14222.8	14385.7	14304.3	310.9	806.4	558.6	13865.1	13749.8	13807.5
5	430	9.92	10.31	10.11	0.00211	0.00219	0.00215	8264	8123	8193.5	3.92	3.71	3.81	320.0	830.0	575.0	20197.9	21094.4	20646.1	349.0	830.0	589.5	19894.4	20231.9	20063.2
6	355	6.84	9.09	7.97	0.00251	0.00189	0.00220	4789	7551	6170.0	1.91	4.00	2.95	246.8	320.0	283.4	11013.5	18052.8	14533.1	277.0	329.4	303.2	10702.2	17795.5	14248.8
7	538	8.27	8.41	8.34	0.00223	0.00239	0.00231	6612	6248	6430.0	2.97	2.61	2.79	285.1	254.0	269.5	15239.5	14114.9	14677.2	310.9	302.0	306.5	14898.8	14084.7	14491.7
8	400	9.75	9.67	9.71	0.00226	0.00213	0.00219	7706	7844	7775.0	3.41	3.68	3.55	302.0	806.4	554.2	18246.6	20480.6	19363.6	329.4	806.4	567.9	18308.8	19747.7	19028.3
9	447	5.44	10.27	7.86	0.00262	0.00221	0.00241	3430	7486	5458.0	1.31	3.39	2.35	213.6	830.0	521.8	7928.5	23040.6	15484.6	254.0	830.0	542.0	7741.0	22154.6	14947.8
10	546	9.26	12.10	10.68	0.00293	0.00198	0.00246	9283	9736	9509.5	3.17	4.92	4.04	339.0	783.4	561.2	23053.4	27713.5	25383.5	359.2	783.4	571.3	23102.9	26885.2	24994.1
11	434	9.59	9.90	9.74	0.00241	0.00220	0.00230	7203	8441	7822.0	2.99	3.84	3.41	320.0	329.4	324.7	18437.8	20488.3	19463.1	329.4	339.0	334.2	18208.8	20057.1	19132.9
12	405	10.07	11.39	10.73	0.00199	0.00212	0.00206	8164	9265	8714.5	4.10	4.37	4.24	329.4	349.0	339.2	20580.0	22648.4	21614.2	349.0	359.2	354.1	20403.2	22520.3	21461.7
13	368	10.17	9.68	9.92	0.00224	0.00186	0.00205	7892	8405	8148.5	3.52	4.52	4.02	329.4	339.0	334.2	19668.6	20284.7	19976.6	349.0	349.0	349.0	19657.3	20065.5	19861.4
14	352	5.81	7.99	6.90	0.00270	0.00241	0.00256	3362	6041	4701.5	1.25	2.51	1.88	219.8	806.4	513.1	8794.6	18482.5	13638.5	261.4	806.4	533.9	8364.6	17589.8	12977.2
15	427	8.26	9.38	8.82	0.00268	0.00203	0.00236	6457	7868	7162.5	2.41	3.88	3.14	293.4	329.4	311.4	15123.1	19259.9	17191.5	310.9	339.0	325.0	14561.0	18798.8	16679.9
16	616	12.08	12.43	12.26	0.00197	0.00193	0.00195	11041	11663	11352.0	5.60	6.04	5.82	2031.9	369.7	1200.8	11566.5	27066.6	19316.6	349.0	380.6	364.8	11015.9	26871.9	18943.9
17	396	5.46	6.22	5.84	0.00275	0.00247	0.00261	3171	4324	3747.5	1.15	1.75	1.45	207.5	783.4	495.4	7914.7	10307.1	9110.9	246.8	783.4	515.1	7617.1	9910.4	8763.7
18	377	6.47	8.36	7.42	0.00259	0.00211	0.00235	4374	6526	5450.0	1.69	3.09	2.39	239.7	806.4	523.0	10246.5	17966.2	14106.3	269.1	830.0	549.5	9823.9	17433.1	13628.5
19	415	7.97	8.53	8.25	0.00203	0.00228	0.00216	6495	6511	6503.0	3.20	2.86	3.03	277.0	261.4	269.2	14539.4	14775.2	14657.3	310.9	302.0	306.5	14282.4	14631.5	14457.0
20	394	8.36	8.75	8.56	0.00227	0.00228	0.00228	6024	6534	6279.0	2.65	2.87	2.76	293.4	830.0	561.7	15004.7	16789.4	15897.0	310.9	830.0	570.4	14857.5	16249.5	15553.5
21	359	7.78	9.39	8.59	0.00245	0.00178	0.00211	5851	8218	7034.5	2.39	4.62	3.50	261.4	349.0	305.2	13393.0	20365.7	16879.4	302.0	359.2	330.6	13221.8	20126.9	16674.4
22	418	9.62	10.52	10.07	0.00224	0.00171	0.00198	7676	9014	8345.0	3.43	5.27	4.35	310.9	1708.6	1009.7	18778.3	24311.4	21544.8	339.0	369.7	354.4	18623.5	22767.9	20695.7
23	659	8.09	8.24	8.16	0.00258	0.00258	0.00258	6026	7685	6855.5	2.34	2.98	2.66	783.4	830.0	806.7	14917.2	20074.4	17495.8	783.4	830.0	806.7	14419.5	19133.8	16776.6
24	724	11.70	11.72	11.71	0.00222	0.00208	0.00215	9814	10107	9960.5	4.42	4.86	4.64	339.0	349.0	344.0	23281.1	22905.1	23093.1	359.2	359.2	359.2	22987.4	22517.8	22752.6
25	546	9.86	9.91	9.89	0.00242	0.00227	0.00235	7661	7525	7593.0	3.17	3.31	3.24	310.9	320.0	315.4	19632.9	18496.4	19064.7	329.4	329.4	329.4	19182.3	18298.4	18740.3
26	463	9.15	9.16	9.16	0.00241	0.00238	0.00240	6886	6609	6747.5	2.86	2.78	2.82	302.0	830.0	566.0	16750.8	18098.9	17424.8	320.0	830.0	575.0	16646.0	17765.5	17205.7
27	325	9.76	10.01	9.88	0.00203	0.00215	0.00209	8231	7939	8085.0	4.05	3.69	3.87	320.0	339.0	329.5	19515.5	19008.6	19262.1	339.0	339.0	339.0	19057.6	18929.1	18993.4
28	461	7.82	7.59	7.71	0.00233	0.00259	0.00246	6099	5723	5911.0	2.62	2.21	2.41	269.1	269.1	269.1	13728.5	12658.4	13193.4	293.4	285.1	289.3	13252.7	12442.6	12847.6
29	462	10.57	12.94	11.75	0.00194	0.00183	0.00189	9042	13180	11111.0	4.66	7.20	5.93	329.4	391.7	360.5	22299.0	28509.1	25404.0	359.2	403.2	381.2	22194.5	28537.2	25365.9
30	413	7.57	9.36	8.46	0.00204	0.00227	0.00215	6038	7102	6570.0	2.96	3.13	3.04	261.4	310.9	286.2	13468.1	17272.8	15370.5	302.0	329.4	315.7	13352.2	17212.2	15282.2

Tabela 34 - Parâmetros obtidos das curvas do microfone – 30°, segunda etapa.

Microfone de eletreto - 40° (Segunda etapa)																									
Manga		Parâmetros dimensionais da forma de onda											Espectro de Resposta ao Choque (Shock Response Spectrum)												
		Área			Tempo total (Tt)			Amplitude (Amp)			Inclinação (Inc) x 10 ⁵			Freq +			Amplitude +			Freq -			Amplitude -		
		L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média	L1	L2	Média
Nº	Peso (g)	(ua)			(s)			(uam)			(uam/s)			(Hz)			(uam)			(Hz)			(uam)		
1	389	14.77	15.85	15.31	0.00201	0.00188	0.00194	14906	16109	15508	7.42	8.57	7.99	369.7	359.2	364.5	32023.9	36891.4	34457.6	339.0	391.7	365.4	32207.9	36776.4	34492.2
2	460	11.58	14.90	13.24	0.00224	0.00179	0.00202	10002	12843	11423	4.47	7.17	5.82	329.4	380.6	355.0	22379.7	30404.6	26392.2	302.0	380.6	341.3	22300.4	31292.6	26796.5
3	464	13.17	15.23	14.20	0.00235	0.00201	0.00218	11350	13415	12383	4.83	6.67	5.75	349.0	359.2	354.1	26462.0	31618.6	29040.3	320.0	369.7	344.9	26847.3	31655.8	29251.6
4	415	11.19	11.75	11.47	0.00219	0.00247	0.00233	9642	9470	9556	4.40	3.83	4.12	329.4	1708.6	1019.0	21296.4	21473.2	21384.8	302.0	329.4	315.7	21379.9	20680.2	21030.0
5	430	14.27	14.63	14.45	0.00206	0.00208	0.00207	13091	12012	12552	6.35	5.77	6.06	369.7	349.0	359.3	30821.9	29183.6	30002.7	339.0	369.7	354.4	30736.5	29138.3	29937.4
6	355	9.93	13.85	11.89	0.00234	0.00213	0.00223	8285	12496	10391	3.54	5.87	4.70	302.0	339.0	320.5	16943.4	28674.4	22808.9	277.0	359.2	318.1	17033.7	28499.9	22766.8
7	538	12.05	10.24	11.14	0.00244	0.00321	0.00283	10490	10248	10369	4.30	3.19	3.75	302.0	285.1	293.6	23497.4	21363.4	22430.4	329.4	320.0	324.7	23421.7	21968.5	22695.1
8	400	14.10	14.57	14.33	0.00211	0.00202	0.00206	12124	12495	12310	5.75	6.19	5.97	359.2	806.4	582.8	28689.5	31861.6	30275.5	329.4	806.4	567.9	28199.3	30648.4	29423.9
9	447	8.06	14.88	11.47	0.00289	0.00213	0.00251	5769	12276	9023	2.00	5.76	3.88	269.1	1612.7	940.9	11922.3	31977.0	21949.6	226.3	830.0	528.1	11977.7	29575.6	20776.6
10	546	13.37	14.33	13.85	0.00254	0.00293	0.00274	14704	16106	15405	5.79	5.50	5.64	359.2	1810.2	1084.7	34350.0	38287.3	36318.7	380.6	1708.6	1044.6	34920.8	37761.3	36341.0
11	434	13.54	14.41	13.98	0.00198	0.00191	0.00195	11932	13528	12730	6.03	7.08	6.55	329.4	339.0	334.2	28396.5	31381.3	29888.9	359.2	369.7	364.5	28420.8	31216.9	29818.8
12	405	14.74	16.10	15.42	0.00190	0.00200	0.00195	13157	14042	13600	6.92	7.02	6.97	339.0	359.2	349.1	31330.5	33630.3	32480.4	369.7	380.6	375.1	31734.2	33611.6	32672.9
13	368	14.38	15.03	14.71	0.00216	0.00207	0.00212	12135	13358	12747	5.62	6.45	6.04	339.0	359.2	349.1	29206.7	31793.8	30500.2	369.7	380.6	375.1	29601.9	31703.1	30652.5
14	352	8.78	12.09	10.43	0.00250	0.00206	0.00228	5995	9768	7882	2.40	4.74	3.57	246.8	830.0	538.4	14150.2	25743.2	19946.7	285.1	830.0	557.5	13863.7	24591.9	19227.8
15	427	12.33	13.72	13.03	0.00214	0.00185	0.00199	10676	12262	11469	4.99	6.63	5.81	310.9	339.0	325.0	24744.9	29456.2	27100.6	339.0	359.2	349.1	24315.0	29166.5	26740.7
16	616	17.41	17.80	17.60	0.00188	0.00184	0.00186	17233	18593	17913	9.17	10.10	9.64	380.6	391.7	386.1	37983.1	40655.8	39319.4	403.2	403.2	403.2	38881.8	40906.3	39894.0
17	396	8.25	9.19	8.72	0.00287	0.00228	0.00257	5599	7487	6543	1.95	3.28	2.62	246.8	277.0	261.9	12692.8	15405.0	14048.9	269.1	293.4	281.3	12530.1	15596.6	14063.3
18	377	9.89	11.80	10.84	0.00237	0.00198	0.00218	8156	10269	9213	3.44	5.19	4.31	261.4	830.0	545.7	16526.2	25619.2	21072.7	285.1	830.0	557.5	16140.7	24995.4	20568.0
19	415	12.45	12.73	12.59	0.00187	0.00216	0.00202	11021	10640	10831	5.89	4.93	5.41	310.9	320.0	315.4	24507.4	23577.6	24042.5	339.0	329.4	334.2	24500.3	23549.1	24024.7
20	394	11.59	11.81	11.70	0.00229	0.00188	0.00209	9210	10094	9652	4.02	5.37	4.70	302.0	830.0	566.0	21754.5	23712.2	22733.4	329.4	339.0	334.2	21887.7	23905.5	22896.6
21	359	11.72	15.47	13.60	0.00235	0.00198	0.00217	9939	14230	12085	4.23	7.19	5.71	293.4	369.7	331.6	21268.2	33493.4	27380.8	320.0	391.7	355.9	21426.7	33564.6	27495.6
22	418	13.93	14.69	14.31	0.00210	0.00165	0.00188	12502	14385	13444	5.95	8.72	7.34	339.0	369.7	354.4	29018.8	33393.3	31206.0	359.2	380.6	369.9	29204.2	33145.0	31174.6
23	659	11.54	13.65	12.60	0.00242	0.00201	0.00221	9807	12277	11042	4.05	6.11	5.08	293.4	1810.2	1051.8	21121.4	27531.5	24326.5	310.9	1708.6	1009.7	20713.0	26837.2	23775.1
24	724	15.82	17.44	16.63	0.00178	0.00195	0.00186	14307	15010	14659	8.04	7.70	7.87	349.0	369.7	359.3	34156.1	35863.2	35009.7	380.6	380.6	380.6	34540.7	35993.3	35267.0
25	546	14.59	14.09	14.34	0.00230	0.00215	0.00223	12099	11449	11774	5.26	5.33	5.29	320.0	339.0	329.5	29583.2	27496.2	28539.7	359.2	359.2	359.2	29766.5	27613.8	28690.1
26	463	13.25	12.74	12.99	0.00234	0.00193	0.00214	11072	10766	10919	4.73	5.58	5.15	320.0	329.4	324.7	25239.1	25651.6	25445.3	339.0	339.0	339.0	25381.3	25780.8	25581.1
27	325	14.15	14.36	14.25	0.00225	0.00203	0.00214	13091	12526	12809	5.82	6.17	5.99	339.0	349.0	344.0	29787.7	28828.7	29308.2	359.2	359.2	359.2	29547.7	28690.3	29119.0
28	461	11.17	10.67	10.92	0.00261	0.00222	0.00241	10241	9265	9753	3.92	4.17	4.05	285.1	293.4	289.3	21558.9	19523.3	20541.1	320.0	302.0	311.0	21437.2	19329.5	20383.4
29	462	15.71	18.83	17.27	0.00179	0.00172	0.00176	15672	20966	18319	8.76	12.19	10.47	349.0	403.2	376.1	35009.7	44092.3	39551.0	391.7	427.2	409.4	35714.7	44623.6	40169.2
30	413	11.74	13.81	12.77	0.00230	0.00216	0.00223	9844	11282	10563	4.28	5.22	4.75	310.9	329.4	320.1	21716.1	26536.2	24126.1	329.4	349.0	339.2	21911.5	26835.6	24373.5

Tabela 35 - Parâmetros obtidos das curvas do microfone – 40°, segunda etapa.

Na Figura 104 é mostrado um exemplo de uma boa correlação linear entre um dos parâmetros estudados do microfone de eletreto, a amplitude do lado 1 (40°) e o parâmetro combinado de referência, **TA/FC4mm**, ($r = 0,90$). Observa-se também baixa heterocedasticidade, o que sugere a utilização deste parâmetro combinado como referência para estimativa não-destrutiva de firmeza de mangas *Tommy Atkins*.

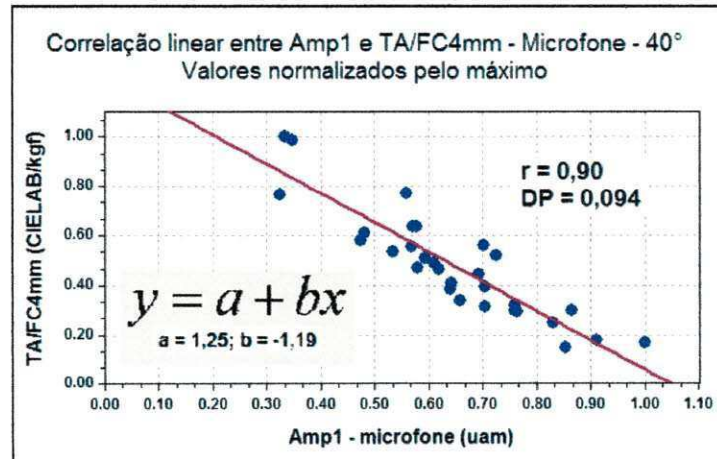


Figura 104 - Correlação linear entre Amp1 e o parâmetro combinado TA/FC4mm do microfone, 40°.

Tabela 36 - Coeficientes de correlação linear entre parâmetros de referência (colunas) e parâmetros calculados da onda 2 do microfone (linhas), 15°, segunda etapa

Coeficientes de correlação linear - Microfone - 15° (Segunda etapa)												
Parâmetros não-destrutivos	Parâmetros de referência (métodos destrutivos)											
	L*a*b*	TA	FC4mm	FC2mm	FPerf	L*a*b*/FC4mm	L*a*b*/FC2mm	L*a*b*/FPerf	TA/FC4mm	TA/FC2mm	TA/FPerf	Média ABS
Área lado 1 - A1	-0,62	-0,62	0,79	0,78	0,55	-0,75	-0,72	-0,60	-0,77	-0,73	-0,60	0,683
Área lado 2 - A2	-0,43	-0,43	0,48	0,49	0,51	-0,34	-0,41	-0,29	-0,33	-0,42	-0,30	0,404
Área média - Am	-0,61	-0,61	0,74	0,74	0,62	-0,64	-0,66	-0,52	-0,65	-0,67	-0,53	0,636
Tempo total 1 - Tt1	0,46	0,48	-0,53	-0,50	-0,41	0,57	0,60	0,46	0,58	0,61	0,46	0,515
Tempo total 2 - Tt2	-0,08	-0,11	-0,07	-0,05	-0,04	0,05	0,06	-0,01	0,08	0,08	0,00	0,058
Tempo médio - Tm	0,29	0,29	-0,42	-0,39	-0,32	0,44	0,47	0,33	0,47	0,49	0,34	0,385
Amplitude lado 1 - Amp1	-0,62	-0,62	0,79	0,78	0,53	-0,77	-0,75	-0,63	-0,78	-0,76	-0,62	0,695
Amplitude lado 2 - Amp2	-0,59	-0,60	0,64	0,62	0,65	-0,49	-0,55	-0,42	-0,48	-0,54	-0,43	0,546
Amplitude média - Ampm	-0,69	-0,69	0,81	0,79	0,66	-0,72	-0,74	-0,60	-0,72	-0,74	-0,60	0,704
Inclinação lado 1 - Inc1	-0,63	-0,63	0,78	0,74	0,54	-0,74	-0,73	-0,62	-0,76	-0,73	-0,62	0,683
Inclinação lado 2 - Inc2	0,45	0,44	0,55	0,51	0,55	-0,42	0,45	0,34	-0,42	-0,45	-0,35	0,449
Inclinação média - Incm	-0,62	-0,62	0,76	0,72	0,63	-0,67	-0,68	-0,55	-0,68	-0,68	-0,56	0,652
Amp. ERC+ lado 1 - Amp+1	-0,66	-0,66	0,80	0,82	0,57	-0,76	-0,74	-0,64	-0,77	-0,74	-0,63	0,707
Amp. ERC+ lado 2 - Amp+2	-0,50	-0,52	0,49	0,47	0,50	-0,31	-0,36	-0,30	-0,29	-0,34	-0,30	0,400
Amp. ERC+ média - A+m	-0,67	-0,68	0,74	0,74	0,62	-0,61	-0,62	-0,53	-0,60	-0,61	-0,53	0,632
Amp. ERC- lado 1 - Amp-1	-0,66	-0,65	0,81	0,83	0,56	-0,77	-0,75	-0,64	-0,77	-0,75	-0,63	0,710
Amp. ERC- lado 2 - Amp-2	-0,50	-0,52	0,49	0,47	0,51	-0,31	-0,36	-0,30	-0,29	-0,34	-0,30	0,401
Amp. ERC- média - A-m	-0,67	-0,68	0,75	0,74	0,62	-0,61	-0,63	-0,53	-0,60	-0,62	-0,53	0,635
Mínimo	0,46	0,48	0,81	0,83	0,66	0,57	0,60	0,46	0,58	0,61	0,46	
Máximo	-0,69	-0,69	-0,53	-0,50	-0,41	-0,77	-0,75	-0,64	-0,78	-0,76	-0,63	
Média de absolutos	0,54	0,55	0,64	0,62	0,52	0,55	0,57	0,46	0,56	0,57	0,46	

Tabela 37 - Coeficientes de correlação linear entre parâmetros de referência (colunas) e parâmetros calculados da onda 2 do microfone (linhas), 30°, segunda etapa.

Parâmetros não-destrutivos	Coeficientes de correlação linear - Microfone - 30° (Segunda etapa)											
	Parâmetros de referência (métodos destrutivos)											
	L'a'b'	TA	FC4mm	FC2mm	FPerf	L'a'b'/FC4mm	L'a'b'/FC2mm	L'a'b'/FPerf	TA/FC4mm	TA/FC2mm	TA/FPerf	Média ABS
Área lado 1 - A1	-0,66	-0,64	0,81	0,83	0,59	-0,84	-0,81	-0,70	-0,85	-0,81	-0,70	0,750
Área lado 2 - A2	-0,74	-0,77	0,79	0,78	0,76	-0,67	-0,71	-0,63	-0,66	-0,70	-0,64	0,714
Área média - Am	-0,75	-0,75	0,86	0,86	0,72	-0,81	-0,82	-0,71	-0,81	-0,81	-0,72	0,785
Tempo total 1 - Tt1	0,32	0,26	-0,40	-0,33	-0,29	0,46	0,43	0,28	0,46	0,42	0,27	0,357
Tempo total 2 - Tt2	0,38	0,43	-0,46	-0,42	-0,46	0,39	0,41	0,43	0,42	0,42	0,47	0,426
Tempo médio - Tm	0,44	0,44	-0,54	-0,48	-0,47	0,54	0,53	0,45	0,56	0,53	0,46	0,496
Amplitude lado 1 - Amp1	-0,78	-0,76	0,89	0,87	0,70	-0,89	-0,87	-0,75	-0,89	-0,85	-0,74	0,817
Amplitude lado 2 - Amp2	-0,71	-0,73	0,79	0,79	0,79	-0,68	-0,72	-0,62	-0,68	-0,71	-0,64	0,713
Amplitude média - Ampm	-0,79	-0,79	0,89	0,88	0,79	-0,84	-0,84	-0,73	-0,84	-0,83	-0,74	0,815
Inclinação lado 1 - Inc1	-0,73	-0,69	0,84	0,79	0,67	-0,84	-0,80	-0,68	-0,84	-0,78	-0,67	0,757
Inclinação lado 2 - Inc2	-0,66	-0,68	0,73	0,72	0,76	-0,62	-0,65	-0,60	-0,63	-0,65	-0,63	0,665
Inclinação média - Incm	-0,75	-0,75	0,85	0,81	0,78	-0,78	-0,78	-0,69	-0,78	-0,77	-0,70	0,767
Amp. ERC+ lado 1 - Amp+1	-0,64	-0,66	0,63	0,70	0,56	-0,78	-0,76	-0,65	-0,77	-0,76	-0,64	0,687
Amp. ERC+ lado 2 - Amp+2	-0,65	-0,69	0,68	0,68	0,69	-0,53	-0,59	-0,53	-0,51	-0,58	-0,54	0,605
Amp. ERC+ média - A+m	-0,75	-0,78	0,75	0,80	0,72	-0,75	-0,78	-0,68	-0,74	-0,77	-0,68	0,745
Amp. ERC- lado 1 - Amp-1	-0,64	-0,65	0,62	0,70	0,56	-0,77	-0,76	-0,64	-0,77	-0,75	-0,63	0,680
Amp. ERC- lado 2 - Amp-2	-0,67	-0,70	0,71	0,70	0,71	-0,56	-0,62	-0,54	-0,55	-0,60	-0,56	0,629
Amp. ERC- média - A-m	-0,75	-0,78	0,76	0,80	0,73	-0,77	-0,79	-0,68	-0,76	-0,78	-0,68	0,752
Mínimo	0,44	0,44	0,89	0,88	0,79	0,54	0,53	0,45	0,56	0,53	0,47	
Máximo	-0,79	-0,79	-0,54	-0,48	-0,47	-0,89	-0,87	-0,75	-0,89	-0,85	-0,74	
Média de absolutos	0,66	0,66	0,72	0,72	0,65	0,69	0,70	0,61	0,70	0,70	0,62	

Tabela 38 - Coeficientes de correlação linear entre parâmetros de referência (colunas) e parâmetros calculados da onda 2 do microfone (linhas), 40°, segunda etapa.

Parâmetros não-destrutivos	Coeficientes de correlação linear - Microfone - 40° (Segunda etapa)											
	Parâmetros de referência (métodos destrutivos)											
	L'a'b'	TA	FC4mm	FC2mm	FPerf	L'a'b'/FC4mm	L'a'b'/FC2mm	L'a'b'/FPerf	TA/FC4mm	TA/FC2mm	TA/FPerf	Média ABS
Área lado 1 - A1	-0,69	-0,67	0,82	0,80	0,62	-0,85	-0,83	-0,71	-0,86	-0,82	-0,70	0,760
Área lado 2 - A2	-0,59	-0,59	0,65	0,71	0,63	-0,56	-0,63	-0,54	-0,56	-0,63	-0,55	0,604
Área média - Am	-0,70	-0,68	0,80	0,82	0,67	-0,77	-0,79	-0,68	-0,77	-0,79	-0,68	0,741
Tempo total 1 - Tt1	0,44	0,40	-0,59	-0,62	-0,43	0,64	0,63	0,50	0,66	0,64	0,50	0,550
Tempo total 2 - Tt2	-0,07	-0,10	-0,07	-0,07	-0,03	0,07	0,04	0,02	0,10	0,06	0,04	0,061
Tempo médio - Tm	0,20	0,16	-0,37	-0,39	-0,26	0,40	0,37	0,29	0,43	0,39	0,30	0,323
Amplitude lado 1 - Amp1	-0,79	-0,78	0,89	0,85	0,74	-0,90	-0,88	-0,76	-0,90	-0,87	-0,76	0,831
Amplitude lado 2 - Amp2	-0,71	-0,74	0,77	0,75	0,81	-0,65	-0,69	-0,63	-0,65	-0,68	-0,66	0,705
Amplitude média - Ampm	-0,80	-0,81	0,88	0,85	0,82	-0,82	-0,83	-0,74	-0,82	-0,82	-0,75	0,814
Inclinação lado 1 - Inc1	-0,74	-0,72	0,86	0,84	0,73	-0,85	-0,82	-0,73	-0,85	-0,81	-0,73	0,789
Inclinação lado 2 - Inc2	-0,52	-0,52	0,62	0,61	0,66	-0,53	-0,55	-0,49	-0,54	-0,55	-0,52	0,556
Inclinação média - Incm	-0,67	-0,66	0,79	0,77	0,74	-0,73	-0,73	-0,65	-0,74	-0,72	-0,66	0,714
Amp. ERC+ lado 1 - Amp+1	-0,77	-0,77	0,88	0,84	0,70	-0,89	-0,86	-0,75	-0,90	-0,84	-0,75	0,814
Amp. ERC+ lado 2 - Amp+2	-0,66	-0,69	0,71	0,71	0,73	-0,58	-0,64	-0,58	-0,57	-0,63	-0,60	0,646
Amp. ERC+ média - A+m	-0,78	-0,79	0,86	0,85	0,78	-0,81	-0,82	-0,73	-0,81	-0,80	-0,74	0,796
Amp. ERC- lado 1 - Amp-1	-0,77	-0,77	0,88	0,85	0,71	-0,89	-0,85	-0,75	-0,89	-0,84	-0,75	0,814
Amp. ERC- lado 2 - Amp-2	-0,67	-0,69	0,74	0,74	0,74	-0,62	-0,66	-0,59	-0,62	-0,66	-0,62	0,669
Amp. ERC- média - A-m	-0,78	-0,78	0,87	0,85	0,78	-0,82	-0,82	-0,72	-0,82	-0,81	-0,73	0,799
Mínimo	0,44	0,40	0,89	0,85	0,82	0,64	0,63	0,50	0,66	0,64	0,50	
Máximo	-0,80	-0,81	-0,59	-0,62	-0,43	-0,90	-0,88	-0,76	-0,90	-0,87	-0,76	
Média de absolutos	0,63	0,63	0,73	0,72	0,64	0,69	0,69	0,60	0,69	0,69	0,61	

4.8. CONCLUSÃO

Este capítulo é relativo ao estudo de sensores de baixo custo e desenvolvimento de metodologias de aquisição e processamento de dados para a estimativa não-destrutiva de firmeza de mangas *Tommy Atkins*. Após os trabalhos experimentais e análise dos dados coletados, com a utilização de diversas ferramentas computacionais, as conclusões estão descritas nos itens a seguir.

4.8.1. FACS1

A placa FACS1, projetada como parte deste trabalho de pesquisa, constituiu-se numa contribuição para as tarefas de aquisição de dados analógicos, a baixo custo. Com a FACS1, uma placa de som de boa qualidade e um programa de processamento de sinais de áudio, é possível a construção de um sistema de coleta de dados, de baixo custo, para uma grande variedade de sensores de diversas grandezas físicas. No caso específico da captura dos sinais do acelerômetro e microfone de eletreto, a placa atendeu às necessidades de aquisição de dados deste trabalho. O esquema elétrico, o *layout* da placa de circuito impresso e a lista de componentes estarão disponíveis gratuitamente, permitindo a reprodução da placa e sua possível aplicação em diversas outras pesquisas correlatas.

4.8.2. Placas de som como conversores analógico/digitais

As placas de som internas dos *notebooks* utilizados atenderam às necessidades de conversão analógico/digital deste trabalho. Testes demonstraram que as principais características técnicas foram suficientes para garantir uma boa fidelidade dos sinais capturados. As placas de som, juntamente com a placa FACS1 e o programa de áudio gratuito *Audacity*, constituíram-se, assim, num sistema de aquisição de sinais analógicos de baixo custo, fácil configuração, fácil utilização e bom desempenho, tanto relativo à taxa de amostragem, que pode chegar a 192 kHz, quanto em relação à resolução do conversor A/D, típica de 16 bits, que permitiu a captura de detalhes das formas de onda dos sensores testados.

4.8.3. Parâmetros destrutivos de referência de firmeza de mangas *Tommy Atkins*

Os parâmetros de referência, cor da polpa e forças de penetração e compressão apresentaram, isoladamente, correlações não-lineares e com heterocedasticidade mais elevadas do que as obtidas com um novo parâmetro de referência proposto, o quociente TA/FC4mm, que é o quociente entre o valor representativo do tom amarelado da polpa (em unidades CIELAB) e a força máxima de compressão para uma profundidade de 4 mm (em kgf).

Esta nova referência, chamada de parâmetro combinado, também linearizou a correlação com os sinais dos sensores sob teste, além de mantê-la em níveis iguais os superiores aos obtidos com os parâmetros dimensionais tradicionais: amplitude, largura da curva, área, inclinação.

4.8.4. Espectro de Resposta ao Choque

O bom desempenho do espectro de resposta ao choque dos sinais capturados do acelerômetro e do microfone de eletreto, se comparado ao desempenho da análise dos parâmetros dimensionais tradicionais (amplitude, inclinação, entre outros) trouxe uma nova contribuição à análise das formas de onda dos sensores utilizados na estimativa de firmeza de frutas pela técnica de impacto de pequena massa. O ERC poderá ser utilizado, também, nas análises de sinais de resposta acústica e até mesmo no estudo de ondas sonoras que atravessem a fruta, ou em uma combinação de vários destas técnicas, com foco na melhoria do desempenho global da estimativa não-destrutiva de firmeza de frutas.

4.8.5. Influência da curvatura da fruta no ponto de impacto

As diferenças entre as correlações do lado 1 (bico) e do lado 2 (oposto ao bico) sugerem que a curvatura da fruta tem grande influência nos sinais capturados. Maiores estudos devem ser realizados, inclusive com a possibilidade de captura de uma imagem superior do local de impacto do bastão na fruta, que

permita o cálculo automático do ângulo de curvatura da fruta naquele ponto, informação esta que pode ser utilizada em uma fusão sensorial que melhore a estimativa de firmeza.

4.8.6. Desempenho do acelerômetro

O acelerômetro utilizado, fixado próximo ao centro de percussão de um bastão, atuou como sensor de aceleração na técnica de estimativa não-destrutiva de firmeza de fruta com impacto de pequena massa. Teve um bom desempenho global, em torno de $r = 0,90$ com o parâmetro combinado. Demonstrou-se a viabilidade de utilização de acelerômetros *MEMS* de baixo custo nesta aplicação. Uma desvantagem foi a pequena banda passante, que não permitiu a captura de detalhes da aceleração no impacto, no entanto, parâmetros extraídos do espectro de resposta ao choque da forma de onda deste sensor apresentaram as melhores correlações com os parâmetros de referência. O acelerômetro constituiu-se, assim, em um sensor de fácil utilização e baixo custo, adequado para a proposta de desenvolvimento de equipamentos de baixo custo para seleção e classificação de frutas.

4.8.7. Desempenho do microfone de eletreto

O microfone de eletreto utilizado, também fixado próximo ao centro de percussão do mesmo bastão onde foi fixado o acelerômetro, atuou como segundo sensor de aceleração na técnica de estimativa não-destrutiva de firmeza de fruta com impacto de pequena massa. Teve um bom desempenho global, também em torno de $r = 0,90$ com o parâmetro combinado. Demonstrou-se a viabilidade de utilização de um microfone de eletreto funcionando como um acelerômetro e alta correlação de parâmetros semelhantes extraídos dos dois sensores (acelerômetro e microfone) no registro simultâneo do mesmo impacto ($r > 0,99$).

O microfone de eletreto é um sensor de custo ainda menor do que o do acelerômetro *MEMS* utilizado. Uma vantagem confirmada foi a maior banda passante daquele, o que permitiu a captura de maiores detalhes das formas de onda da aceleração no impacto. A amplitude da maior onda do sinal do microfone

apresentou as melhores correlações com os parâmetros de referência. O microfone de eletreto constituiu-se, assim, em um sensor de fácil utilização e baixo custo, também adequado para a proposta de desenvolvimento de equipamentos de baixo

4.8.8. Parâmetros para fusão de sinais do acelerômetro e do microfone de eletreto

Conclui-se, neste capítulo, pela viabilidade de utilização dos seguintes parâmetros a serem aplicados em uma técnica de fusão de sensores:

- TA/FC4mm como parâmetro combinado de referência para estimativa de firmeza de mangas *Tommy Atkins*;
- Amplitude (positiva, negativa ou ambas) do Espectro de Resposta ao Choque do sinal de um acelerômetro *MEMS*, posicionado no centro de percussão de um bastão, como estimador não-destrutivo de firmeza quando se utiliza a técnica de impacto de pequena massa;
- Amplitude (pico) do sinal de um microfone de eletreto, posicionado no centro de percussão de um bastão, como estimador não-destrutivo de firmeza quando se utiliza a técnica de impacto de pequena massa.

4.9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, J.A.; UPCHURCH, B.L.; STROSHINE, R.L. Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables. In: JANICK, J. (Ed.). **Horticultural reviews**. New York: John Wiley & Sons Inc, v. 20, p. 1-120. 1997. ISBN: 0471189065.

ANALOG DEVICES. **±5 g to ±50 g, Low Noise, Low Power, Single/Dual Axis MEMS® Accelerometers**. Norwood, 1998. 15p. (Folha de Especificações).

CHEN, P.; TJAN, Y. A real-time impact sensing system for on-line firmness sensing of fruits. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1998, Oslo, Norway, **Anais...** Oslo: International Commission of Agricultural Engineering, 1998, Paper 98-F-006.

CONDE, T.; CARCEL, J.A.; GARCIA-PEREZ, J.V; BENEDITO, J. Non-destructive analysis of manchego cheese texture using impact force-deformation and acoustic impulse-response techniques. **Journal of Food Engineering**, London, v. 82. p. 238-245, 2007.

COOKE, J.R. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 15, n. 6, p. 1075-1080, 1972.

DE BAERDEMAEKER, J.; LEMAITRE, L.; MEIRE, R. Quality detection by frequency spectrum analysis of the fruit impact force. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n. 1, p. 175-178, 1982.

DELWICHE, M.J. Theory of fruit firmness sorting by impact forces. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 4, p. 1160-1166, 1987.

DELWICHE, M.J.; SARIG, Y. A probe impact sensor for fruit texture measurement. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 34, n. 1, p. 187-192, 1991.

DLIENGINEERING. **Stationary signals**. Woburn, 2009. Disponível em <<http://www.dliengineering.com/vibman/stationarysignals.htm>>. Acesso em 01 nov. 2010.

GIYOUNG, K.; LEE, K.; CHOY, K. Nondestructive quality evaluation for fruits and vegetables using near-infrared spectroscopy. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON ENHANCING EXPORT COMPETITIVENESS OF ASIAN FRUITS, 1, 2006, Thailand. **Electronic Annals...** Thailand: United Nations Asian and Pacific centre for Agricultural Engineering and Machinery, 2006. Disponível em <<http://unapcaem.org/Activities%20Files/A02/Nondestructive%20Quality%20Evaluation%20paper%20at%207th%20IFVE.pdf>>. Acesso em 23 jan. 2010.

GOODWIN, S. (Org.). **NE-179: technology and principles for assessing and retaining postharvest quality of fruits and vegetables**. 2002. Disponível em: <<http://www.nimss.umd.edu/homepages/outline.cfm?trackID=23>>. Acesso em: 23 jan. 2010.

HAHN, F. Mango firmness sorter. **Biosystems Engineering**, Atlanta, v. 89, n. 3, p. 309-319, 2004.

HUNTERLAB. **The basics of color perception and measurement**. Reston, 2001. 124 slides: color. Disponível em <<http://www.hunterlab.com/pdf/color.pdf>>. Acesso em 01 fev. 2011.

HUNTERLAB. **Hunter L,a,b versus CIE 1976 L*a*b***. Reston, 2008. Disponível em <http://www.hunterlab.com/appnotes/an02_01.pdf> . Acesso em 01 fev. 2011. (Applications Note, v. 13, n. 2).

HUNTERLAB. **Yellowness Indices**. Reston, 2008a. Disponível em <http://www.hunterlab.com/appnotes/an11_96ar.pdf> . Acesso em 01 fev. 2011. (Applications Note, v. 8, n. 15).

IRVINE, T. **Shock response spectrum**. Madison: MATLAB Central, 2006. Disponível em <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7398-shock-response-spectrum>>. Acesso em 15 mar. 2011. (Programa em MATLAB).

JARIMOPAS, B.; KITTHAWEE, U. Firmness properties of mangoes. **International Journal of Food Properties**, London, v. 10, n. 4, p. 899-909, 2007.

JIAN-PING, L.; BAO-GANG, W. A study of acoustical characteristics of pine nut based on a fractal dimension method. **Journal of Zhejiang University – Science A**, Hangzhou, v. 7, n. 2, p. 357-361, 2006.

KETELAERE, B. de; HOWARTH, M.S.; CREZEE, L.; LAMMERTYN, J.; VIAENE, K.; BULENS, I.; BAERDEMAEKER, J. de. Postharvest firmness changes as measured by acoustic and low-mass impact devices: a comparison of techniques. **Postharvest Biology and Technology**, Atlanta, v. 41, n. 3, p. 275-284, 2006.

MAGNESS, J.R.; TAYLOR, G.F. **An improved type of pressure tester for the determination of fruit maturity**. Washington: USDA, 1925 (Circular 350).

MILLS, C.J. **Non-destructive testing of fruit firmness with real time constraints**. 2005, 30 f. Thesis proposal (Bachelor of Digital Systems) - School of Computer Science and Software Engineering, Monash University. Disponível em: <<http://www.csse.monash.edu.au/hons/projects/2005/Christopher.Mills/thesis.pdf>> . Acesso em: 24 jan. 2010.

NOURAIN, J.; YING, Y.; WANG, J.; RAO, X.; YU, C. Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis. **Journal of Zhejiang University SCIENCE B**, Hangzhou, v. 6, n. 6, p. 483-490. 2005. Disponível em: <www.zju.edu.cn/jzus/2005/B0506/B050607.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2010. ISSN: 1862-1783.

PALTRINIERI, G.; FIGUEROLA, F.; ROJAS, L. **Technical manual on small-scale processing of fruits and vegetables**. Santiago: Food and agriculture organization of the United Nations, 1997. 167p. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X0209e/x0209e00.htm>>. Acesso em: 23 jan. 2010.

PELEG, K. Development of a commercial fruit firmness sorter. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 72, n. 3, p. 231-238. 1999.

SHMULEVICH, I.; GALILI, N.; HOWARTH, M. S. Nondestructive dynamic testing of apples for firmness evaluation. **Postharvest Biology and Technology**, Atlanta, v. 29, n. 3, p. 287-299, 2003.

SLAUGHTER, D. **Nondestructive quality measurement of horticultural crops**. Davis, [2006]. 75 slides: color. Disponível em: <<http://ucce.ucdavis.edu/files/datastore/234-1969.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2006.

SOUSA, I.; ALMEIDA, R.; RODRIGUES, P.B.; OLIVEIRA, C.M. A small contribution to the mechanical assessment of fruit texture. **e-rheo.pt.**, v. 3, p. 1-6. 2003. Disponível em <<http://www.dep.uminho.pt/e-rheo.pt/papers/V003P001.pdf>>. Acesso em 31 jan. 2010

SUGIYAMA, J.; AL-HAQ, M.I.; TSUT, M. Application of portable acoustic firmness tester for fruits. In: FRUTIC 05 - Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production, 2005, Montpellier. **Electronic Annals...** Montpellier: Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, 2005, p. 439-444. Disponível em <<http://www.symposcience.fr/exl-doc/colloque/ART-00001687.pdf>>. Acesso em 31 jan. 2010

SUPROCK, C.; FUSSEL, B.; JERARD, R. **Fabricating an electret based accelerometer**. Durham: Design and Manufacturing Laboratory, University of New Hampshire, 2010. Disponível em: <<http://www.unh.edu/dml/videos.html>>. Acesso em: 21/11/2010.

TIMM, E.J.; BROWN, G.K.; ARMSTRONG, P.R.; BEAUDRY, R.M.; SHIRAZI, A. Portable instrument for measuring firmness of cherries and berries. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 71-77. 1996.

VALENTE, M.; LEARDI, R.; SELFA, G.; LUCIANO, G.; PAIN, J.P. Multivariate calibration of mango firmness using vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method. **Journal of Food Engineering**. London, v. 94, n. 1, p. 7-13. 2009. ISSN: 0260-8774.

WAGNER INSTRUMENTS. **Fruit Ripeness Tester**. Greenwich: [s.n.], [2011]. Disponível em <http://www.fruittest.com/ft_fruit_test.php>. Acesso em 20 jan. 2011.

CAPÍTULO 5

FUSÃO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA SELEÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MANGAS PARA EXPORTAÇÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é descrita a proposta de fusão de sensores visando a seleção e classificação da manga brasileira para exportação.

Como descrito na apresentação deste trabalho, a fusão de sensores é uma técnica que combina dados sensoriais de várias fontes com o objetivo de se reduzir a incerteza que um único sensor pode fornecer sobre uma determinada variável sob medida. Esta técnica permite a construção de um modelo mais sofisticado da interação entre diversas características de uma mesma variável ou entre características semelhantes de variáveis diferentes. Assim, pretende-se construir um modelo de fusão de sensores que permita uma melhor estimativa de um ou mais parâmetros da manga sob análise do que a estimativa obtida se fosse utilizado somente um sensor.

5.2. OBJETIVO

O objetivo deste capítulo é demonstrar a viabilidade de utilização de fusão de sensores para determinação de um índice de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, a partir de parâmetros extraídos de dados de 3 sensores diferentes, sendo uma câmera de vídeo e dois sensores de aceleração, todos de baixo custo. A técnica de fusão utilizada foi a rede neural artificial.

5.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com ELMENREICH (2002):

Como o nome indica, fusão de sensores é uma técnica pela qual os dados de vários sensores são combinados para fornecer informações

mais completas e precisas. Fusão de sensores tem uma vasta gama de aplicações, incluindo robótica, fabricação automatizada, além do sensoriamento remoto para aplicações militares, como a vigilância do campo de batalha, avaliação da situação tática e avaliação de ameaças. A tecnologia de fusão de sensores é um campo de intensa pesquisa. Estudos de visão por computador e robôs móveis costumam citar modelos de fusão biológicos, tais como os encontrados em pombos e morcegos. O aparente sucesso dessas criaturas, que utilizam sensoriamento e navegação por meio de entradas multisensoriais, indica o grande potencial do campo da fusão de sensores.

GROS (1996) apresenta uma ilustração de um dos sistemas de fusão de sensores humanos (Figura 105).

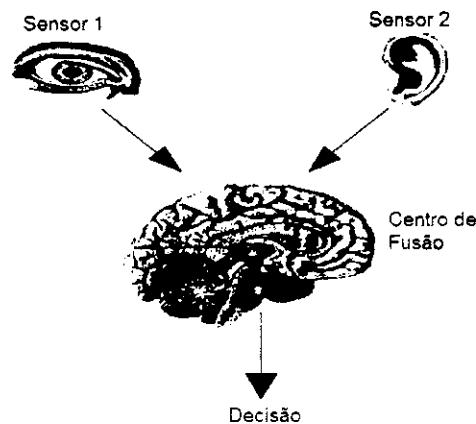


Figura 105 - Ilustração de um dos "sistemas de fusão de sensores" humanos.
Fonte: GROS (1996).

Ainda de acordo com ELMENREICH (2002), "existe alguma confusão na terminologia para os sistemas de fusão. Os termos "fusão de sensores", "fusão de dados", "fusão da informação", "fusão de dados de multi-sensores" e "integração de multi-sensores" têm sido amplamente utilizados na literatura técnica para se referir a uma variedade de técnicas, tecnologias, sistemas e aplicações que utilizam dados provenientes de múltiplas fontes de informação".

Neste trabalho, iremos utilizar a definição da Sociedade Internacional de Fusão da Informação (ISIF apud ELMENREICH, 2002):

Fusão de informação abrange teoria, técnicas e ferramentas concebidas e empregadas para explorar a sinergia nas informações adquiridas a partir de múltiplas fontes (sensores, bases de dados, informações coletadas pelos humanos, entre outras) de tal forma que a decisão resultante ou ação é, em algum sentido, melhor (qualitativa ou quantitativamente, em termos de robustez, precisão, entre outras características) do que seria possível se qualquer uma dessas fontes fossem utilizadas individualmente, sem explorar tal sinergia.

Considerou-se, então, a fusão de sensores como um subconjunto da fusão da informação, definida aqui como “a combinação de dados de sensores ou dados derivados de dados de sensores, de tal modo que a informação resultante é, em algum sentido, melhor do que seria possível quando essas fontes fossem utilizadas individualmente”.

5.3.1. Motivação para utilização da fusão de sensores

ELMENREICH (2002) cita pelo menos cinco problemas que podem ocorrer quando se utiliza um sensor isolado:

- **Quebra do sensor:** a perda de um elemento sensor provoca uma perda de percepção sobre um determinado;
- **Cobertura espacial limitada:** normalmente, um sensor individual abrange apenas uma região restrita. Por exemplo, uma leitura de um termômetro em uma caldeira fornece apenas uma estimativa da temperatura perto do termômetro e pode falhar ao processar corretamente a temperatura média da água na caldeira;
- **Cobertura temporal limitada:** alguns sensores precisam de um tempo de iniciação especial para realizar e transmitir uma medição, o que limita a frequência máxima de medições;
- **Imprecisão:** medições de sensores individuais são limitados à precisão do elemento sensor empregado;
- **Incerteza:** a incerteza, diferentemente da imprecisão, depende do objeto que está sendo observado e não do sensor. A incerteza surge quando características são perdidas (por exemplo, por interferência de outros objetos), quando o sensor não consegue medir todos os atributos relevantes da percepção,

ou quando a observação é ambígua. Um sistema único sensor é incapaz de reduzir a incerteza em sua percepção, por causa de sua visão limitada do objeto.

Por outro lado, a utilização de fusão de sensores permite aumentar o desempenho de um sistema de medida, ao menos pelas seguintes razões (ELMENREICH, 2002):

- **Robustez e confiabilidade:** uma configuração de múltiplos sensores tem uma redundância inerente, que permite que o sistema continue a fornecer informações mesmo em caso de falha parcial;
- **Aumento da cobertura espacial e temporal:** um sensor pode “olhar” para onde os outros não podem, e vice-versa, de modo que pode realizar uma medição que os outros não conseguem;
- **Aumento da confiança:** a medição de um sensor é confirmada por medições de outros sensores que cobrem o mesmo domínio;
- **Redução da ambigüidade e incerteza:** a informação conjunta reduz o conjunto de interpretações ambíguas do valor medido;
- **Robustez contra interferências:** ao aumentar a dimensionalidade do espaço de medição (por exemplo, ao medir a quantidade desejada com sensores ópticos e sensores ultrassônicos), o sistema torna-se menos vulneráveis contra interferências;
- **Melhor resolução:** quando múltiplas medições independentes da mesma propriedade são fundidas, a resolução do valor resultante é melhor do que a medição de um único sensor.

5.3.2. Desvantagens da utilização da fusão de sensores

Entre as possíveis desvantagens da utilização da fusão de sensores estão:

- **Aumento dos custos do sistema de medida**, devido ao aumento do número de sensores, do número de sinais de entrada saída e do maior custo de desenvolvimento de equipamentos e programas;
- **Aumento do tempo de reposta** do sistema como um todo, uma vez a massa de dados a tratar é muito maior;
- **Redundância desnecessária** dos múltiplos sensores, que podem estar medindo variáveis muito semelhantes;
- **Medição de sinais desnecessários ou irrelevantes**, gerando grande massa de dados que traz poucos benefícios adicionais para a tomada de decisão.

5.3.3. Arquitetura de um sistema de fusão de sensores

Os sistemas de fusão de sensores podem ser classificados, segundo a arquitetura, em centralizados (Figura 106) e distribuídos (Figura 107).

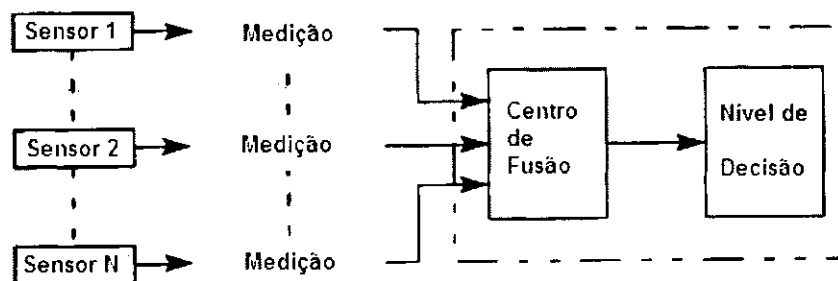


Figura 106 - Arquitetura centralizada.
Fonte: GROS (1996). Tradução do autor.

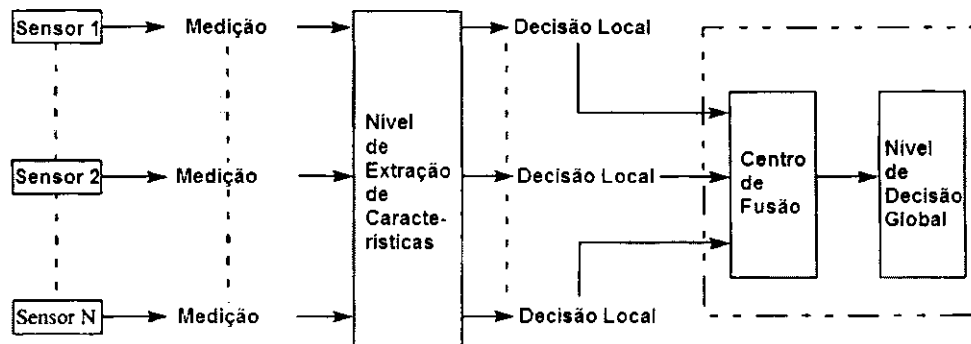


Figura 107 - Arquitetura distribuída.
 Fonte: GROS (1996). Tradução do autor.

5.3.4. Configuração da fusão de sensores

Em uma técnica de fusão, os sensores podem ser configurados de três distintas formas, descritas a seguir (DURRANT-WHYTE, 1988).

5.3.4.1. Configuração complementar

Uma configuração de sensores é dita complementar quando os sensores não dependem diretamente entre si, mas podem ser combinados de modo a fornecer uma imagem mais completa do fenômeno sob observação. Isto resolve a incompletude dos dados de um sensor isolado. Um exemplo de uma configuração complementar é o emprego de várias câmeras, cada uma observando uma parte de uma sala. Geralmente, executar a fusão de dados complementares é mais fácil, uma vez que os dados partiram de sensores independentes e podem ser anexados uns aos outros.

5.3.4.2. Configuração competitiva

Uma configuração é competitiva se cada sensor fornece medições independentes de mesma propriedade. VISSER & GROEN (1999) distinguem duas possíveis configurações competitivas: a) a fusão de dados de diferentes sensores; ou b) a fusão de medições a partir de um único sensor, tomadas em instantes diferentes. A configuração competitiva também é chamada de configuração redundante.

5.3.4.3. Configuração cooperativa

Uma rede de sensores é cooperativa quando usa as informações fornecidas por dois sensores independentes para obter informações que não estariam disponíveis a partir dos sensores individuais. Um exemplo de uma configuração cooperativa é a visão estereoscópica, derivada da combinação de imagens bidimensionais a partir de duas câmeras em pontos de vista ligeiramente diferente de uma imagem tridimensional.

5.3.5. Redes neurais

A rede neural artificial foi escolhida como técnica de fusão de sensores. A seguir tem-se uma breve introdução desta importante ferramenta de análise de dados.

5.3.5.1. Conceitos básicos

Uma rede neural artificial (RNA) é um modelo matemático inspirado na estrutura e aspectos funcionais das redes neurais biológicas. As RNA's têm proximidade conceitual com a estrutura do cérebro, uma característica não compartilhada por outros modelos matemáticos computacionais tradicionais. Assim, de maneira análoga ao cérebro, que é composto de neurônios interligados, as redes neurais são compostas de elementos de processamento interconectados, as unidades, que respondem, em paralelo, a um conjunto de sinais de entrada enviados a cada uma delas. A unidade é o equivalente do neurônio, no cérebro.

As redes neurais têm despertado cada vez mais interesse, devido aos bons resultados obtidos na análise de dados em diversas áreas do conhecimento científico e tecnológico. São cada vez mais utilizadas, devido à sua alta capacidade de análise, versatilidade e facilidade de uso.

De acordo com STATSOFT (2007):

Redes neurais são técnicas muito sofisticadas de modelamento e previsão, capazes de modelar funções e relações de dados extremamente complexas. A capacidade de aprender por exemplos é uma das muitas características de redes neurais que permite ao usuário modelar dados e estabelecer regras precisas que regem relações subjacentes entre vários atributos de dados. O usuário da rede neural reúne dados representativos e, em seguida, aplica algoritmos de treinamento que pode aprender, automaticamente, sobre a estrutura dos dados. Embora o usuário precise ter algum conhecimento heurístico sobre como selecionar e preparar adequadamente os dados da rede neural e interpretar os resultados, o nível de conhecimento necessário para aplicar com êxito as redes neurais são muito inferiores aos necessários na maioria das tradicionais ferramentas e técnicas estatísticas, especialmente quando os algoritmos da rede neural estão inseridos em programas de computador bem desenvolvidos e inteligentes, que conduzem o usuário do início ao fim com apenas alguns cliques.

As redes neurais têm uma grande capacidade de obter e extrair significados, regras e tendências a partir de dados complicados, ruidosos e imprecisos. Elas podem ser usadas para extrair padrões e detectar tendências que são regidos por funções matemáticas complicadas que são muito difíceis, senão impossíveis, de modelar usando técnicas analíticas ou paramétricas. Uma das capacidades das redes neurais é de prever com precisão os dados que não fazem parte do conjunto de dados de treinamento, um processo conhecido como generalização. Dadas estas características e sua ampla aplicabilidade, as redes neurais são adequadas para aplicações de problemas do mundo real em pesquisa científica e tecnológica, indústria e comércio. Têm sido aplicadas, com sucesso, em processamento de sinais, controle de processos, robótica, classificação, pré-processamento de dados, reconhecimento de padrões, análise de imagem e voz, diagnóstico e monitoramento médico, previsões no mercado de ações, análise de solicitações de empréstimo ou de crédito (STATSOFT, 2007).

Em uma RNA, o modelo de neurônio é feito com base na célula biológica e comporta várias entradas (Figura 108). Os sinais de entrada são multiplicados por pesos adequados e, em seguida, somados. O resultado é recalculado por uma função de ativação, que pode ser a função identidade (a mais utilizada) ou as funções linear, sigmoidal (ou logística), tangente hiperbólica, exponencial, senoidal ou gaussiana.

Quando uma unidade recebe determinado(s) sinal(is) de entrada $e_1...e_n$, fornece uma saída sp que é uma soma ponderada daqueles sinais de entrada. Ou seja, a saída $sp = f(p_1e_1 + \dots + p_n e_n)$, onde $p_1...p_n$ são os pesos e $e_1...e_n$ são as entradas ou os sinais provenientes dos neurônios da camada anterior. Ao valor sp é aplicada uma **função de ativação** para obtenção do resultado final s .

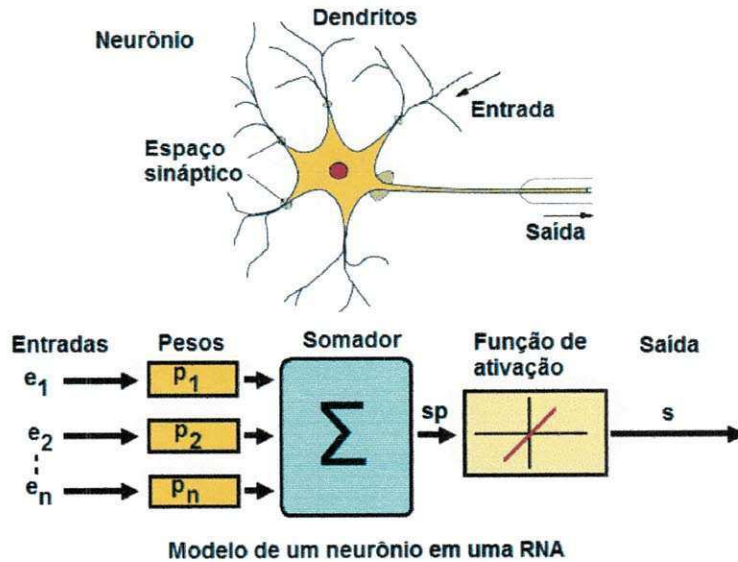


Figura 108 - Neurônio e modelo em uma RNA.

A Figura 109 é uma representação gráfica de uma rede neural direta (sem realimentação) com 3 camadas, 5 entradas, 2 saídas e 1 camada escondida.

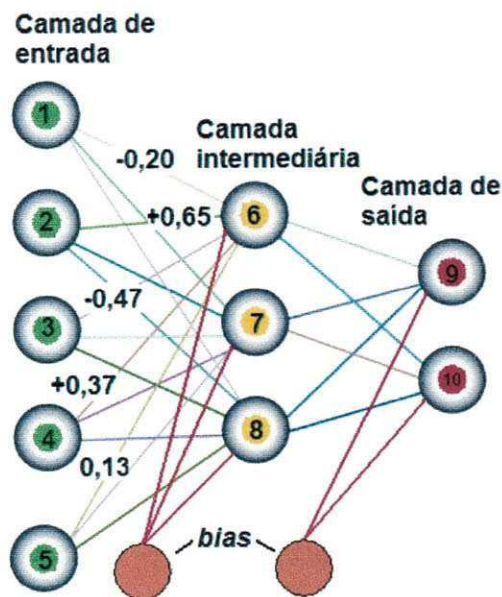


Figura 109 - Exemplo de uma rede neural direta com uma camada intermediária (escondida).

Neste exemplo, a unidade 6 recebe sinais das unidades 1 a 5 da camada de entrada, com pesos distintos, conectando sua saída aos neurônios 9 e 10. Já o neurônio 9 fornece sua saída final calculando uma outra soma ponderada dos sinais oriundos dos neurônios 6, 7 e 8, além do *bias*.

Este tipo de rede é dita direta, uma vez que não há realimentação de sinais. Atualmente, as redes neurais diretas são as mais utilizadas, principalmente pelo advento e popularização do algoritmo de treinamento *backpropagation*. A RNA direta pode ser considerada como uma aproximadora universal de funções, com nível de precisão que depende do número de neurônios e da escolha eficiente do conjunto de exemplos de treinamento. (VIEIRA & ROISEMBERG, 2004):

5.3.5.2. Tipos de RNA's

Os tipos de RNA's mais utilizados são:

- **Perceptron multicamada:** é a arquitetura mais utilizada, atualmente, onde existem, entre as camadas de entrada e saídas, camadas intermediárias escondidas. Também inclui o conceito de *bias*, que é um neurônio cuja função de ativação está permanentemente ajustada para "1". A rede mostrada na Figura 109 é deste tipo.
- **Funções de Base Radial (FBR):** esta rede difere da perceptron multicamada por possuir sempre três camadas (uma camada escondida) e os neurônios *bias* serem conectados somente à camada de saída.

5.3.5.3. Algoritmos de treinamento

Os principais algoritmos de treinamento de redes perceptron multicamada são o *backpropagation*, o *BFGS* e *Scaled Conjugated Gradient*.

Uma descrição resumida do algoritmo *backpropagation* é feita por VIEIRA & ROISEMBERG (2004):

Basicamente, a rede aprende um conjunto pré-definido de pares de exemplos de entrada/saída em ciclos de propagação/adaptação. Depois que um padrão de entrada foi aplicado como um estímulo aos elementos da primeira camada da rede, ele é propagado por cada uma das outras camadas até que a saída seja gerada. Este padrão de saída é então comparado com a saída desejada e um sinal de erro é calculado para cada elemento de saída. O sinal de erro é, então, retro-propagado da camada de saída para cada elemento da camada intermediária anterior que contribui diretamente para a formação da saída. Entretanto, cada elemento da camada intermediária recebe apenas uma porção do sinal de erro total, proporcional apenas à contribuição relativa de cada elemento na formação da saída original. Este processo se repete, camada por camada, até que cada elemento da rede receba um sinal de erro que descreva sua contribuição relativa para o erro total. Baseado no sinal de erro recebido, os pesos das conexões são então atualizados para cada elemento de modo a fazer a rede convergir para um estado que permita a codificação de todos os padrões do conjunto de treinamento

5.4. MATERIAIS E MÉTODOS

A idéia, neste trabalho, foi utilizar técnicas não-destrutivas diferentes para estimativa de firmeza e, se necessário, também a imagem superior da fruta para estimativa da massa, de modo a se realizar a fusão de todos estes dados e fornecer um índice final de firmeza da fruta que possa ser, posteriormente, aplicado em linhas de seleção e classificação reais, de baixo custo.

Na Figura 110 é apresentada a proposta de fusão de sensores deste trabalho. Podemos classificá-la como uma fusão de sensores em arquitetura distribuída, com configuração competitiva dos sensores de firmeza e cooperativa com a estimativa de massa.

O acelerômetro e o microfone de eletreto estão numa configuração competitiva, uma vez que fornecem dados de uma mesma propriedade, a estimativa de firmeza, representada pela aceleração do bastão na técnica de impacto de pequena massa. Já a câmera de vídeo captura uma imagem (uma outra propriedade do objeto) superior da fruta, para estimativa de peso sem a

necessidade de pesagem. Então, esta funcionando de forma cooperativa com aqueles outros dois sensores.

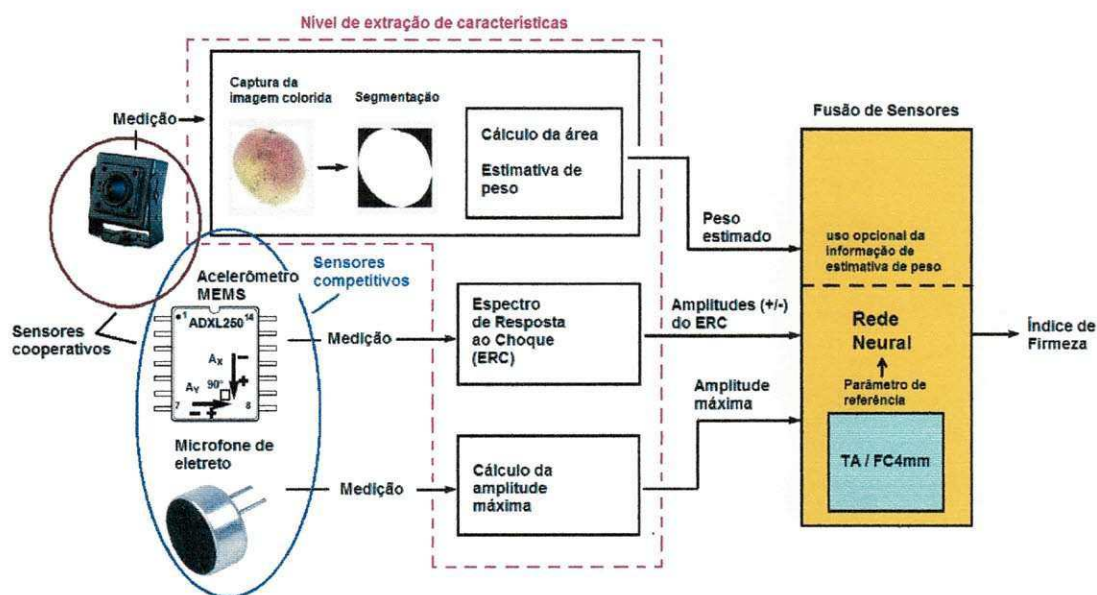


Figura 110 - Proposta de fusão de sensores.

O nível de extração de características está contido nos equipamentos e programas do sistema de seleção e classificação. Nele estão incluídas a placa FACS1 e as placas de som do(s) computador(es), além da parte do programa que calcula os parâmetros de entrada para a rede neural.

A rede neural artificial foi a técnica escolhida para a execução da fusão sensorial propriamente dita. A rede neural foi previamente treinada com um conjunto de dados de estimativa de peso, amplitude do ERC e amplitude do sinal do microfone, de modo a fornecer, na saída, um índice de firmeza da fruta.

5.4.1. Estimativa de peso da fruta

No capítulo 3 foi demonstrada a viabilidade de utilização de uma imagem superior da fruta, capturada com uma câmera de baixo custo, para estimativa de peso da fruta sem a necessidade de utilização de balanças. O parâmetro peso estimado da fruta é extraído da imagem por um programa que utiliza uma modificação adaptativa do algoritmo-padrão do Matlab®. Assim,

o peso estimado passa a ser o primeiro dado utilizado para a fusão de sensores descrita neste capítulo.

5.4.2. Estimativa de firmeza a partir dos sinais do acelerômetro e do microfone

No capítulo 4 foi demonstrada a viabilidade de utilização de um acelerômetro *MEMS* e de um microfone de eletreto vedado (funcionando como acelerômetro), para estimativa de firmeza de mangas *Tommy Atkins* na técnica de impacto de pequena massa.

Os parâmetros extraídos destes sensores foram a amplitude do ERC e a amplitude do pico da onda 2 do microfone de eletreto, que correspondem aos dois outros dados para a etapa posterior, a rede neural.

5.4.3. Conjunto de dados de entrada e saída (alvo) da rede neural

Os dados de entrada e saída da rede neural foram normalizados pelo máximo e estão apresentados na Tabela 39. As variáveis são contínuas, na faixa de 0 a 1. A amostra é constituída dos três conjuntos de valores obtidos das mangas, no Capítulo 4, além das massas das frutas, sendo que:

- a duas primeiras variáveis de entrada foram as amplitudes positivas e negativas médias do espectro de resposta ao choque;
- a terceira variável de entrada foi a amplitude média do pico da onda 2 do microfone de eletreto;
- a quarta variável de entrada foi a massa da manga;
- a variável de saída (alvo da RNA) foi o quociente $TA/FC4mm$, como referência de índice de firmeza.

5.4.4. Programa e parâmetros utilizados para treinamento

O programa utilizado para treinamento das RNA's foi o STATISTICA 8.0 (fabricante *Statsoft*), que possui um módulo específico para esta finalidade. Os parâmetros dos treinamentos realizados estão descritos na Tabela 40.

Tabela 39 - Dados de entrada e de saída (alvo) da RNA.

Manga	Entrada 1 (Amp+m) Acelerômetro	Entrada 2 (Amp-m) Acelerômetro	Entrada 3 (Ampm) Microfone	Entrada 4 Massa	Saída (Alvo) (TA/FC4mm)
1	0,93982	0,93761	0,84653	0,53729	0,29986
2	0,83379	0,82669	0,62353	0,63536	0,46768
3	0,86668	0,86158	0,67594	0,64088	0,34100
4	0,73062	0,71945	0,52164	0,57320	0,77150
5	0,88220	0,87343	0,68516	0,59392	0,31894
6	0,73806	0,73146	0,56720	0,49033	0,60992
7	0,77048	0,76344	0,56602	0,74309	0,49159
8	0,85595	0,84984	0,67195	0,55249	0,39456
9	0,70444	0,69290	0,49252	0,61740	1,00000
10	0,96811	0,96291	0,84093	0,75414	0,14981
11	0,86903	0,86309	0,69491	0,59945	0,44682
12	0,92436	0,91905	0,74237	0,55939	0,29289
13	0,87687	0,86920	0,69581	0,50829	0,31311
14	0,67606	0,66934	0,43024	0,48619	0,98909
15	0,82210	0,81928	0,62607	0,58978	0,46604
16	1,00000	1,00000	0,97784	0,85083	0,16938
17	0,59280	0,58206	0,35717	0,54696	0,76548
18	0,70393	0,69697	0,50289	0,52072	0,58183
19	0,78782	0,78197	0,59122	0,57320	0,38330
20	0,76289	0,75479	0,52688	0,54420	0,53262
21	0,81510	0,80485	0,65967	0,49586	0,63572
22	0,88410	0,87570	0,73386	0,57735	0,52148
23	0,81014	0,80503	0,60276	0,91022	0,55368
24	0,97253	0,97297	0,80018	1,00000	0,25037
25	0,86747	0,86128	0,64272	0,75414	0,55894
26	0,82091	0,81155	0,59605	0,63950	0,40669
27	0,84699	0,84428	0,69919	0,44890	0,29688
28	0,72931	0,72454	0,53240	0,63674	0,51215
29	0,98048	0,97399	1,00000	0,63812	0,17685
30	0,78227	0,77512	0,57661	0,57044	0,63662

5.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 41 são apresentados os resultados das RNA's treinadas, incluindo desempenhos (correlações) e erros, considerando-se como entradas as 3 primeiras variáveis.

Tabela 40 - Parâmetros de treinamento da RNA.

Parâmetros de treinamento da RNA	
Tipo de aplicação	Regressão
Método de amostragem	Aleatório
Tamanho da amostra de treinamento	60% (18 amostras)
Tamanho da amostra de teste	20% (6 amostras)
Tamanho da amostra de validação	20% (6 amostras)
Semente para amostragem	1000
Estratégia	Busca automática de rede
Tipos de redes testadas	Perceptron Multicamada e FBR
Número de camadas escondidas	Mínimo: 3; máximo: 7
Número de redes a treinar	30
Número de redes a reter	20
Tipo de função de erro	Soma de quadrados
Funções de ativação a testar	Identidade, logística, <i>tanh</i> e exponencial
Decaimento de pesos (mín. - max.)	0,0001 – 0,001

Tabela 41 - Redes neurais geradas com 3 entradas (sem a massa da fruta).

Nº	Nome da rede	Desempenho Treinamento	Desempenho Teste	Desempenho Validação	Erro Treinamento	Erro Teste	Erro Validação	Algoritmo	Função erro	Função ativ. escondida	Função ativ. saída
1	RBF 3-7-1	0,872	0,953	0,973	0,007	0,015	0,003	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
2	MLP 3-7-1	0,913	0,914	0,880	0,005	0,014	0,068	BFGS 15	SOS	Identidade	Exponencial
3	MLP 3-9-1	0,919	0,930	0,925	0,004	0,011	0,009	BFGS 68	SOS	Tanh.	Logística
4	RBF 3-6-1	0,871	0,946	0,968	0,007	0,015	0,003	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
5	MLP 3-6-1	0,815	0,963	0,967	0,009	0,018	0,004	BFGS 6	SOS	Identidade	Tanh.
6	RBF 3-5-1	0,753	0,985	0,689	0,012	0,023	0,015	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
7	MLP 3-5-1	0,848	0,954	0,965	0,008	0,017	0,004	BFGS 8	SOS	Tanh.	Identidade
8	MLP 3-10-1	0,949	0,920	0,777	0,003	0,012	18,233	BFGS 58	SOS	Tanh.	Exponencial
9	RBF 3-5-1	0,830	0,942	0,211	0,009	0,046	0,038	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
10	MLP 3-8-1	0,926	0,923	0,865	0,004	0,015	0,084	BFGS 18	SOS	Identidade	Exponencial
11	MLP 3-3-1	0,870	0,914	0,945	0,007	0,017	0,018	BFGS 12	SOS	Logística	Identidade
12	RBF 3-5-1	0,753	0,985	0,689	0,012	0,023	0,015	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
13	MLP 3-9-1	0,817	0,963	0,969	0,009	0,018	0,002	BFGS 7	SOS	Identidade	Tanh.
14	RBF 3-6-1	0,808	0,904	0,524	0,010	0,050	0,022	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
15	MLP 3-4-1	0,833	0,961	0,973	0,010	0,012	0,005	BFGS 7	SOS	Tanh.	Identidade
16	MLP 3-9-1	0,855	0,959	0,948	0,008	0,016	0,006	BFGS 12	SOS	Identidade	Identidade
17	MLP 3-4-1	0,918	0,922	0,949	0,005	0,013	0,009	BFGS 68	SOS	Tanh.	Logística

Na Tabela 42 são apresentados os resultados das RNA's treinadas, incluindo desempenhos (correlações) e erros, considerando-se como entradas 4 variáveis, incluída a massa da fruta.

Embora, em ambos os casos, tenham sido retidas 20 RNA's, 3 delas estavam duplicadas, se considerado o nível das precisão apresentadas nestas tabelas (3 casas decimais), de modo que as repetições foram excluídas, restando 17 redes distintas.

Tabela 42 - Redes neurais geradas com 4 entradas, incluída a massa da fruta.

Nº	Nome da rede	Desempenho Treinamento	Desempenho Teste	Desempenho Validação	Erro Treinamento	Erro Teste	Erro Validação	Algoritmo	Função erro	Função ativ. escondida	Função ativ. saída
1	MLP 4-3-1	0,865	0,879	0,882	0,007	0,016	0,037	BFGS 9	SOS	Logística	Exponencial
2	MLP 4-5-1	0,897	0,959	0,969	0,006	0,018	0,006	BFGS 25	SOS	Logística	Logística
3	MLP 4-5-1	0,944	0,911	0,779	0,003	0,013	14,156	BFGS 53	SOS	Tanh.	Exponencial
4	MLP 4-6-1	0,860	0,931	0,954	0,007	0,016	0,010	BFGS 6	SOS	Logística	Identidade
5	MLP 4-8-1	0,887	0,906	0,941	0,006	0,017	0,049	BFGS 34	SOS	Logística	Identidade
6	MLP 4-9-1	0,920	0,896	0,925	0,004	0,016	0,062	BFGS 27	SOS	Tanh.	Exponencial
7	MLP 4-9-1	0,940	0,923	0,863	0,003	0,010	0,190	BFGS 56	SOS	Tanh.	Identidade
8	MLP 4-9-1	0,866	0,980	0,949	0,007	0,018	0,007	BFGS 13	SOS	Identidade	Tanh.
9	MLP 4-9-1	0,814	0,962	0,968	0,010	0,018	0,004	BFGS 5	SOS	Identidade	Tanh.
10	RBF 4-5-1	0,757	0,926	-0,042	0,012	0,047	0,038	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
11	RBF 4-5-1	0,809	0,929	0,968	0,010	0,023	0,002	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
12	RBF 4-5-1	0,757	0,926	-0,042	0,012	0,047	0,038	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
13	RBF 4-5-1	0,809	0,929	0,968	0,010	0,023	0,002	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
14	RBF 4-6-1	0,841	0,938	0,358	0,008	0,040	0,030	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
15	RBF 4-6-1	0,829	0,868	-0,080	0,009	0,033	0,040	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
16	RBF 4-7-1	0,830	0,866	-0,095	0,009	0,035	0,045	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade
17	RBF 4-7-1	0,860	0,931	0,978	0,007	0,017	0,005	RBFT	SOS	Gaussiana	Identidade

Ao longo da utilização do programa de treinamento das RNA's, observou-se, como esperado, que os resultados obtidos dos desempenhos (coeficientes de correlação das entradas com a saída (alvo)) variaram conforme a série de treinamento realizada, uma vez que o programa escolhe aleatoriamente os dados que compõem as amostras de treinamento, teste e validação.

Em outras palavras, um segundo treinamento, por exemplo, pode dar resultados ligeiramente diferentes em relação ao primeiro devido à escolha, pelo programa, de diferentes amostras para cada grupo, embora os tamanhos dos grupos permaneçam constantes (60%, 20% e 20% para os respectivos grupos acima). Além disso, diferenças também irão ocorrer se os tamanhos dos grupos forem modificados, por exemplo, para 50%, 25% e 25%, respectivamente.

A partir de uma análise das Tabelas 41 e 42 conclui-se que não existem diferenças significativas entre os desempenhos das RNA's com a inclusão ou não da massa da fruta. Isto ocorre, provavelmente, pela pequena massa do bastão de impacto em relação à massa das frutas, de modo que o fato de a fruta ter maior ou menor massa pouco interfere no resultado final. Por outro lado, se uma determinada técnica de estimativa não-destrutiva de firmeza necessitar da massa como variável de entrada (por exemplo, para frutas de menor massa), esta variável poderá ter importante papel no desempenho da RNA.

5.6. CONCLUSÃO

Os resultados demonstram uma melhoria de cerca de 19,5% dos coeficientes de correlação entre as entradas (amplitudes positiva e negativa médias do espectro de resposta ao choque do sinal do acelerômetro e amplitude média da onda 2 do microfone de eletreto) com a saída de referência (TA/FC4mm), que passaram de cerca de $r = 0,82$ a $r = 0,85$ nos cálculos paramétricos mostrados no capítulo 4 para em torno de $r = 0,98$ nos melhores casos de desempenho da RNA nos grupos de teste e validação.

Conclui-se, assim, pela viabilidade de utilização de redes neurais artificiais como metodologia de fusão de sensores de baixo custo para estimativa de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, a partir de sinais de aceleração capturados de um acelerômetro e de um microfone de eletreto, utilizados simultaneamente na técnica não-destrutiva de impacto de pequena massa.

Demonstrou-se, também, que a informação da massa da fruta não foi relevante para a obtenção das correlações citadas, o que descarta a necessidade de pesagem dinâmica da fruta. Este fato sugere a utilização da técnica pesquisada em uma situação real de seleção e classificação, em uma esteira transportadora, estando a fruta em movimento e o bastão em repouso, uma vez que os movimentos relativos são semelhantes.

5.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DURRANT-WHYTE, H.F. Sensor models and multisensor integration. **international Journal of Robotics Research**, Thousand Oaks, v. 7, n. 6, p. 97–113, 1988.

ELMENREICH, W. **Sensor fusion in time-triggered systems**. 2002. 173 f. Dissertation (Doktors der technischen Wissenschaften) - Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik, Technischen Universität Wien, Wien, Österreich.

GROS, X. E. **NDT data fusion**. London: Arnold, 1996. 205p. ISBN: 0340676485.

STATSOFT. **Statistica**. Versão 8.0. Tulsa: StatSoft Inc., 2007. (Arquivo de ajuda).

VIEIRA, R.C.; ROISENBERG, M. **Redes neurais artificiais**: um breve tutorial. Florianópolis: Laboratório de Conexionismo e Ciências Cognitivas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

VISSER, A.; GROEN, F.C.A. **Organisation and design of autonomous systems**. Amsterdam: Faculty of Mathematics, Computer Science, Physics and Astronomy, University of Amsterdam, 1999. (Textbook).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Podemos concluir, neste trabalho, pela viabilidade de utilização de fusão de sensores de baixo custo - como acelerômetros integrados *MEMS*, microfones de eletreto, câmeras de vídeo tipo *webcam* e câmeras fotográficas digitais - para seleção e classificação de mangas *Tommy Atkins*.

A técnica aplicada para a fusão de sensores foi a rede neural artificial, que melhorou o desempenho dos sensores em cerca de 19,5%, quando comparado ao desempenho dos mesmos sensores, utilizados separadamente.

A seguir são listadas as contribuições diretas deste trabalho de tese:

- Modificação não-adaptativa em algoritmo-padrão (método Otsu do Matlab®) de processamento de imagens (fundo preto) de mangas *Tommy Atkins*, de modo a melhorar a segmentação da imagem da fruta.
- Modificação adaptativa em algoritmo-padrão (método Otsu do Matlab®) de processamento de imagens (fundo branco) de mangas *Tommy Atkins*, de modo a melhorar a segmentação da imagem da fruta.
- Identificação do parâmetro *área projetada superior* como melhor estimador de massa de mangas *Tommy Atkins*, via processamento de imagens capturadas com câmeras de baixo custo e com a aplicação dos algoritmos propostos nos itens anteriores.
- Proposta: Relação entre o tom amarelado (*yellowness*) e a força de máxima de compressão à profundidade de 4 mm (TA/FC4mm) como nova referência combinada para estimativa de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, na técnica de impacto de pequena massa.

- Proposta: utilização de um acelerômetro MEMS, de baixo custo, para estimativa de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, na técnica de impacto de pequena massa.
- Proposta: utilização de um microfone de eletreto vedado, de baixo custo, funcionando como acelerômetro, para estimativa de firmeza de mangas, na técnica de impacto de pequena massa.
- Proposta: utilização das amplitudes (positiva, negativa ou ambas) do Espectro de Resposta ao Choque de um acelerômetro MEMS como estimador não-destrutivo de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, na técnica de impacto de pequena massa.
- Proposta: utilização da amplitude (pico) do sinal de um microfone de eletreto como estimador não-destrutivo de firmeza de mangas *Tommy Atkins*, na técnica de impacto de pequena massa.
- Uso do centro de percussão para posicionamento dos sensores de aceleração na técnica de impacto de pequena massa.
- Desenvolvimento de uma placa de conversão de nível (FACS1), de baixo custo, para interfaceamento direto de sensores de aceleração com placas de som de microcomputadores.
- Identificação de melhor correlação do “tom amarelado” (*Yellowness*) do que da “cor total” (produto $L^*a^*b^*$) como parâmetro destrutivo de referência para ser combinado com outro parâmetro destrutivo, como a força de penetração ou força de compressão.
- A utilização de redes neurais artificiais como técnica de fusão de sensores melhorou em cerca de 19,5% as correlações dos estimadores não-destrutivos de firmeza com o(s) parâmetro(s) de referência, em comparação com os estimadores isolados.

- Puncção de 6 mm atua melhor do que o puncção de 2 mm na perfuração, como método destrutivo de referência em mangas *Tommy Atkins*.
- Banco de imagens coloridas de mangas *Tommy Atkins*, com pesos, identificação e classificação de defeitos, para estudos posteriores de seleção e classificação por defeitos externos.
- Metodologia de captura de imagens de mangas *Tommy Atkins* (iluminação, configurações de câmara).

Como contribuições indiretas, que poderão ser utilizadas em trabalhos posteriores:

- Aparato para aplicação da técnica de impacto de pequena massa
- Esteira transportadora, para aplicação de técnicas de estimativa de firmeza com frutas em movimento.
- Banco de imagens em P&B de mangas *Tommy Atkins*, para estudos posteriores de estimativa de peso, seleção e classificação por defeitos externos.

7. ANEXOS

ANEXO 3.1

Código do programa de segmentação de imagens, em Matlab.


```

clc
clear all
close all
%=====
% Cálculo de área de mangas com fundo branco
% Data: 05/02/2010
% Autores: Ilton L. Barbacena / Francisco Fachine
% Matlab 2008a
% O algoritmo principal está no arquivo ihc2010.m
%=====

global t1 t2 t3
global path_wav1 arq_wav1 path_wav2 arq_wav2
global qtde_colunas
% quantidade de colunas pode aumentar na linha abaixo

qtde_colunas = 8; % pode ser quantas forem necessárias

HPRE=figure;
set(HPRE,'Position',[400 200 400 300]);
set(HPRE,'NumberTitle','off');
set(HPRE,'menubar','none');
set(HPRE,'Name','Cálculo de parâmetros de mangas')

t1 = uicontrol(HPRE,...
    'style','text',...
    'string','Escolha arquivo inicial:',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'position',[20 250 250 20]);
b1=uicontrol(HPRE,...
    'style','pushbutton',...
    'string','arquivo inicial',...
    'position',[280 250 100 20],...
    'callback','status=1; fprintf('\n Nome do arquivo inicial com status= %g', status);
b1_arq1('1')');

t2=uicontrol(HPRE,...
    'style','text',...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'string','Escolha o arquivo final:',...
    'position',[20 200 250 20]);

b2=uicontrol(HPRE,...
    'style','pushbutton',...
    'string','arquivo final',...
    'position',[280 200 100 20],...
    'callback','status=2; fprintf('\n Nome do arquivo final com status= %g', status);
b1_arq1('2')');

b3=uicontrol(HPRE,...
    'style','pushbutton',...
    'string','gerar planilha',...
    'position',[100 100 200 20],...
    'callback','status=3; fprintf('\n Gerar planilha com status= %g', status);
ihc2010');

str88 = 'Escolha os arquivos iniciais e finais e clique em gerar planilha';
t3=uicontrol(HPRE,...
    'style','text',...
    'string',str88,...
    'position',[20 30 360 20],...
    'callback','status=4; fprintf('\n Mensagem: %s', str88)');

b4=uicontrol(HPRE,...
    'style','pushbutton',...
    'string','Sair',...
    'position',[360 10 25 15],...
    'callback','fprintf('\n Fim do programa\n'); close all; clear all');

return

```

```
function ihc2010()
```

```
global path_wav1 arq_wav1 path_wav2 arq_wav2
```

```

global t3
global qtde_colunas

if ~strcmp(path_wav1, path_wav2)
    da_beep;
    str1 = sprintf('Erro: mangas tem que estar na mesma pasta');
    set(t3, 'string', str1);
    fprintf('\n %s', str1);
    return;
end
fprintf('\n Pasta: %s', path_wav1);

inicial = [];
final = [];
nome = [];

for i=1:length(arq_wav2)
    if(enumerado(arq_wav2(i)))
        final = [final arq_wav2(i)];
    else
        nome = [nome arq_wav2(i)];
    end
end
qtde_numeros = length(final);
final1 = str2num(final);

%qtde_numeros = length(inicial);

for i=1:length(arq_wav1)
    if(enumerado(arq_wav1(i)))
        inicial = [inicial arq_wav1(i)];
    end
end
inicial1 = str2num(inicial);

qtde_mangas = final1- inicial1 + 1;

if (qtde_mangas <= 0)
    da_beep;
    str1 = sprintf('Arquivo final n pode ter numeração inferior ao inicial');
    fprintf('\n %s', str1);
    set(t3, 'string', str1);
    return;
end

fprintf('\n##### Inicio do processamento #####');

fprintf('\n arq1: %s', inicial);
fprintf('\n arq2: %s', final);
fprintf('\n quantidade de digitos numericos: %g', qtde_numeros);

%=====
% qtde de parametros para calcular
% qtde_colunas = 8
df1 = []; % calculo 1
df2 = []; %
df3 = []; %
df4 = []; %
df5 = []; %
df6 = []; %
df7 = []; %
df8 = []; %
%
% Para aumentar incluir aqui mais df7 / df8 / .....
%=====

fprintf('\n arq_wav1 (inicial)= %s', arq_wav1);
fprintf('\n arq_wav2 (final) = %s', arq_wav2);

%arq_base = tirastr(arq_wav2, 7);
fprintf('\n arq_base = %s', nome);
%fprintf('\nQuantidade de imagens: %d', qtde_mangas);
nomearq = path_wav1;
nomearq = [ nomearq nome];

```

```

i = 1;          % contador de fotos de mangas
t0 = clock;    % inicio da contagem de tempo

fprintf('\n nomearq = %s', nomearq);

num_arq = inicial1 -1;
while(1)

    num_arq = num_arq + 1;      % número do arq inicial
    if (num_arq > final1)
        break;                % se completou
    end

    %nomearq1 = converte_nome_arq(nomearq, num_arq);
    nomearq1 = converte_nome_arq(nomearq, num_arq, qtde_numeros);
    nomearq1 = [nomearq1 '.jpg'];

    %   if (~ischar(nomearq1)) || ~min(size(nomearq1)) || (size(nomearq1,2) < 2)
    %       fprintf(' não existe ');
    %   continue;
    %   end
    %

    if exist(nomearq1) ~= 2
        fprintf('\n Arquivo:%g %s não existe', i, nomearq1);
        continue;
    end

    fprintf('\n Arquivo:%g %s', i, nomearq1);

    A = imread(nomearq1);

    fprintf('\ttamanho= %g', length(A));

% ----- Núcleo do Programa -----
imagem_inicial=A;
figure, imshow(imagem_inicial)
imagem_cinza=rgb2gray(imagem_inicial);
figure, imshow(imagem_cinza)
nivel=graythresh(imagem_cinza);
imagem_bp=im2bw(imagem_cinza,nivel);
figure, imshow(imagem_bp)
imagem_pb=imcomplement(imagem_bp);
figure, imshow(imagem_pb)
[regioes,numero]=bwlabel(imagem_pb);
s=regionprops(regioes,imagem_cinza,'MeanIntensity');
[x,ind] = max([s.MeanIntensity]);
intensidade_media = s(ind).MeanIntensity;
nivell=nivel+((intensidade_media/1500)*nivel);
imagem_bp=im2bw(imagem_cinza,nivell);
figure, imshow(imagem_bp)
imagem_pb=imcomplement(imagem_bp);
figure, imshow(imagem_pb)
[regioes,numero]=bwlabel(imagem_pb);
s=regionprops(regioes,imagem_cinza,'Area','Eccentricity','EquivDiameter','Perimeter','Major
AxisLength','MinorAxisLength');
[x,ind] = max([s.Area]);
i1=num_arq;
i2=x;
i3=s(ind).Eccentricity;
i4=s(ind).EquivDiameter;
i5=s(ind).Perimeter;
i6=s(ind).MajorAxisLength;
i7=s(ind).MinorAxisLength;
i8=0;
%=====
% resultado de calculos gravados em df1 a df6, para todas as fotos
% substituir as linhas abaixo p/ levar p/ excel
%=====
% qtde de parametros para calcular
%   qtde_colunas = 8

df1      = [df1 i1];          % coluna 1 no excel
df2      = [df2 i2];
df3      = [df3 i3];
df4      = [df4 i4];
df5      = [df5 i5];

```



```

a.df7 = df7; a.df8=df8;
%
% Para aumentar incluir aqui mais a.df7 / a.df8 / .....
% mudar também na rotina: salva_excel_artigo(arg)
%=====

a.tempo_sessao = tempo_sessao;
a.qtde_mangas = i; % = qtde de fotos processadas
a.path_wav1 = path_wav1;
a.arq_wav1 = arq_wav1;
a.arq_wav2 = arq_wav2;

a.qtde_colunas = qtde_colunas; % ajeitar no excel

save(str1,'a'); % salva no formato .MAT
salva_excel_artigo(arq2); % salva em arquivo excel

end

fprintf('\n =====\n');

return;

function str8 = tirastr(str, t)

% retira t caracteres do final da string str

total = length(str);
str8 = [];

for i=1:total-t
    str8 = [str8 str(i)];
end

return

```

ANEXO 4.1

Código Matlab para cálculo do Espectro de Resposta ao Choque

Autor: Tom Irvine (IRVINE, 2006)


```

[srs2_y, srs_Fs, srs_nbits] = wavread(nomearq1, 'native');
srs_tam = length(srs2_y);

srs_tt = zeros(srs_tam, 2);

for(srs_i=1:srs_tam)
    srs_tt(srs_i,1) = srs_i/srs_Fs;
    srs_tt(srs_i,2) = srs2_y(srs_i);
end

srs_t=double(srs_tt(:,1));
srs_y=double(srs_tt(:,2));

tmx=max(srs_t);
tmi=min(srs_t);
srs_n = length(srs_y);

dt=(tmx-tmi)/(srs_n-1);
sr=1./dt;

srs_fn(1)=10;

idamp=2;

Q=10;
damp=1./(2.*Q);

ialgorithm=2;

tmax=(tmx-tmi) + 1./srs_fn(1);
limit = round( tmax/dt );
srs_n=limit;
srs_yy=zeros(1,limit);
for ii=1:length(srs_y)
    srs_yy(ii)=srs_y(ii);
end
% SRS engine
for j=1:1000
%
    omega=2.*pi*srs_fn(j);
    omegad=omega*sqrt(1.-(damp^2));
    cosd=cos(omegad*dt);
    sind=sin(omegad*dt);
    domegadt=damp*omega*dt;
    if(ialgorithm==1)
        srs_a1(j)=2.*exp(-domegadt)*cosd;
        srs_a2(j)=-exp(-2.*domegadt);
        srs_b1(j)=2.*domegadt;
        srs_b2(j)=omega*dt*exp(-domegadt);
        srs_b2(j)=srs_b2(j)*( (omega/omegad)*(1.-2.*(damp^2))*sind -2.*damp*cosd );
        b3(j)=0;
    else
        E=exp(-damp*omega*dt);
        K=omegad*dt;
        C=E*cos(K);
        S=E*sin(K);
        Sp=S/K;
        srs_a1(j)=2*C;
        srs_a2(j)=-E^2;
        srs_b1(j)=1.-Sp;
        srs_b2(j)=2.*(Sp-C);
        b3(j)=E^2-Sp;
    end
    forward=[ srs_b1(j), srs_b2(j), b3(j) ];
    back = [ 1, -srs_a1(j), -srs_a2(j) ];
    srs_resp=filter(forward,back,srs_yy);
    srs_x_pos(j)= max(srs_resp);
    srs_x_neg(j)= min(srs_resp);
    srs_jnum=j;
    if srs_fn(j) > sr/8.
        break
    end
    srs_fn(j+1)=srs_fn(1)*(2. ^ (j*(1./24.)));
end

```

ANEXO 4.2

Cálculo do "tom amarelado" (yellowness)

Fonte: Hunterlab (HUNTERLAB, 2008a)



Yellowness Indices

Background

Visually, yellowness is associated with scorching, soiling, and general product degradation by light, chemical exposure, and processing. Yellowness indices are used chiefly to quantify these types of degradation with a single value. They can be used when measuring clear, near-colorless liquids or solids in transmission and near-white, opaque solids in reflectance.

Conditions for Measurement

Instrumental: Any HunterLab color measurement instrument

Illuminant: D65 (YI E313 only), C.

Standard Observer Function: 2° and 10° (YI E313 only).

Transmittance and/or Reflectance: Either

Formulas

Yellowness Index per ASTM Method E313 is calculated as follows:

$$YI_{E313} = \frac{100(C_x X - C_z Z)}{Y}$$

where X, Y, and Z are the CIE Tristimulus values and the coefficients depend on the illuminant and observer as indicated in the table below. Yellowness Index may only be calculated for illuminants D65 and C.

Coefficient	C/2°	D65/2°	C/10°	D65/10°
C _x	1.2769	1.2985	1.2871	1.3013
C _z	1.0592	1.1335	1.0781	1.1498

Yellowness Index per ASTM Method D1925 is calculated as follows:

$$YI_{D1925} = \frac{100(1.274976795X - 1.058398178Z)}{Y}$$

under C/2° conditions for all instruments except UltraScan XE.

$$YI_{D1925} = \frac{100 (1.274641506X - 1.057434092 Z)}{Y} \quad \text{under } C/2^\circ \text{ conditions for UltraScan XE.}$$

The yellowness index formula is shown in ASTM D1925 as:

$$YI_{D1925} = \frac{100 (1.28 X_{CIE} - 1.06 Z_{CIE})}{Y_{CIE}} \quad \text{under } C/2^\circ \text{ conditions.}$$

The tristimulus values of clear air (for CIE illuminant C and the 1931 CIE 2° standard observer) are $X = 98.041$, $Y = 100.000$, $Z = 118.103$. Using these values, the ASTM formula yields $YI = 0.303$ for clear air because the factors are truncated to three significant figures. In order to set the yellowness index for air equal to 0.0, the constant multipliers for X_{CIE} and Z_{CIE} have been expanded slightly.

The ASTM D1925 method was withdrawn in 1995, but this formula still provides useful information. This index is always calculated for $C/2^\circ$, regardless what illuminant and observer are chosen. The focus of this index was on evaluation of transparent plastics.

Typical Applications

These indices are often used by the textile, paint, and plastics industries, but may be used for measurement of any nearly white or nearly colorless object.

For Additional Information Contact:

Technical Services Department
Hunter Associates Laboratory, Inc.
11491 Sunset Hills Road
Reston, Virginia 20190
Telephone: 703-471-6870
FAX: 703-471-4237
www.hunterlab.com