



YULL HEILORDT HENAO ROA

**INSTRUMENTOS DEDICADOS À ANÁLISE DO IMPACTO APLICADOS À
AGRICULTURA E AO ESPORTE**

**CAMPINAS
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

YULL HEILORDT HENAO ROA

INSTRUMENTOS DEDICADOS À ANÁLISE DO IMPACTO APLICADOS À
AGRICULTURA E AO ESPORTE

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Fruett

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO YULL HEILORDT HENAO ROA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. FABIANO FRUETT

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

H38i Henao Roa, Yull Heilordt, 1978-
Instrumentos dedicados à análise do impacto aplicados à agricultura e ao esporte / Yull Heilordt Henao Roa. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Fabiano Fruett.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Acelerômetros. 2. Sensoriamento remoto. 3. Pós-colheita. 4. Sistema de comunicação sem fio. 5. Procesamento eletrônico de dados em tempo real. I. Fruett, Fabiano, 1970-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Instruments dedicated to analyze impacts in agriculture and sports areas

Palavras-chave em inglês:

Accelerometer

Remote sensing

Post-harvest

Wireless communication systems

Electronic data processing in real time

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Fabiano Fruett [Orientador]

Helio Roesler

Adonai Gimenez Calbo

Peter Jürgen Tatsch

Leandro Tiago Manera

Data de defesa: 24-10-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

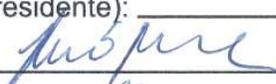
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

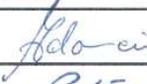
Candidato: Yull Heilordt Henao Roa

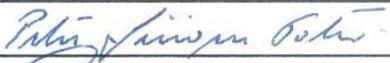
Data da Defesa: 24 de outubro de 2013

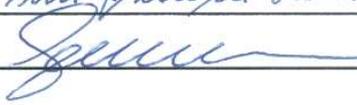
Título da Tese: "Instrumentos Dedicados à Análise do Impacto Aplicados à Agricultura e ao Esporte"

Prof. Dr. Fabiano Fruett (Presidente):  _____

Prof. Dr. Helio Roesler:  _____

Dr. Adonai Gimenez Calbo:  _____

Prof. Dr. Peter Jürgen Tatsch:  _____

Prof. Dr. Leandro Tiago Manera:  _____

Resumo

Os frutos submetidos a grandes impactos sofrem danos irreversíveis, perdem qualidade e nem sempre podem ser aproveitados no final do processo de pós-colheita. Identificar e entender estes eventos críticos pode colaborar na redução do desperdício na produção de alimentos. Já no caso do esporte, o estudo dos impactos do equipamento esportivo levando em consideração características particulares do material pode ser uma ferramenta valiosa durante o desenvolvimento e fabricação de, por exemplo: bolas de futebol. Com o objetivo de fornecer novas ferramentas à análise e ao estudo dos impactos na agricultura e nos esportes desenvolvemos o *hardware* e o *software* de dois instrumentos os quais interagem de forma sincronizada com o método da cinemetria para análise de movimento através de câmeras. O primeiro instrumento desenvolvido é um sistema de monitoramento de variáveis biomecânicas chamado Esfera Eletrônica Sem Fio (EESF). Na agricultura, o circuito eletrônico da EESF, é encapsulado dentro de uma esfera, facilitando o monitoramento de frutas e outros produtos perecíveis mediante a aquisição de variáveis que afetam a qualidade do produto. No esporte, o circuito eletrônico pode ser encapsulado, acoplado ou embutido em equipamentos esportivos facilitando o monitoramento do atleta ou do próprio equipamento esportivo. O *hardware* da EESF possui um diâmetro de 63 mm, massa de 168 g, densidade de 1,1, acelerômetros triaxiais na faixa de $\pm 200 g$, comunicação sem fio no padrão *ZigbeeTM*, alcance de 70 m, taxa de amostragem de 438 Hz e autonomia de 45 minutos. Já o *software* integra duas Interfaces Gráficas de Usuário (GUI), uma para Análise em Tempo Real (RTA) e outra para Análise e Pós-Processamento (PPA), que inclui uma opção de vídeo sincronização. O segundo instrumento é uma Plataforma de Força (PF) uniaxial, de baixo custo, projetada para trabalhar tanto estática quanto dinamicamente, para uma faixa de $\pm 2,2$ kN, taxa de amostragem de até 2,4 kHz, alta Relação Sinal-ruído (SNR), alto ganho e tempo de vidro com a opção de sincronismo com vídeo por baixo da mesma. Com a EESF foram realizados testes de queda livre em laboratório, sincronizados com a PF, para comparar os valores dos impactos obtidos pelos dois instrumentos, e testes em unidades de beneficiamento de maçã e laranja para medir os impactos sofridos pelas frutas no processo de pós-colheita. A PF também foi utilizada durante os testes de repique com diferentes bolas de futebol, em sincronismo com a cinemetria, comparando os resultados obtidos com os dois sistemas e ainda caracterizando cada bola através das variáveis cinemáticas e dinâmicas. A integração de diferentes tecnologias mostrou-se uma ferramenta valiosa na análise do impacto e suas relações com o objeto em estudo. As informações colhidas de diversos instrumentos foram comparadas e cruzadas, favorecendo o entendimento da mecânica do impacto. Estes instrumentos são facilmente adaptáveis a qualquer necessidade específica dentro da análise de problemas que envolvem impacto, tendo aplicações não somente em agricultura e esporte mas também na área médica e de materiais.

Palavras-chave: Acelerômetros, Esfera Instrumentada, Sensoriamento Esportivo, Pós-Colheita, Comunicação Sem Fio, Processamento Em Tempo Real.

Abstract

Fruits submitted to large impacts suffer irreversible damage, lose their quality and, most of the times, can't be availed at the end of the post-harvest process. Identifying and understanding these critical events may help to reduce food losses. With reference to sports, studying the impacts related to sport equipments by taking into account their particular material characteristics, can be a valuable tool for the development and manufacture of improved sport items like soccer balls. Aiming to provide new tools to analyze and study agriculture and sports impacts, we developed two instruments including hardware and software, which interact synchronously with the kinematic method based on cameras motion analysis. The first instrument developed is a monitoring system of biomechanical variables system called Wireless Electronics Sphere (WES). In focus on agriculture, the WES electronic circuit is encapsulated inside a sphere, facilitating fruit and other perishable products be monitored through the acquisition of product quality variables. In other application focus on sport, the electronic circuit can be encapsulated, attached or embedded into a sport equipment, facilitating monitoring the athlete or sports equipment. The WES hardware has a 63 mm diameter, 168 g weight, 1.1 density, triaxial accelerometers in the range of $\pm 200 g$ wireless communication with *ZigbeeTM* standard, 70 m range, 438 Hz sampling rate and 45 minutes of battery autonomy. The software integrates two Graphical User Interfaces (GUI), one for Real-Time Analysis (RTA) and the other for Post-Processing Analysis (PPA), which includes a video synchronization option. The second instrument is a low cost uniaxial Force Platform (FP), designed to work both static and dynamically for a ± 2.2 kN range, 2.4 kHz sampling rate, high Signal-to-Noise Ratio (SNR), high gain and glass top with video sync option. The WES was used in the laboratory freefall test and synchronized with the FP, to compare the impact values obtained by both instruments. Beside, the WES was tested in apple and orange packing houses to measure the impact suffered by the fruits in the post-harvest process. The FP was also used during the rebounding tests with different soccer balls, synchronized with the kinematics and the results obtained were compared with both systems and each ball was also characterized through the kinematic and dynamic variables. The integration of different technologies proved to be a valuable tool on impact analysis and its relations with the object under study. The information collected from different instruments was compared and crossed, promoting the understanding of the impact mechanic. These instruments are easily adaptable to any specific requirement in the analysis of problems involving impact, with applications not only in agriculture and sports, but also in medical and material areas.

Keywords: Accelerometer, Instrumented Sphere, Sport Monitoring, Post-harvest, Wireless Communication, Real Time Processing.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Agricultura	2
1.2	Esporte	4
1.3	Visão geral dos instrumentos desenvolvidos	5
1.4	Objetivos	6
1.4.1	Objetivo geral	6
1.4.2	Objetivos específicos	6
2	Esfera Eletrônica Sem Fio	7
2.1	Funcionamento	7
2.2	<i>Hardware</i>	8
2.2.1	Placa móvel	8
2.2.2	Placa receptora	12
2.2.3	Encapsulamento	14
2.2.4	Sistema local de coordenadas	17
2.2.5	Resumo do <i>hardware</i> da EESF	17
2.3	<i>Software</i>	18
2.3.1	<i>Firmware</i>	18
2.3.2	<i>Software</i> de Análise em Tempo Real	18
2.3.3	<i>Software</i> de Análise e Pós-processamento	21
2.4	Calibração	23
3	Plataforma de Força	25
3.1	Funcionamento	25
3.2	<i>Hardware</i>	26
3.2.1	Mecânica	26
3.2.2	Eletrônica	30
3.3	<i>Software</i>	30
3.4	Calibração	32
3.5	Estrutura de queda livre	33

4	Cinemetria	35
4.1	Metodologia	35
4.2	Layout da aquisição	36
4.3	Calibração	37
4.3.1	Objetos para calibração	38
4.3.2	Sistema local de coordenadas	39
4.4	Acurácia	40
4.5	Rastreamento dos marcadores	41
4.6	Reconstrução Tridimensional	41
5	Resultados experimentais	43
5.1	Testes de queda livre	43
5.2	Testes em unidades de beneficiamento	48
5.2.1	Identificação de pontos de transferência e padrões	49
5.3	Sincronismo da EESF com vídeo	51
5.4	Testes de repique com bolas de futebol	52
5.5	Efeito da pressão da bola na altura do repique	60
5.6	Área de contato e pressão	61
6	Conclusões e perspectivas	63
	Referências bibliográficas	66
	Apêndices	70
A	Publicações, submissões e patentes	71
B	Esfera Eletrônica Sem Fio	73
C	Fotos da estrutura de queda livre e do <i>layout</i> das câmeras	75
D	Fotos dos diferentes unidades de beneficiamento	77

A MINHA ESPOSA, CAROLINA,
MEUS PAIS, DUBAN E DALILA,
E MEU IRMÃO, BRANDAL.

Agradecimentos

Agradeço,

ao meu orientador, o professor Fabiano Fruett, com o qual tive o prazer de trabalhar durante os últimos sete anos, no meu mestrado e doutorado. Um ótimo professor, pesquisador, amigo e sobre tudo um exemplo a seguir como pessoa.

aos professores Sérgio Augusto Cunha e Luiz Eduardo Barreto pela amabilidade, amizade e colaboração.

a minha família pelo apoio durante esta jornada, especialmente a minha esposa Maria Carolina Costa Melo Svidnicki e aos meus pais, Dalila Roa Polanco e José Duban Henao Cuellar.

aos colegas do Laboratório de Sensores Microeletrônicos (LSM) e do Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB) pela colaboração.

aos colegas e amigos mais próximos: Vitor Garcia, Luiz Eduardo Bento Ribeiro, Guilherme De Oliveira Curaucchi, Juvenil Severino da Costa Junior e Carlo Giuliano.

à equipe de natação da UNICAMP (USSR) e a todos seus membros, obrigado pela amizade e pela oportunidade de poder treinar nesta equipe durante estes últimos anos, com certeza a natação e os colegas da equipe ajudaram muito para poder levar até o fim o meu doutorado.

a Frederico Sena, Marcelo Oliveira e Izaque Alves Maia da Divisão de Tecnologias Tridimensionais (DT3D) do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI), pela colaboração com os modelos e impressão 3D da casca da Esfera Eletrônica Sem Fio (EESF).

à empresa Cambuci S.A dona das marcas Penalty e Stadium, pelo apoio e interesse na pesquisa.

à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pela oportunidade da realização da pesquisa.

à agência brasileira de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

a todos aqueles que não foram citados, mas que colaboraram para a realização deste trabalho.

Diz-me e eu esqueço, mostra-me e eu recordo;
deixa-me fazer e eu aprendo.

Benjamim Franklin

Lista de Figuras

1.1	Integração das três abordagens.	6
2.1	Esquema geral do sistema da EESF.	8
2.2	Placa móvel da EESF.	9
2.3	Carregamento da bateria da placa móvel da EESF.	12
2.4	Diagrama esquemático da placa móvel da EESF.	13
2.5	Placa receptora da EESF.	13
2.6	EESF com encapsulamento de PU e ao lado de laranjas.	14
2.7	Laranja real (a), modelo (b) e impressão 3D em gesso (c).	15
2.8	Cascas da EESF com formato da laranja.	15
2.9	Encapsulamento da placa móvel na bola de futebol.	16
2.10	Desenho da placa móvel da EESF com o sistema de coordenadas.	17
2.11	Fluxograma do <i>firmware</i> da EESF.	19
2.12	Diagrama de transição de estados do <i>software</i> RTA.	20
2.13	Aba <i>setup and wireless RX statistics</i> da interface gráfica do RTA.	21
2.14	Aba <i>RT impact information</i> da interface gráfica do RTA.	22
2.15	Diagrama de transição de estados do <i>software</i> PPA.	22
2.16	Interface gráfica do <i>software</i> PPA.	23
3.1	Diagrama de blocos dos componentes da PF.	26
3.2	Projeto mecânico da PF.	26
3.3	Efeito do momento em torno do eixo Y e do segundo momento de área no eixo X do cantiléver.	27
3.4	Dimensões dos cantilévres utilizados na PF, sendo: $x = 80$ mm, $b = 50$ mm e $h = 8$ mm.	27
3.5	Detalhe da interface do vidro temperado com os cantilévres da PF.	29
3.6	Detalhe da peça de interface entre o vidro temperado e as vigas da PF.	29
3.7	Diagrama esquemático e foto do circuito eletrônico da PF.	31
3.8	Diagrama de transição de estados do <i>software</i> da PF.	31
3.9	Interface gráfica da PF.	32
3.10	Estrutura de queda livre.	33
4.1	Câmera digital Casio EX-F1 e <i>layout</i> utilizado com a cinematria.	36
4.2	Programa Dvideow mostrando um quadro de cada câmera utilizada.	37

4.3	Marcação de todos os pontos do volume e do bastão posicionado no ponto 1 que são filmados pelas duas câmeras.	39
4.4	Sistema local de coordenadas da cinemetria.	40
4.5	Posição dos marcadores sobre a PF.	40
4.6	Rastreamento do marcador da bola de futebol nos testes de repique.	42
5.1	Variação da força em função da altura da queda livre da EESF medida com a PF.	44
5.2	Valor de pico do módulo da aceleração interna da EESF em função da altura da queda livre.	46
5.3	Foto do encapsulamento cortado no meio.	47
5.4	Acelerações da EESF e da PF em função da altura da queda livre.	47
5.5	Resultados dos testes realizados com a EESF nas diferentes unidades de beneficiamento.	49
5.6	Linha de processamento da unidade de beneficiamento de maçã A, com identificação dos pontos de transferência.	50
5.7	Identificação de uma esteira seguida de um rolete numa seção da linha.	51
5.8	Sincronismo da EESF com vídeo utilizando o <i>PPA</i>	52
5.9	Deslocamento nos eixos X, Y e Z durante a queda livre e o repique da bola A de futebol.	53
5.10	Deslocamento, velocidade e aceleração do eixo Z da bola A de futebol.	54
5.11	Força, aceleração, velocidade e deslocamento no eixo Z medidos e calculados com base nos dados colhidos pela PF durante o impacto da bola A de futebol.	56
5.12	Deslocamento nos eixos X, Y e Z durante a queda livre e o repique da bola B de futebol.	57
5.13	Deslocamento, velocidade e aceleração do eixo Z da bola B de futebol.	57
5.14	Força, aceleração, velocidade e deslocamento no eixo Z medidos e calculados com base nos dados colhidos pela PF durante o impacto da bola B de futebol.	58
5.15	Deslocamento nos eixos X, Y e Z durante a queda livre e o repique da bola C de futebol.	58
5.16	Deslocamento, velocidade e aceleração do eixo Z da bola C de futebol.	58
5.17	Força, aceleração, velocidade e deslocamento no eixo Z medidos e calculados com base nos dados colhidos pela PF durante o impacto da bola C de futebol.	59
5.18	Variação da altura do repique em função da pressão da bola A de futebol.	61
5.19	Relação entre a área de contato e a força na bola A de futebol durante os testes de repique.	62
5.20	Estimativa da área de contato da bola A de futebol durante os testes de repique.	62
B.1	Fotos da Placa de Circuito Impresso da EESF.	73
C.1	<i>Layout</i> das câmeras no LSM.	75
C.2	<i>Layout</i> das câmeras no LSM.	76
C.3	<i>Layout</i> das câmeras no LSM.	76
D.1	Unidade de beneficiamento de maçã A em Vacaria RS.	77
D.2	Unidade de beneficiamento de maçã B Vacaria RS.	78

D.3	Unidade de beneficiamento de maçã C Vacaria RS.	78
D.4	Unidade de beneficiamento de laranja D em Mogi Guaçu SP.	79

Lista de Tabelas

2.1	Características da EESF com encapsulamento em PU e sem casca.	17
5.1	Variação da força em função da altura da queda livre da EESF medida com a PF.	45
5.2	Resultados dos testes realizados com a EESF nas diferentes unidades de beneficiamento.	49
5.3	Pontos de transferência da unidade de beneficiamento de maçã A.	50
5.4	Resultados obtidos com a cinemetria para as três bolas de futebol testadas. . .	60
5.5	Resultados obtidos com a PF para as três bolas de futebol testadas.	60
B.1	Lista de componentes da EESF.	73

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	- <i>Analog-to-Digital Converter</i> (conversor analógico-digital)
AF	- <i>Auto Focus</i> (Foco Automático)
API	- <i>Application Programming Interface</i>
AVI	- <i>Audio Video Interleave</i> , formato multimídia da Microsoft
CAPES	- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCS	- Circuito de condicionamento de sinais
CI	- Circuitos Integrados
CTI	- Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer
CMOS	- <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
Codec	- CoDec é o acrônimo de Codificador/Decodificador de sinais
DAQ	- <i>Data Acquisition</i>
DLT	- <i>Direct Linear Transformation</i>
DSIF	- Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica
DT3D	- Divisão de Tecnologias Tridimensionais
Dvideow	- <i>Software</i> para análise cinemática tridimensional de movimentos
EESF	- Esfera Eletrônica Sem Fio
FEF	- Faculdade de Educação Física
FEEC	- Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
FRS	- Força de Reação do Solo
FTDI	- <i>Future Technology Devices International</i>
FP	- <i>Force Platform</i>
GUI	- <i>Graphics User Interface</i> (interface gráfica de usuário)
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INPI	- Instituto Nacional de Propriedade Industrial
IRD	- <i>Impact Recording Device</i> (dispositivo de gravação de impacto)
ISM	- <i>Industrial, Scientific and Medical</i>
I/O	- Input/Output (Entrada/saída)
LDO	- <i>Low Drop Out Regulator</i>
LED	- <i>Light-Emitting Diode</i> (Diodo emissor de luz)
LIB	- Laboratório de Instrumentação para Biomecânica
LSM	- Laboratório de Sensores Microeletrônicos
MEM	- <i>Microelectromechanical</i> (microeletromecânicos)
MOV	- <i>Movies and Other Videos</i> , formato multimídia da Apple
MPEG-4	- <i>Moving Picture Experts Group</i> , padrão de compressão de áudio e vídeo
OSI	- <i>Open Systems Interconnection</i>
PCB	- <i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)

PF	-	Plataforma de Força
PMS	-	<i>Pressure Measuring Sphere</i>
PPA	-	<i>Post Processing Analysis software</i> (software de Análise e Pós-processamento)
PU	-	Poliuretano
RAM	-	<i>Random Access Memory</i>
RF	-	<i>Radio Frequency</i> (rádio frequência)
RTA	-	<i>Real Time Analysis software</i> (software de Análise em Tempo Real)
RT	-	<i>Real Time</i> (Tempo Real)
RSSI	-	<i>Received Signal Strength Indicator</i> (indicador da intensidade do sinal recebido)
SMD	-	<i>Superficial Monting Device</i> (componente de montagem superficial)
SNR	-	<i>Signal-to-noise ratio</i> (Relação Sinal-ruído)
TTL	-	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
TX	-	Transmissão
UNICAMP	-	Universidade Estadual de Campinas
USB	-	<i>Universal Serial Bus</i>
USSR	-	<i>UNICAMP Swimming Society Reloaded</i> (Equipe de natação)
VI	-	<i>Virtual Instruments</i> (Instrumento Virtual)
WES	-	<i>Wireless Electronics Sphere</i>
3D	-	Três Dimensões ou Eixos
2D	-	Duas Dimensões ou Eixos

Lista de símbolos

A_x	-	Aceleração linear no eixo X
A_y	-	Aceleração linear no eixo Y
A_z	-	Aceleração linear no eixo Z
R^2	-	Coefficiente de determinação
s	-	Tempo em segundos
Hz	-	Frequência em hertz
A	-	Corrente elétrica em ampere
V	-	Tensão elétrica em volt
Ω	-	Resistência elétrica em ohm
W	-	Potência em watts
mAh	-	Capacidade em miliampere hora
ms^{-2}	-	Aceleração em metro por segundo ao quadrado
ms^{-1}	-	Velocidade em metro por segundo
kbps	-	Velocidade de transmissão de dados em quilobit por segundo
kB/s	-	Velocidade de transmissão de dados em kilobyte por segundo
FPS	-	<i>Frames Per Second</i> (quadros por segundo)
g	-	Unidade de gravidade, sendo 1 g equivalente a $9,81 ms^{-2}$
mV/ g	-	Sensibilidade do acelerômetro em milivolt por aceleração da gravidade
g	-	Unidade de massa em gramas
<i>shore</i>	-	Unidade de dureza geralmente utilizada em polímeros e elastômeros
n	-	Número de amostras para tratamento estatístico
ϵ	-	Deformação mecânica (<i>strain</i>)
σ	-	Estresse (<i>stress</i>)
E	-	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
M_y	-	Momento em torno do eixo Y
I_x	-	Segundo momento de área ou momento de inercia no eixo X
G_F	-	<i>Gage Factor</i>
Dp	-	Desvio padrão

Introdução

Os impactos sofridos por um corpo ou objeto são geralmente caracterizados pela sua aceleração e desaceleração. Alguns exemplos de eventos com suas respectivas magnitudes de aceleração são: a montanha russa Titan no Texas-USA atinge acelerações de $4,5 g$, o *swing* do golfista Tiger Woods foi estimado em $19 g$, a desaceleração na abertura de um paraquedas é de $33 g$, a abertura do *airbag* do carro acontece em aproximadamente $100 g$, o impacto de um fruto durante a queda livre de uma altura de 40 cm é de aproximadamente $200 g$ e o chute de uma bola de futebol chega em aproximadamente $300 g$. Sendo (g) uma aceleração comparada à da gravidade que foi considerada equivalente a $9,8\text{ ms}^{-2}$.

Como podemos observar nestes exemplos, as acelerações devido a impactos na agricultura e nos esportes, e principalmente no caso do futebol podem alcançar centenas de g . Ainda mais importante é que os impactos na agricultura e nos esportes refletem em características particulares de cada área. Por exemplo, os frutos submetidos a grandes impactos sofrem danos irreversíveis, perdem qualidade e nem sempre podem ser aproveitados no final do processo de pós-colheita. Identificar e entender estes eventos críticos pode colaborar na redução das perdas na cadeia de produção de alimentos. Já no caso do esporte, o estudo dos impactos levando em consideração as características particulares do material esportivo pode ser uma ferramenta valiosa durante o desenvolvimento e fabricação de, por exemplo, bolas de futebol.

O atual cenário com sensores eletrônicos cada vez menores com baixo consumo de potência e custo reduzido, somado a recentes avanços na comunicação sem fio, com novos padrões, tais como *Bluetooth*[®] e *Zigbee*TM, e uma ampla gama de sensores disponíveis como células de carga, sensores de temperatura, pressão, umidade, microfones, câmeras, *strain gages*, acelerômetros e giroscópios dentre outros, possibilitam o desenvolvimento de novos instrumentos para aplicação na agricultura e nos esportes (Chi et al., 2005, Armstrong, 2007).

Com o objetivo de fornecer novas ferramentas para a análise e o estudo dos impactos na agricultura e nos esportes, desenvolvemos dois novos instrumentos que interagem de forma

sincronizada com o método da cinemetria. A integração de diferentes tecnologias mostrou-se uma ferramenta valiosa na análise do impacto e suas relações com o objeto em estudo. As informações colhidas de diversos instrumentos foram comparadas e cruzadas, favorecendo o entendimento da mecânica do impacto. Estes instrumentos são facilmente adaptáveis a qualquer necessidade específica dentro da análise de problemas que envolvem impacto, tendo aplicações não somente em agricultura e esporte mas também na área médica e de materiais.

1.1 Agricultura

Danos físicos como amassamento ou lesões nos frutos, resultantes de impactos, são identificados como um dos principais fatores para a perda de qualidade e uma das principais causas de rejeição de produtos hortícolas e frutas. O dano físico diminui a qualidade do fruto devido ao amassamento da casca facilitando a entrada de patógenos, como por exemplo, *Lasiodiplodia theobromae* e *Penicillium digitatum*, que diminuem a vida útil do produto nas prateleiras (Schulte et al., 1992).

A redução de lesões, através da diminuição de impactos e a manutenção da cadeia de frio em produtos hortícolas e frutas, permitem que esses sejam apresentados livres de deformidades e danos físicos e patológicos, contribuindo assim para a diminuição dos índices de perdas de pós-colheita e a manutenção da qualidade (García-Ramos et al., 2004, Fischer et al., 2009).

Com o propósito de detectar e quantificar os impactos sofridos por frutas e hortaliças durante os processos de pós-colheita, alguns dispositivos eletrônicos conhecidos como esferas instrumentadas vem sendo desenvolvidos e aperfeiçoados. O primeiro equipamento desse tipo foi apresentado por O'Brien et al. (1973). No qual há diversas limitações técnicas que prejudicam sua utilização, como por exemplo, a dificuldade para transmitir um sinal analógico sem fio.

O dispositivo de gravação de impacto (IRD), desenvolvido em um projeto de pesquisa cooperativa que envolve a *Agricultural Research Service* e *Michigan State University* descrito na patente US4745564 por Tennes et al. (1988) e no trabalho de Zapp et al. (1990), apresenta uma esfera instrumentalizada de 89 mm de diâmetro, constituída de um microcontrolador, bateria e um acelerômetro piezoelétrico triaxial para medida de impactos superiores a um valor pré-determinado, com a indicação dos momentos em que esses impactos ocorreram. Porém, nesse equipamento os dados são armazenados internamente no IRD, e não é possível medir acelerações baixas.

Por sua vez, o aparato descrito na patente US4829812 por Parks and Anderson (1989), desenvolvida por pesquisadores escoceses, também visa à medida do estresse mecânico de frutas e hortaliças, obtém dados através de acelerômetro piezoelétrico e esses são transmitidos

para um equipamento externo de leitura, havendo necessidade de conexão por cabos entre as duas unidades para que o resultado possa ser transmitido.

Em relação a outras possíveis variáveis causadoras de lesões, Herold et al. (1996) desenvolveram uma esfera para detecção de lesões em frutas e hortaliças durante colheita e manejo. Trata-se de uma esfera preenchida com líquido que permite medir o aumento da pressão interna quando o instrumento é impactado utilizando um transdutor de pressão *Pressure Measuring Sphere* (PMS). As medidas de variação de pressão são armazenadas no equipamento, juntamente com a indicação do momento em que aconteceram para posterior transferência para computador convencional. Como esta tecnologia foi desenvolvida com o único intuito da detecção de impactos, se não tiver nenhum impacto acima de certo limiar, a esfera não fornece nenhuma informação.

Mais recentemente, Muller et al. (2009) desenvolveram um equipamento para medir compressão, impacto, temperatura e umidade em frutas e hortaliças durante colheita e manuseio. Nesta esfera os dados são armazenados numa memória interna e a comunicação sem fio somente é utilizada para transferir os dados coletados da esfera para visualização e pós-processamento no computador. Em um trabalho posterior, Muller et al. (2012) também desenvolveram uma esfera mais simples e de baixo custo somente para a medição da compressão utilizando sensores piezoelétricos.

Uma outra esfera instrumentada foi desenvolvida por Nicolau (2009) e descrita na patente BRPI1009963-8 Fruett et al. (2013), no qual os autores descrevem um dispositivo capaz de medir impacto, vibração, tempo, temperatura, umidade e localização geográfica simultaneamente. Neste dispositivo os impactos são medidos utilizando acelerômetros capacitivos, porém em uma faixa pequena de aceleração e os dados são armazenados numa memória interna dentro da esfera. Não possui comunicação sem fio, nem processamento em tempo real. Além disso, somente são armazenados os dados quando a esfera detecta um impacto.

Outras esferas instrumentadas conhecidas são o PTR200 (Canneyt et al., 2003) e a *Smart Spud* descrita na patente US006125686A (Haan and McNally, 2000, Masitek, 2013). Estas duas esferas instrumentadas ou batatas eletrônicas (pelo seu formato), utilizam um transmissor para enviar o sinal, a partir de um acelerômetro piezoelétrico de três eixos, para um receptor remoto. Medem aceleração/impactos numa faixa entre 9 e 500 *g*, devido ao tipo de acelerômetro utilizado. Portanto, somente medem acelerações consequentes de impactos, não sendo possível nesses equipamentos medir as lesões derivadas de pequenas acelerações ou vibrações.

Por último, o mais recente desenvolvimento foi apresentado por Yu et al. (2011a, 2012) os quais desenvolveram uma mini esfera para a medição de impactos durante colheita, principalmente em frutos pequenos como mirtilos (*blueberries*). Nesta esfera os dados são armazenados

internamente e precisa ser ligada com fios numa caixa de interface para poder descarregar os dados num computador. Esta esfera não possui comunicação sem fio, nem processamento em tempo real. Além do hardware, Yu et al. (2011b) também desenvolveram um software para análise dos dados depois destes serem descarregados no computador.

Diferentemente, de todas as esferas instrumentadas conhecidas, a Esfera Eletrônica Sem Fio (EESF) desenvolvida neste trabalho, é a única que possui comunicação sem fio somada a um *software* de processamento em tempo real de forma que os dados não precisam ser armazenados na EESF. A mesma ainda mede acelerações estáticas e dinâmicas, inclusive pequenas acelerações para caracterizar movimentos lentos e vibrações. Além de permitir um pós-processamento com opção de sincronização com dados de vídeo via *software*.

1.2 Esporte

O aprimoramento da técnica como meio à busca de melhores resultados na prática esportiva depende de um melhor conhecimento de fatores cinemáticos, biomecânicos, fisiológicos, dentre outros. Contudo na maioria dos casos, os métodos aplicados para a estimativa destes fatores requerem que o atleta fique restrito ao laboratório ou faça uma interrupção ou mudança na sua rotina normal de treinamento (Wixted et al., 2007).

Nos últimos anos, novas tecnologias têm sido implementadas para obter informações no próprio local de treinamento, dado que o desempenho do atleta depende do ambiente no qual ele é monitorado, ou seja, o desempenho de um atleta estudado em condições de laboratório é diferente do obtido no campo ou local de atuação (Armstrong, 2007).

Além disso, devido ao alto nível dos esportistas na atualidade, há um grande interesse em obter informações específicas e objetivas de cada atleta, afim de auxiliar os treinadores e os atletas no acompanhamento e progressão do desempenho. Outro fato é que uma realimentação apropriada destas informações para o próprio atleta melhora significativamente a aquisição e a análise das habilidades motoras (Liebermann et al., 2002).

Neste sentido, o uso de diferentes tipos de sensores e novas tecnologias para obter informações no próprio ambiente vem crescendo rapidamente. Alguns exemplos são o uso de acelerômetros e giroscópios para medir a aceleração e a velocidade em nadadores (Ohgi, 2002) e ciclistas (Roa and Fruett, 2009), sistemas embutidos nos equipamentos esportivos e com realimentação em tempo real como os desenvolvidos por Baca and Kornfeind (2006), além do mais difundido: uso de câmeras e plataformas de força nas análises biomecânicas.

Especificamente falando da medição de impactos e monitoramento na bola de futebol podemos citar algumas patentes, entre elas a patente europeia EP2388048A1 na qual Pan et al. (2011) descreve um método para determinar a trajetória de um objeto em movimento,

1.3. Visão geral dos instrumentos desenvolvidos

particularmente uma bola, através da obtenção de informações sobre a aceleração triaxial, e componentes de força e torção. O método compreende preparar uma unidade operacional, dotada de memória com as informações de peso e tamanho do objeto, e uma unidade de medição compreendendo um acelerômetro triaxial implantado no objeto. A partir desta construção, é calculada a posição, aceleração e componentes vetoriais dos eixos três eixos em relação a uma referência.

A patente internacional WO2008015465 Sangha (2008) descreve uma bola compreendendo acelerômetros MEMs (em até 6 unidades), um processador de sinais e uma memória para avaliar parâmetros como velocidade, distância, posição, altura, frequência de rotação e outros. No entanto, este dispositivo não possui comunicação sem fio, e as informações são processadas localmente e visualizadas em um *display*, com um painel para ajuste, na própria bola.

Na patente US20070059675 Kuenzler and Englert (2007) utilizam sinais de rádio para medir a frequência de rotação de objetos móveis no jogo, como por exemplo bolas de futebol. Finalmente a patente US20090029754 descrita por Slocum and Kennett (2009), propõe o monitoramento do movimento do equipamento esportivo em tempo real, mas com o intuito de criar interações simuladas ou virtuais dos torcedores com os atletas.

1.3 Visão geral dos instrumentos desenvolvidos

Neste trabalho utilizamos três abordagens diferentes para o estudo e análise dos impactos. A primeira foi o uso de sensores de aceleração embutidos no nosso objeto de estudo, para a qual foi desenvolvida a EESF, de forma a medir as acelerações sofridas internamente pelo objeto. A segunda foi utilizar uma Plataforma de Força (PF) para medir a força de reação da EESF ou de qualquer outro objeto durante um impacto, para o qual desenvolvemos a nossa própria PF, com resposta estática e dinâmica, para uma faixa de $\pm 2,2$ kN, uma alta taxa de amostragem, alta Relação Sinal-ruído (SNR) e com a opção de sincronismo com vídeo por sua parte de baixo. Por último trabalhamos com o método da cinemetria para análise de movimento através de câmeras, sendo esta uma ferramenta muito importante para a validação dos resultados obtidos com a PF, principalmente na medida da velocidade e do deslocamento. Na Figura 1.1 é apresentado o esquema em que todos os instrumentos podem ser integrados e utilizados simultaneamente.

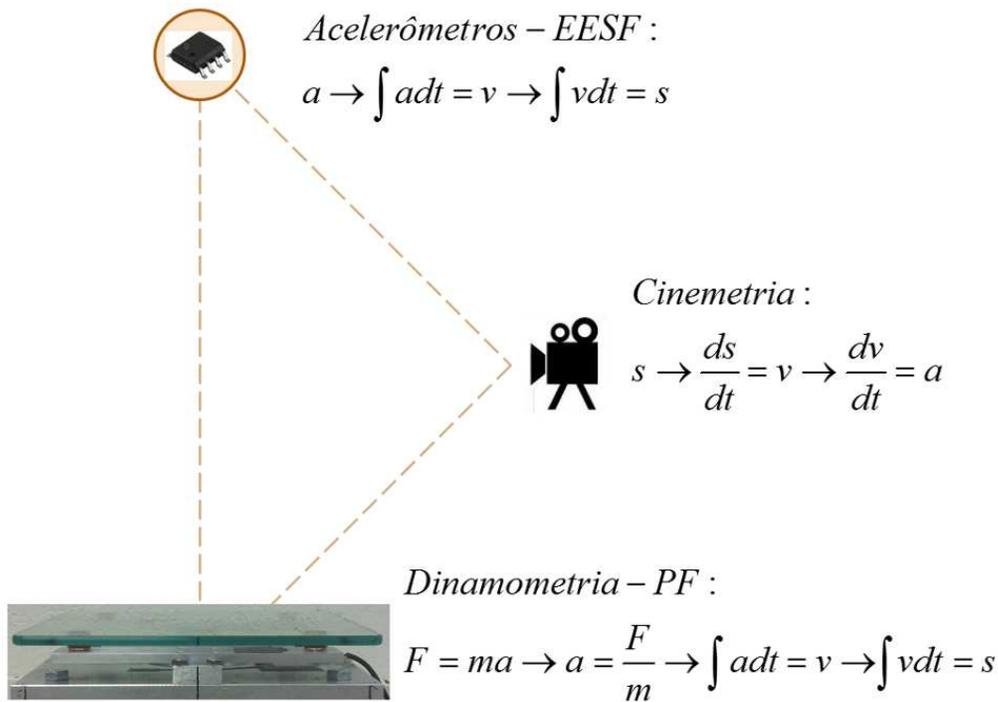


Figura 1.1: Integração das três abordagens.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Contribuir ao desenvolvimento de novos instrumentos para estudo e análise do impacto sofrido por frutos durante os processos de pós-colheita na agricultura e os impactos sofridos pela bola de futebol em atividades esportivas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma esfera instrumentada sem fio para medir e processar impactos em tempo real.
- Desenvolver uma interface gráfica para facilitar a análise dos impactos.
- Desenvolver uma nova plataforma de força para medição de impactos.
- Desenvolver instrumentos de fácil manuseio e baixo custo visando uma difusão mais efetiva da tecnologia.
- Integrar diferentes tecnologias favorecendo o estudo do impacto sobre diferentes objetos.

Esfera Eletrônica Sem Fio

A chamada Esfera Eletrônica Sem Fio (EESF) é um sistema de monitoramento de variáveis biomecânicas sem fio e em tempo real, que integra *hardware* e *software*, podendo ser aplicado dentre outros no esporte e na agricultura. Na agricultura, o circuito eletrônico da EESF, também chamado de placa móvel, é encapsulado dentro de uma esfera, para facilitar o monitoramento de frutas e outros produtos perecíveis mediante a aquisição de variáveis que afetam a qualidade do produto durante seu processamento, armazenamento e/ou transporte. No esporte, a placa móvel pode ser encapsulada, acoplada ou embutida em equipamentos esportivos, como por exemplo, bolas, luvas de boxe, calçado, coletes, pulseiras ergonômicas, dentre outros, para possibilitar o monitoramento de atletas ou de equipamentos esportivos.

2.1 Funcionamento

A EESF foi projetada para operar de forma bastante simples. Inicialmente deve ser instalado um *software* e conectada uma placa receptora de dados na porta USB do dispositivo de processamento a ser utilizado (computador, *tablet* ou *smartphone*). Uma vez feito isto basta remover o pino da placa móvel, e, a partir daí acende-se um LED e inicia-se a transmissão dos dados via rádio, que são recebidos pela placa receptora e processados e visualizados em tempo real pelo *software*. O esquema geral, identificando os principais componentes do sistema é mostrado na Figura 2.1, na qual (1) placa móvel, (2) *firmware*, (3) pino para acionar a chave mecânica que liga ou desliga a placa móvel, (4) placa receptora, (5) módulo de Rádio Frequência (RF), (6) *software* de Análise em Tempo Real (RTA), (7) *software* de Análise e Pós-processamento (PPA) e (8) dispositivo de processamento.

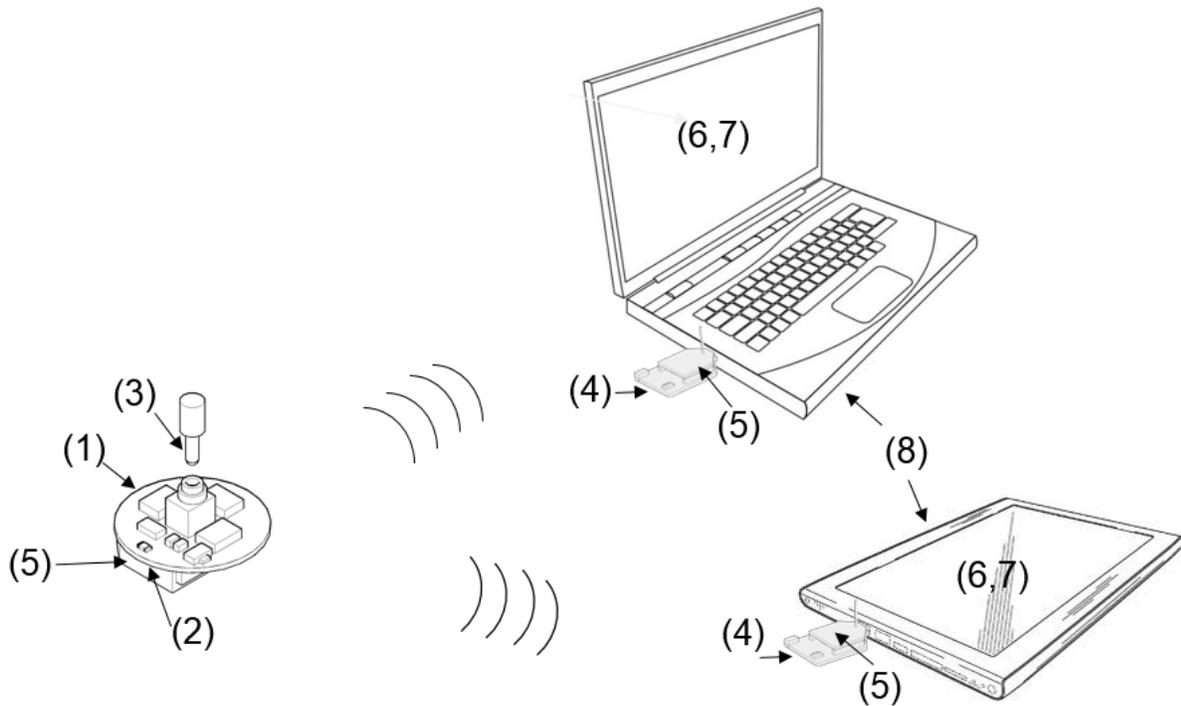


Figura 2.1: Esquema geral do sistema da EESF.

2.2 Hardware

O *hardware* da EESF compreende: uma placa móvel, uma placa receptora e meios para encapsulamento. Desde o início do projeto tínhamos como premissa que o *hardware* da EESF tinha que ser pequeno, leve e com baixo consumo de corrente para poder ser alimentado com bateria e encapsulado como uma esfera instrumentada, ou embutido nos equipamentos esportivos com a menor interferência possível sobre o objeto em estudo. Pensando nisso, procuramos reduzir o número de componentes, principalmente na placa móvel, sendo estes na sua maioria dispositivos de montagem superficial (SMD). Além disso, trabalhamos com um módulo de RF no padrão *ZigbeeTM* e com o menor processamento interno possível, para reduzir o consumo de corrente e, conseqüentemente, aumentar a autonomia do instrumento.

2.2.1 Placa móvel

A placa móvel é composta por um microcontrolador (1), um regulador de tensão (2), um módulo de RF (3), sensores de aceleração (4), LED (5), bateria recarregável (6), conector com chave mecânica para ligar, desligar ou carregar a bateria (7) e pino para acionar a chave mecânica (8), como mostrado na Figura 2.2(a).

As Figuras 2.2(b) e 2.2(c) mostram uma foto com a vista superior e lateral da placa

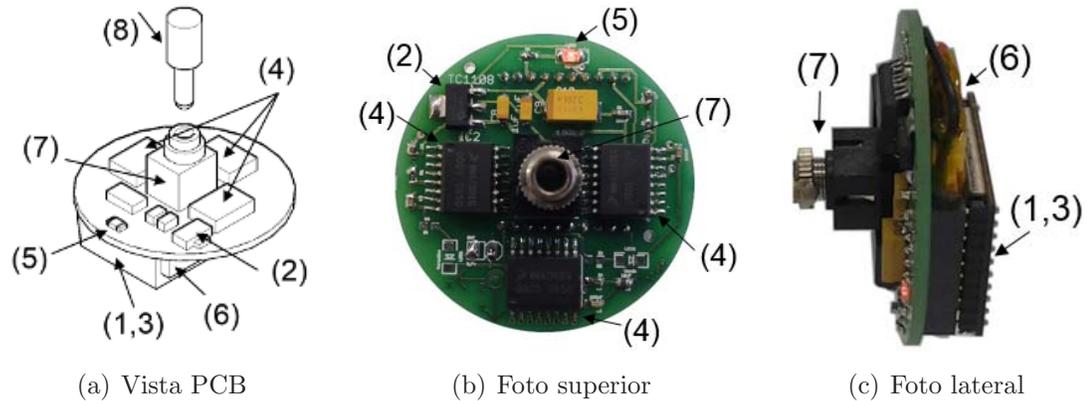


Figura 2.2: Placa móvel da EESF.

móvel, a qual tem 45,8 mm de diâmetro e 21,5 mm de altura. No desenho do PCB (*Printed Circuit Board*) de dupla face da placa móvel, foram tomados alguns cuidados importantes, com relação ao tamanho, formato, posicionamento dos componentes e *layout* das trilhas.

Foi escolhido o formato circular, com o menor diâmetro possível para o posicionamento de todos os componentes afim de facilitar seu posterior encapsulamento. Para minimizar ruídos nos sinais analógicos, foram separadas as trilhas com sinais analógicos dos digitais, evitando seu cruzamento, além do uso de capacitores de desacoplamento próximos dos pinos de alimentação de todos os Circuitos Integrados (CI) para prevenir a ocorrência de transientes de tensão devido ao chaveamento de circuitos digitais internos em cada CI. O detalhe do *layout* da PCB é mostrado na Figura B.1 do Apêndice B.

Acelerômetros

Os acelerômetros que compõe a placa móvel são Microeletromecânicos (MEMs) tipo capacitivos, possibilitam a aquisição de acelerações dinâmicas e estáticas; dessa forma, mesmo com a placa móvel parada é possível por exemplo, medir a aceleração da gravidade.

Utilizamos três acelerômetros da FreescaleTM, um para cada eixo de aceleração, sendo dois MMA2301 utilizados para os eixos X e Y e um MMA1212D para o eixo Z. Os acelerômetros foram montados centralizados na placa móvel numa configuração ortogonal entre si. Esta configuração de montagem foi necessária porque na atualidade ainda não há um acelerômetro triaxial em um único CI que trabalhe na faixa de aceleração utilizada em nossas aplicações.

Estes sensores medem as acelerações, impactos e vibrações a que os produtos perecíveis ou equipamentos esportivos possam ser expostos. Os acelerômetros utilizados trabalham numa faixa entre $\pm 0,5$ e ± 200 g para cada eixo. Com isso o módulo da aceleração pode chegar até 346 g , sendo (g) uma aceleração comparada à da gravidade que foi considerada equivalente a $9,8 \text{ ms}^{-2}$.

A ampla faixa de aceleração e o uso de uma configuração tri-axial de acelerômetros possibilitam, por exemplo, medir e identificar acelerações baixas em cada eixo, normalmente associadas à gravidade ou a movimentos lentos (geralmente abaixo de 5 *g*). Alguns exemplos são: a rotação da placa móvel quando encapsulada dentro de uma esfera; a esfera ou a bola esportiva sendo movimentada sobre uma esteira transportadora ou num gramado; o balanço dos braços numa corrida; dentre outros. Já acelerações na faixa de 8 até 10 *g* permitem a identificação de vibrações, e acima desta faixa caracterizam impactos com diferentes intensidades.

Outra qualidade relevante dos acelerômetros capacitivos utilizados é que eles são ratiométricos, ou seja, sua sensibilidade é linearmente proporcional à tensão de alimentação, possibilitando o uso da mesma tensão de alimentação dos outros componentes (3,3 V), na qual a sensibilidade dos acelerômetros utilizados é de 5,28 mV/*g*. Estes acelerômetros também possuem um circuito de auto-teste, recurso muito interessante que permite a verificação da integridade dos acelerômetros, testando-os antes de uma nova utilização.

Módulo de rádio frequência

O módulo de RF utilizado na placa móvel é o *Zigbee*TM XBee da Digi[®] introduzido no mercado internacional em 2007. Este é o componente de maior consumo de corrente na placa móvel, porém é considerado de baixo consumo se comparado com outros protocolos de comunicação sem fio como *Bluetooth*[®] ou *WiFi*TM. O XBee tem um consumo de corrente de 50 mA @3,3 V na recepção/Idle e 45 mA @3,3 V durante a transmissão. Alcance de 100 m, 1 mW de potência máxima transmitida, antena tipo *chip*, taxa de Transmissão (TX) de dados de RF entre 20 e 250 kbps, taxa de TX de dados da interface serial entre 1,2 e 115,2 kbps e frequência de operação em 2,4 GHz.

O padrão *Zigbee*TM (IEEE 802.15.4) começou a ser utilizado no ano de 2002 com um crescente número de soluções oferecidas no mercado das redes sem fios. A especificação *Zigbee*TM define as camadas de rede, aplicação e segurança entre elas. A definição da camada física e de acesso ao meio é regulada pela norma IEEE 802.15.4. No nível físico destacam-se duas características importantes: alcance máximo de 150 metros e operação na frequência *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) que não requer licença para funcionamento e a qual possui três frequências distintas (Messias, 2009):

- 2,4 GHz (16 canais), taxa de TX 250 kbps (uso global).
- 915 MHz (10 canais) taxa de TX 40 kbps (América e Austrália).
- 868 MHz (1 canal) taxa de TX 20 kbps (Europa).

Complementando a norma IEEE 802.15.4, no que regula às outras camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) o *Zigbee*TM, tem como principais características o fato de ser um protocolo para aplicações de baixo consumo e de baixo custo, excelente imunidade contra interferências, e a capacidade de hospedar milhares de dispositivos em uma rede (mais que 65k), com taxas de transferências de dados variando entre 20 kbps a 250 kbps. Estas características o tornam ideal para sistemas de monitoramento e sensoriamento, principalmente para dispositivos portáteis.

Bateria

Com relação à alimentação da placa móvel, esta é feita com bateria, porém foi preciso utilizar uma bateria de alta capacidade de corrente para obter uma boa autonomia e, ao mesmo tempo, pequena e leve. Para atender o consumo de corrente do sistema foi utilizada uma bateria recarregável de *Lithium-Ion*. Este tipo de bateria é utilizada, por exemplo, em telefones celulares e dispositivos de navegação portáteis. A bateria utilizada na placa móvel possui uma capacidade de corrente de 300 mAh, tensão nominal de 3,7 V, desenho compacto (30×20×5 mm), baixo peso (5 g) e alta capacidade em termos de descarga de corrente contínua.

Regulador de tensão

O regulador de tensão utilizado foi o TC1108 LDO (*Low Drop-Out Regulator*) da Microchip. Este regulador possui uma queda de tensão máxima de 160 mV para uma corrente de operação de até 100 mA, consumo de corrente extremamente baixo (50 μ A), entrada de tensão até 6 V e uma saída de corrente máxima de 300 mA.

O consumo máximo de corrente da placa móvel não ultrapassa os 60 mA, e portanto o regulador está trabalhando com menos de um terço da sua capacidade, o qual dispensa o uso de dissipadores no circuito.

Conector para carga e chave mecânica

No centro da PCB posicionamos um conector que possui uma chave mecânica interna, que é acionada ao introduzir o pino ou *jack* macho de 3,5 mm. Esta chave mecânica foi utilizada para ligar ou desligar a placa móvel, e os dois terminais do mesmo conector para carregar a bateria utilizando o pino macho de 3,5 mm e um carregador externo.

Com o pino conectado à placa, a bateria fica isolada do circuito, desligando a EESF e ainda permitindo a carga da mesma se o pino estiver ligado no carregador externo. Caso contrario,

a EESF encontra-se com o LED aceso e transmitindo os dados para a placa receptora. A Figura 2.3 mostra a placa móvel sendo carregada.



Figura 2.3: Carregamento da bateria da placa móvel da EESF.

Microcontrolador

A placa móvel também possui um microcontrolador cuja função principal é coordenar a aquisição contínua dos dados dos acelerômetros com alta taxa de amostragem e ainda empacotar e transmitir os dados utilizando o módulo de RF. Dado que o programa de controle do microcontrolador é relativamente simples, utilizamos o mesmo microcontrolador do módulo de rádio, diminuindo ainda mais o número de componentes na placa móvel.

O microcontrolador de 8 bits do módulo de RF XBee, possui 6 conversores analógico-digital (ADC) de 10 bits, 16 canais digitais de entrada/saída (I/O), ajuste da taxa de amostragem até 1000 Hz, 32 Kb de memória, oscilador interno, e operação no modo *Application Programming Interface* (API) utilizando *frames* ou pacotes.

Para os sinais analógicos dos acelerômetros foram utilizados 3 canais do ADC, um para cada eixo, e um canal digital de saída para habilitar ou desabilitar o circuito de auto-teste dos três acelerômetros simultaneamente. O diagrama esquemático completo da placa móvel é apresentado na Figura 2.4.

2.2.2 Placa receptora

A função da placa receptora, como seu nome indica, é receber os dados enviados pela placa móvel via RF realizando uma ponte entre a conexão de RF e a ligação física com a porta USB do dispositivo de processamento. A placa receptora é composta por: soquete para módulo de RF Bee (1), CI FTDI (*Future Technology Devices International*) (2), regulador de tensão (3), chave para alimentar com 5 V ou 3,3 V (4), LEDs indicadores (5) e conector para USB (6), como mostrado na Figura 2.5(a).

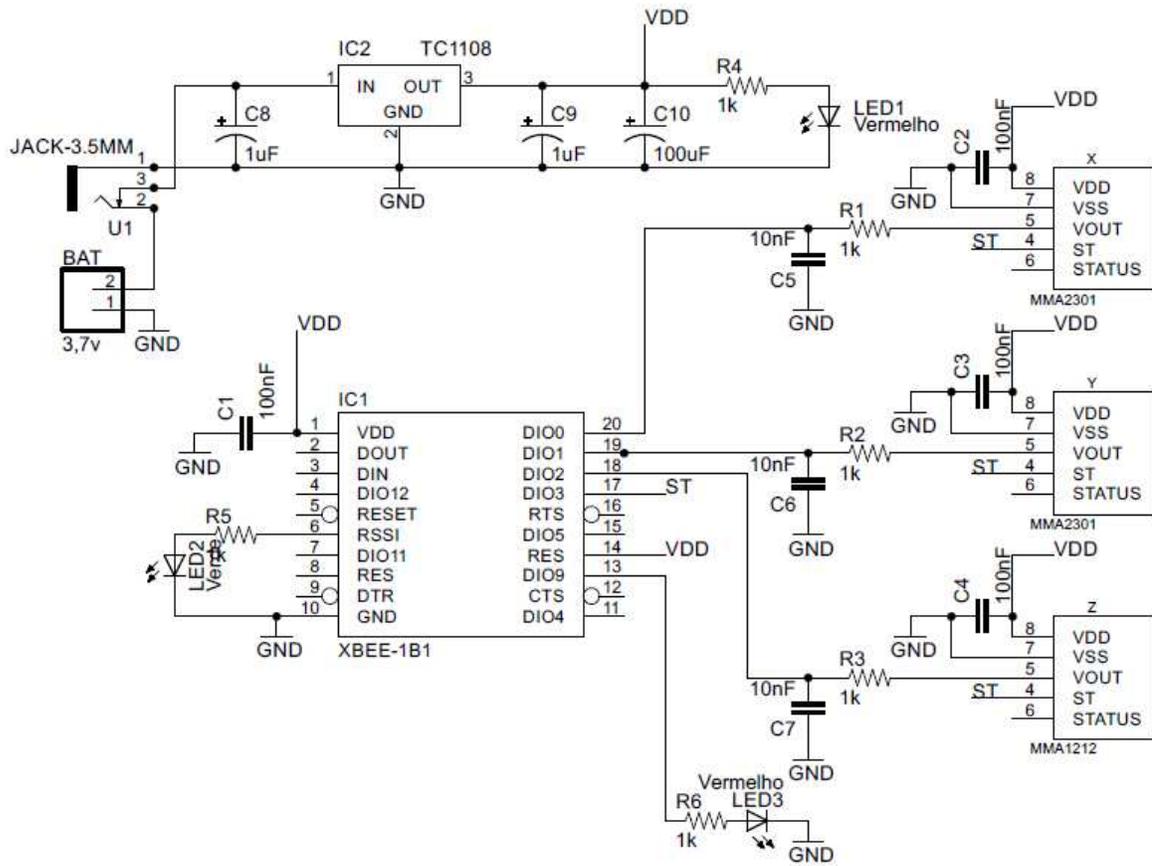
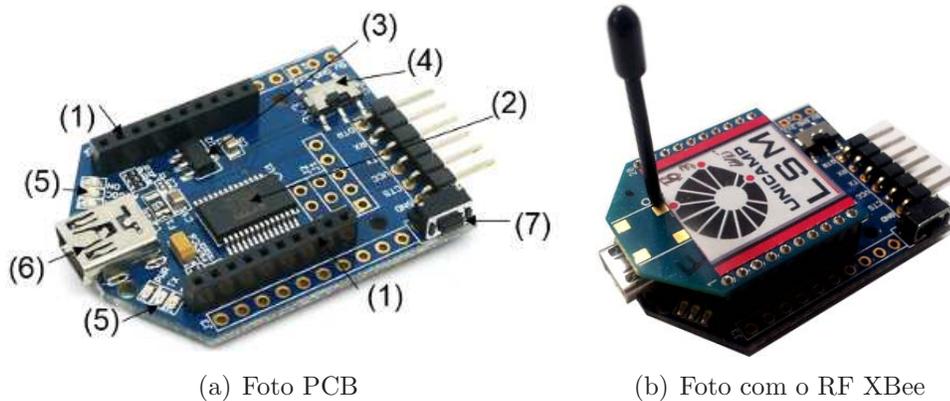


Figura 2.4: Diagrama esquemático da placa móvel da EESF.



(a) Foto PCB

(b) Foto com o RF XBee

Figura 2.5: Placa receptora da EESF.

Esta placa receptora, por sua vez, deve conter o mesmo tipo de rádio utilizado na placa móvel como mostrado na Figura 2.5(b). Neste trabalho utilizamos uma placa receptora comercial (UartSBee) (Seeed, 2012), porém de *hardware* aberto, ou seja, de domínio público, que permite que sejam feitas modificações no *hardware* original se necessário. O componente

central da placa receptora é o CI FTDI o qual realiza a conversão de RS-232 ou TTL para sinais compatíveis com a porta USB. O CI FTDI ainda disponibiliza *drivers* para diferentes sistemas operacionais, permitindo que o *software* instalado no dispositivo de processamento acesse os dados da porta USB como se fosse uma porta serial convencional (serial virtual).

2.2.3 Encapsulamento

A placa móvel pode ser encapsulada de diferentes formas, onde literalmente a forma do invólucro molda sua aplicação. Apresentamos a seguir dois exemplos, sendo o primeiro em agricultura, onde a placa é encapsulada dentro de uma pseudo-laranja e no segundo o encapsulamento é realizado dentro de uma bola de futebol comercial.

Agricultura

Na agricultura, a placa móvel toma a forma de uma fruta ou qualquer produto perecível, com características similares no peso, tamanho, formato e densidade. Desta maneira, o monitoramento e aquisição das variáveis que afetam a qualidade do produto se torna mais próxima das sofridas dentro de uma fruta real.

Para isso, a placa móvel inicialmente é encapsulada dentro de uma esfera de Poliuretano (PU) transparente, com um diâmetro de 63 mm, densidade relativa de aproximadamente 1,1 e com uma massa final de aproximadamente 160 g, a qual é considerada adequada para experimentos com laranjas e maçãs (Muller et al., 2009). A EESF encapsulada e ao lado de outras laranjas é mostrada na Figura 2.6.



Figura 2.6: EESF com encapsulamento de PU e ao lado de laranjas.

Sobre esta esfera é possível colar uma casca ou capsula com o formato similar da fruta desejada. Para isto, inicialmente foi utilizado um *scanner* e uma impressora 3D, digitalizando uma laranja e imprimindo este modelo digital em gesso, como apresentado na Figura 2.7. Este

2.2. Hardware

processo foi realizado em cooperação com a Divisão de Tecnologias Tridimensionais (DT3D) do Centro de Tecnologia da Informação (CTI) Renato Archer de Campinas.

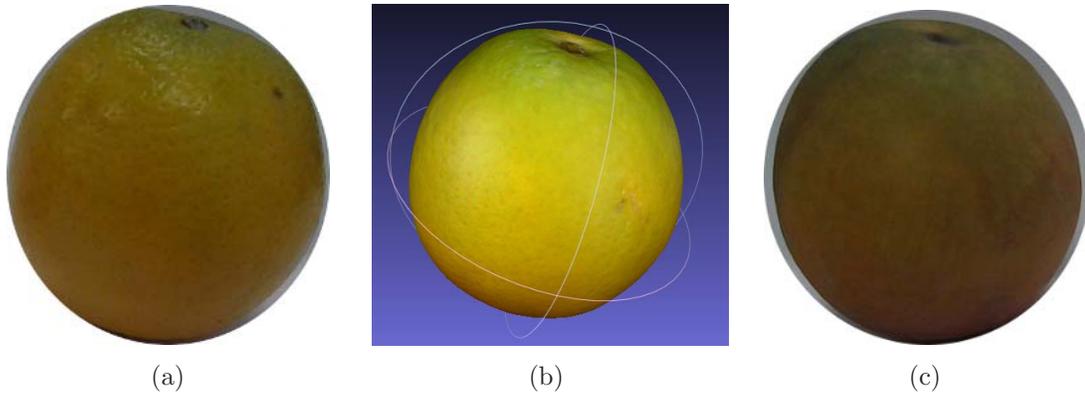


Figura 2.7: Laranja real (a), modelo (b) e impressão 3D em gesso (c).

Processando os dados do modelo 3D foram definidas duas cascas, que na sequência foram impressas utilizando um composto de borracha de dureza *shore* A28 identificado com o nome TangoPlus FullCure 930. O uso dos diferentes materiais disponíveis para este tipo de impressora, permite ainda fazer um ajuste na densidade final da esfera instrumentada através das cascas que serão coladas na EESF. A imagem das cascas com formato da laranja são apresentadas na Figura 2.8.



Figura 2.8: Cascas da EESF com formato da laranja.

Uma característica deste encapsulamento é que não há necessidade do uso de roscas, aumentando a vedação dos circuitos e diminuindo o risco de danos devido ao uso indevido pelos usuários. Este encapsulamento também evita que o usuário acesse indevidamente os componentes eletrônicos da EESF sem destruir a esfera.

Esporte

No esporte, a placa móvel pode ser encapsulada dentro de bolas esportivas ou dentro de outros equipamentos esportivos, como luvas de boxe, calçado, coletes, pulseiras ergonômicas, dentre outros, possibilitando o monitoramento do esportista que estiver utilizando o equipamento instrumentalizado.

No caso particular das bolas esportivas a placa móvel pode ser fixada no centro da bola durante a sua construção, sem precisar de encapsulamento adicional. Para isso a placa móvel foi projetada para não ultrapassar 20 g, de forma que a massa final da bola possa ser mantida realizando uma pequena compensação em alguma das etapas da fabricação da mesma, por exemplo, com uma pequena redução na camada de látex. Comunicação confidencial com o engenheiro Reginaldo Zunkeller da Cambuci S.A (Zunkeller, 2010).

A fixação no centro da bola de futebol permite, por exemplo, utilizando os acelerômetros, determinar o sentido, a magnitude e a velocidade inicial da bola durante o chute, que são informações valiosas para os treinadores e atletas visando o treinamento e aprimoramento da técnica. Na Figura 2.9 é apresentado o esquema de encapsulamento e a visualização da placa móvel encapsulada dentro de uma bola de futebol.

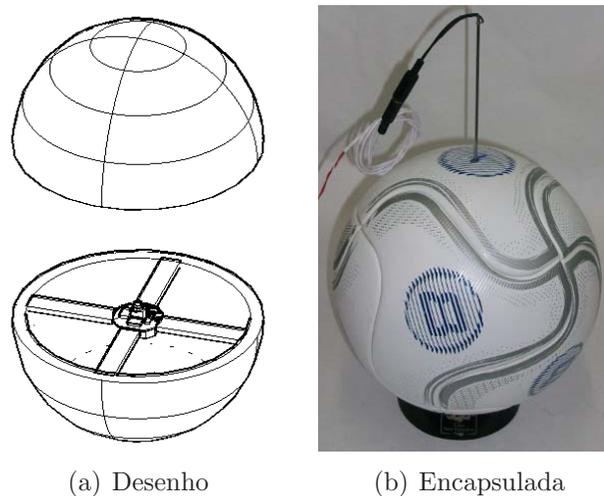


Figura 2.9: Encapsulamento da placa móvel na bola de futebol.

O trabalho de encapsulamento dentro da bola de futebol foi realizado em cooperação com o departamento de pesquisa e desenvolvimento da empresa Cambuci S.A na cidade de Itabuna na Bahia. A pedido da empresa, maiores detalhes e explicações sobre a forma de encapsulamento não podem ser apresentados. Infelizmente nas duas tentativas de encapsulamento da placa móvel dentro da bola de futebol, a bateria de *Lithium-Ion* foi danificada durante o processo de vulcanização devido à alta temperatura, impedindo que fossem feitos testes.

2.2. Hardware

O processo de encapsulamento da EESF, envolvendo vulcanização, dentro da bola de futebol foge dos objetivos deste trabalho. Por outro lado, a solução deste problema abre um campo com enorme potencial para o desenvolvimento de novos produtos.

2.2.4 Sistema local de coordenadas

O posicionamento dos acelerômetros na placa móvel define um sistema local de coordenadas ortogonais, com origem aproximadamente no centro da placa como mostrado na Figura 2.10.

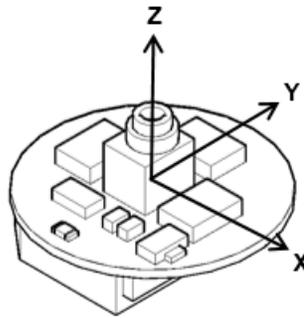


Figura 2.10: Desenho da placa móvel da EESF com o sistema de coordenadas.

2.2.5 Resumo do *hardware* da EESF

A placa móvel, sem encapsular, possui um formato circular com 45,8 mm de diâmetro 21,5 mm de altura e uma massa da 12,8 g incluindo todos seus componentes. Na Tabela 2.1 são resumidas as principais características da placa móvel com encapsulamento em PU e sem casca (EESF).

Tabela 2.1: Características da EESF com encapsulamento em PU e sem casca.

Descrição	Especificação
Dimensões da EESF encapsulada	Formato esférico com 63,8 mm de diâmetro
Massa da EESF encapsulada	168 g
Material do encapsulamento	Elastômero de poliuretano Imuthane <i>shore</i> A60, densidade 1,1
Consumo médio de corrente	63 mA
Autonomia	45 minutos
Faixa dos acelerômetros	$\pm 200 g$ para cada eixo (X,Y,Z)
Taxa de amostragem	438 Hz
Módulo de RF	<i>Zigbee</i> TM XBee
Alcance	70 m

2.3 Software

Quanto ao *software*, a EESF possui um programa de controle no microcontrolador (*firmware*) e duas versões de Interfaces Gráficas de Usuário (GUI), uma para aquisição, processamento, visualização e análise em tempo real (RTA) e outra para análise e pós-processamento, que inclui uma opção de vídeo sincronização (PPA).

As GUI desenvolvidas utilizam o padrão de máquina de estados, que consiste em uma série de estados finitos, e uma função de transição que invoca o próximo estado. Seu propósito é atender todos os eventos que possam ocorrer. Qualquer algoritmo descrito como um fluxograma ou diagrama de estados pode ser programado em um padrão de máquina de estados. O RTA e o PPA foram programados utilizando LabVIEW[®] da *National Instruments*, que é uma linguagem que tem sido amplamente adotada na indústria e academia como padrão na aquisição de dados e controle (Travis and Kring, 2006). Geralmente os programas desenvolvidos com LabVIEW[®] são conhecidos como *Virtual Instruments* (VI).

2.3.1 Firmware

Como já foi comentado na Seção 2.2.1, o *firmware* foi projetado para fazer o mínimo de processamento dentro da placa móvel, utilizando o próprio microcontrolador de 8 bits do módulo de RF XBee, dispensando o uso de um microcontrolador adicional.

O módulo RF XBee foi programado no modo API de forma que os dados foram empacotados em *frames* de 92 bytes contendo 10 amostras para cada eixo de aceleração, delimitador inicial, comprimento do pacote, identificador do API, endereço da placa móvel, intensidade do sinal (RSSI) e *checksum*. A Figura 2.11 mostra o fluxograma do *firmware* da EESF.

2.3.2 Software de Análise em Tempo Real

O *software* de Análise em Tempo Real (RTA) utiliza uma arquitetura produtor-consumidor para poder processar e visualizar em tempo real os dados enviados pela placa móvel. Esta arquitetura trabalha com dois *loops* paralelos, um para receber e armazenar os dados temporariamente na memória RAM do computador e outro para processar e armazenar os dados. Esta abordagem permite obter alta taxa de amostragem e dispensa o uso de memória para armazenamento de dados na placa móvel.

Na Figura 2.12 é apresentado o diagrama de transição de estados do RTA, sendo: (1) inicialização, (2) configuração da porta serial, (3) leitura de dados da porta serial, (4) armazenamento de dados na memória RAM, (5) parada, (6) leitura dos dados armazenados na

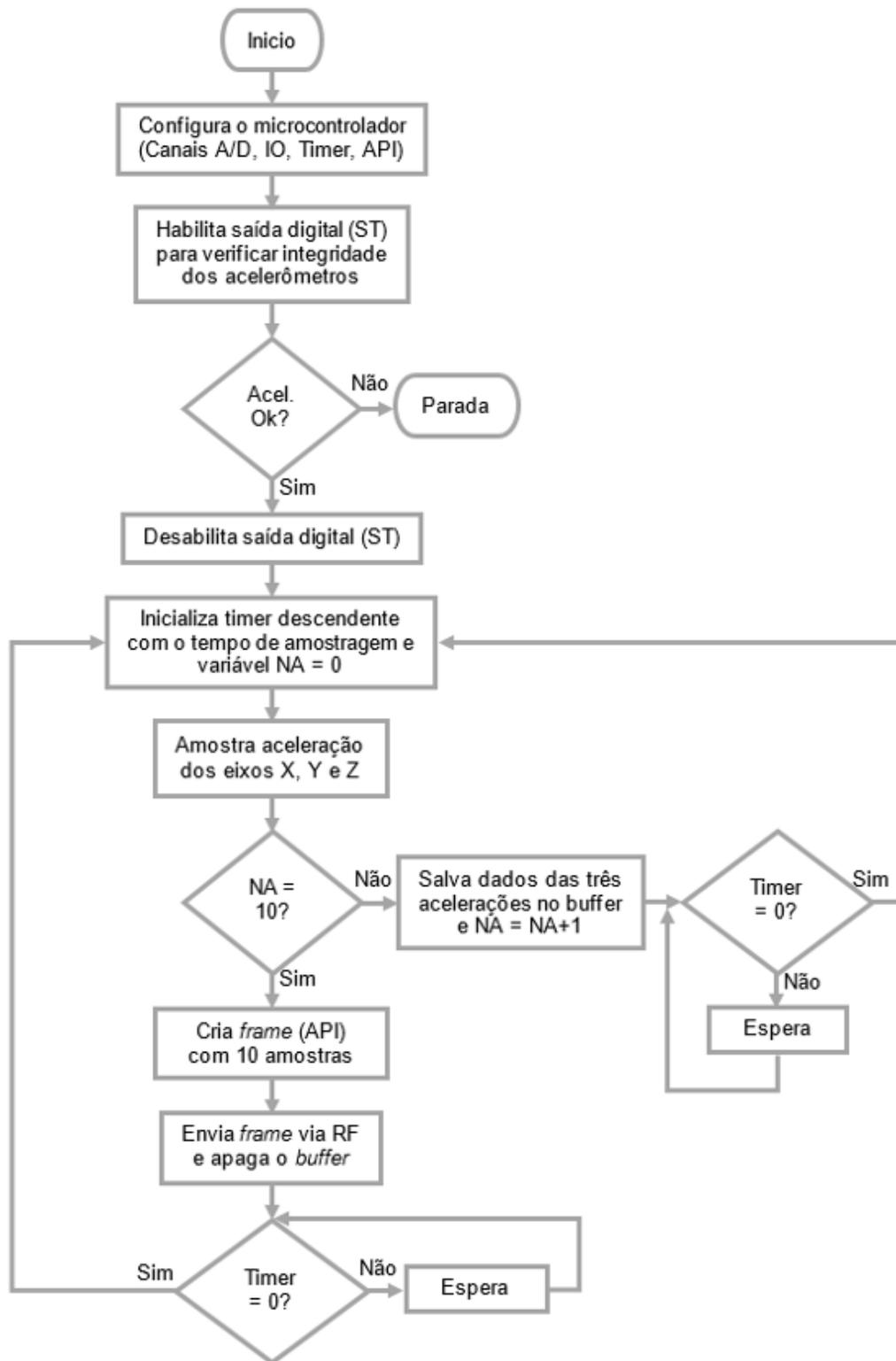


Figura 2.11: Fluxograma do *firmware* da EESF.

RAM, (7) salva dados brutos em disco, (8) leitura parcial do arquivo e divisão de *frames*, (9) processamento de cada *frame* API XBee, (10) conversão dos dados de aceleração do nível do ADC para g , (11) processamento, (12) visualização em Tempo Real (RT), (13) leitura total do arquivo e seleção de *frames*, (14) visualização completa dos dados e (15) salva dados processados em disco.

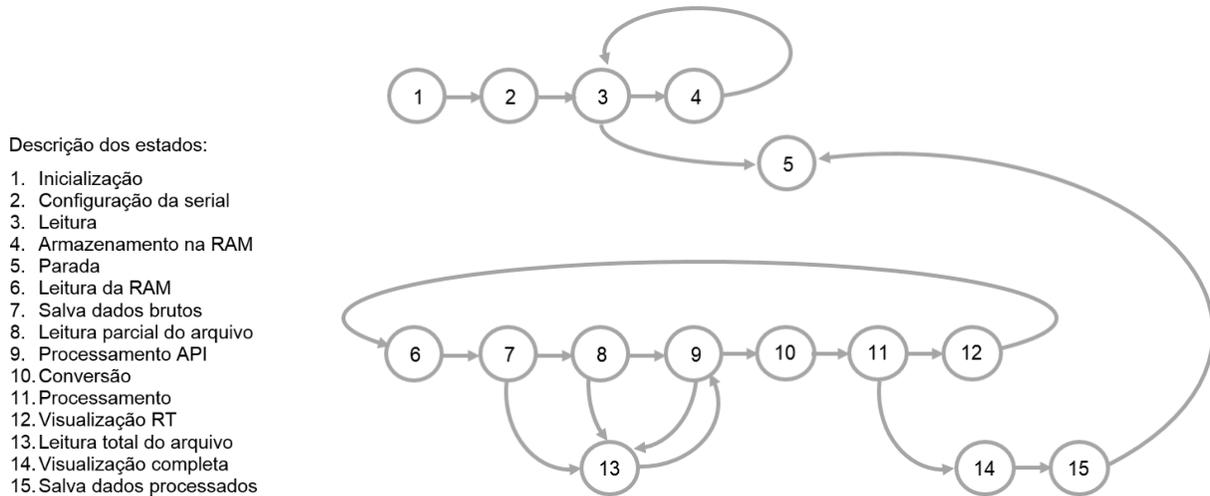


Figura 2.12: Diagrama de transição de estados do *software* RTA.

O *software* RTA apresenta gráficos em janelas fixas de tempo para os três eixos de aceleração, o módulo da aceleração e a velocidade. O RTA também calcula o número de impactos a partir de um limiar definido pelo usuário, os valores máximos, mínimos e médios das acelerações em cada gráfico, e salva os dados brutos e processados. A interface gráfica do RTA é dividida em três abas, sendo:

- *Setup and wireless RX statistics* (configuração e estatísticas da RX sem fio).
- *RT impact information* (informações em tempo real do impacto).
- *Full acquisition* (aquisição completa).

A aba *setup and wireless RX statistics* permite que o usuário ajuste o *offset*, defina o local para salvar os dados, selecione a porta USB (serial virtual) na qual a placa receptora está conectada, ajuste o tempo de atraso para melhorar a visualização, defina a largura e limiar para detecção de impacto, e escolha o comprimento da janela dos gráficos para 5 ou 10 segundos. Na mesma guia também são apresentadas as estatísticas da comunicação sem fio: Uso do *buffer* de memória RAM, amostras por *frame*, endereço de origem da placa móvel, identificador do API, número total de *frames*, porcentagem de sucesso na recepção e indicador da intensidade do sinal recebido (RSSI) como apresentado na Figura 2.13.

2.3. Software

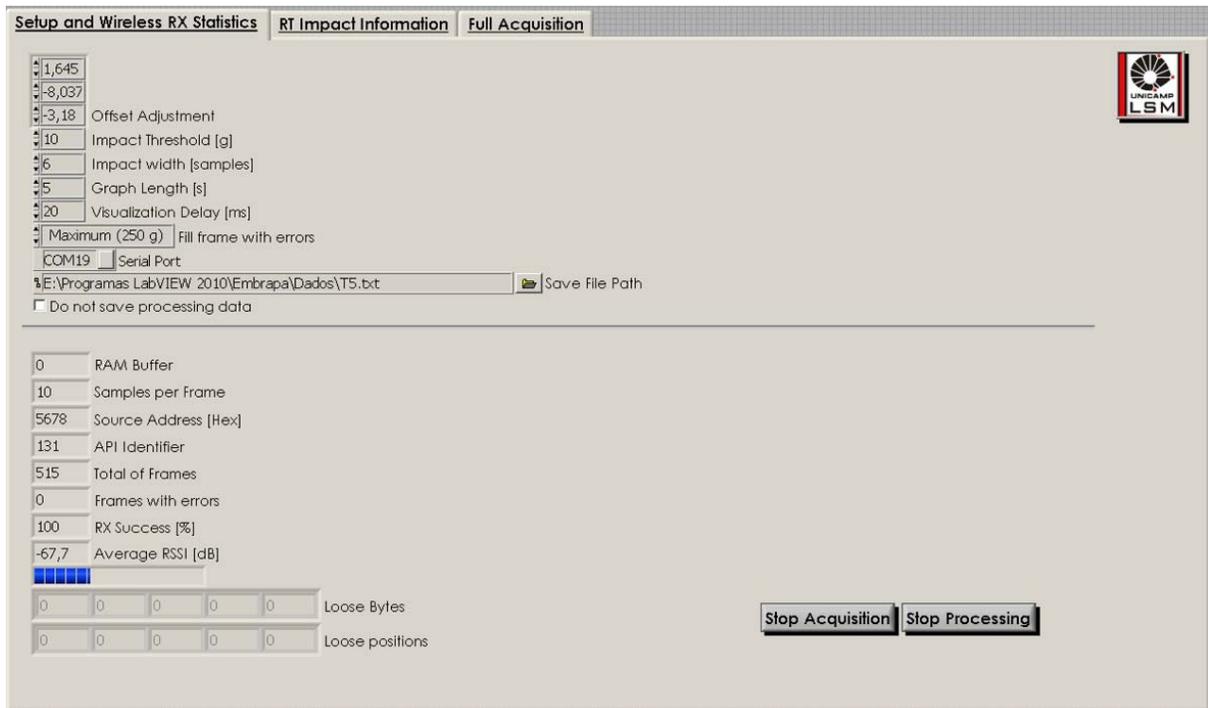


Figura 2.13: Aba *setup and wireless RX statistics* da interface gráfica do RTA.

A aba *RT impact information* apresenta os gráficos dos três vetores de aceleração, o módulo da aceleração e a velocidade, assim como a totalização do número de impactos acima de um determinado limiar e o cálculo do valor máximo, mínimo e médio de cada gráfico. Todos os cálculos feitos nesta aba são válidos apenas para cada comprimento do gráfico. Caso deseje a visualização completa e os cálculos para toda a aquisição, após o término da aquisição, o usuário só precisa selecionar a aba *full acquisition*. O *layout* destas duas abas é similar, mudando apenas a quantidade de dados apresentada. A Figura 2.14 mostra as informações contidas na aba *RT impact information*.

2.3.3 Software de Análise e Pós-processamento

O *software* de Análise e Pós-processamento (PPA) foi desenvolvido para processar e visualizar a informação de impacto/aceleração dos dados brutos previamente armazenados, de forma similar ao processamento feito no RTA. Além disso, o PPA incorpora uma opção de sincronização de vídeo, que permite ao usuário relacionar a aceleração com o evento desencadeador, sendo este um diferencial do nosso instrumento em comparação com os comerciais. Na Figura 2.15 é apresentado o diagrama de transição de estados do PPA, sendo: (1) inicialização, (2) leitura total do arquivo e divisão de *frames*, (3) processamento de cada *frame* API XBee, (4) conversão dos dados de aceleração do nível do ADC para *g*, (5) processamento,

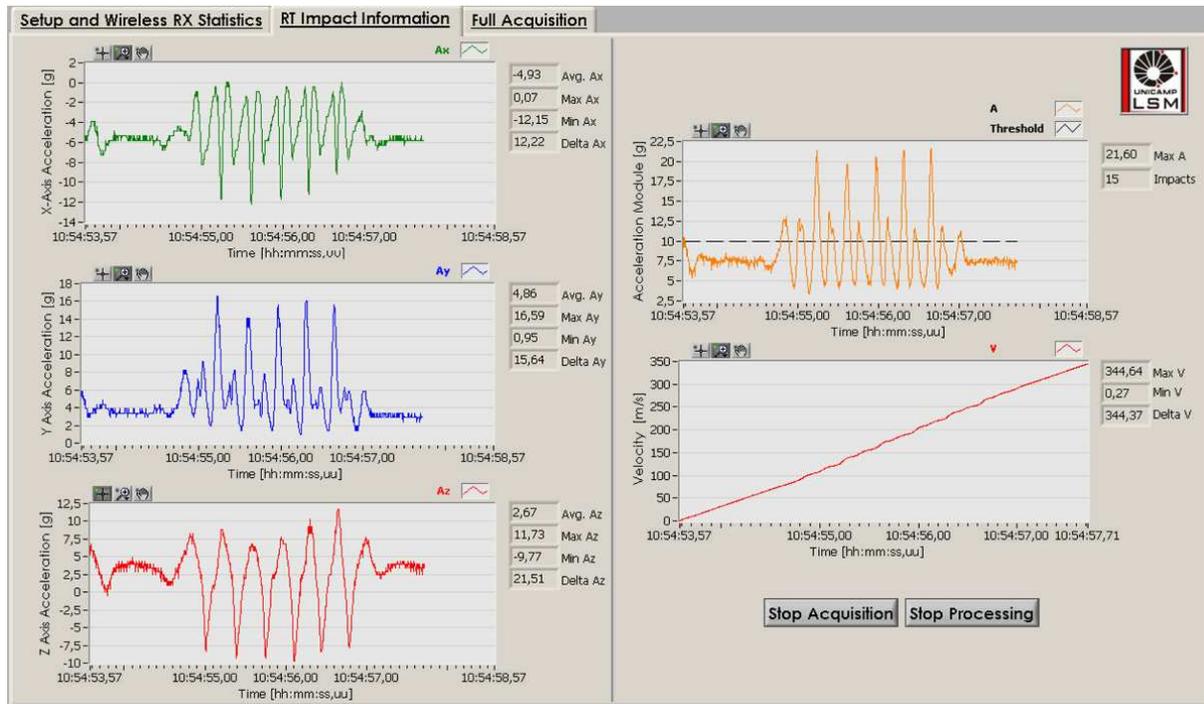


Figura 2.14: Aba *RT impact information* da interface gráfica do RTA.

(6) visualização completa dos dados, (7) salva dados processados em disco, (8) parada, (9) seleciona faixa de tempo, (10) processamento da seleção com sincronismo de vídeo e (11) visualização da seleção.

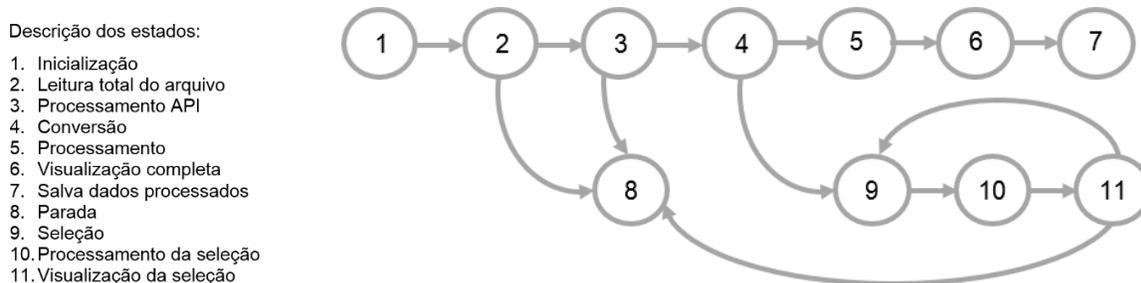


Figura 2.15: Diagrama de transição de estados do *software* PPA.

A interface gráfica do PPA também foi dividida em três abas, sendo:

- *Setup and wireless RX statistics* (configuração e estatísticas da RX sem fio).
- *Full acquisition* (aquisição completa).
- *Selection analysis* (análise da seleção).

As duas primeiras abas apresentam a mesma informação que as abas com o mesmo nome no RTA. A aba *selection analysis* permite visualizar e processar os dados para uma certa

2.4. Calibração

região de interesse. Nesta aba é possível fazer o sincronismo com os dados de vídeo se estes estiverem disponíveis.

Para sincronizar os dados da placa móvel e do vídeo é preciso gravar um evento de queda livre, com baixa altura no início da aquisição dos dados. Pode ser utilizada qualquer tipo de câmera de vídeo desde que se conheça sua frequência de aquisição, inclusive uma simples câmera de celular de 30 Hz.

Na aba *selection analysis* o PPA permite realizar o ajuste nos *frames* de vídeo e nos dados de aceleração sincronizando o pico da aceleração referente ao impacto com o *frame* de vídeo que mostra a imagem do contato com o chão na queda. A partir dessas informações, o *software* permite a visualização quadro-a-quadro, avançando ou retrocedendo no tempo do vídeo e dos dados de aceleração correspondentes. Os três eixos de aceleração são apresentados no mesmo gráfico, no qual aparecem dois cursores paralelos que indicam o intervalo da aceleração relacionado com o quadro de vídeo selecionado. Na Figura 2.16 é apresentada a interface gráfica do *software* PPA.

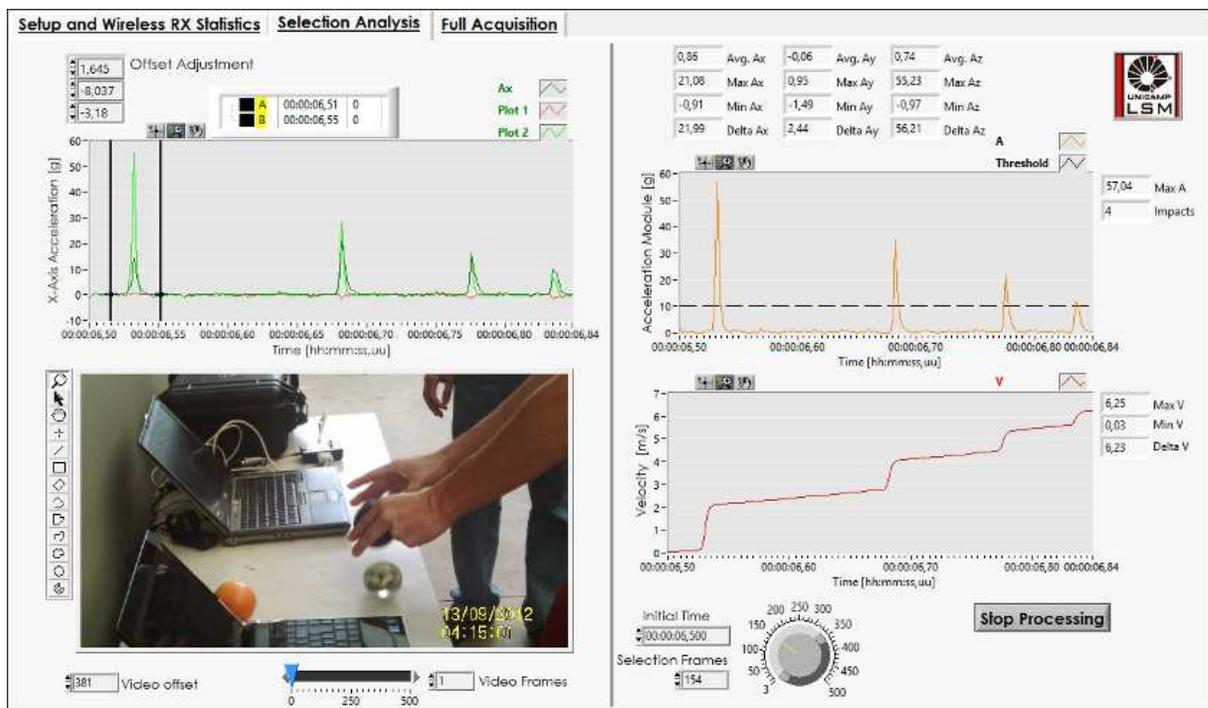


Figura 2.16: Interface gráfica do *software* PPA.

2.4 Calibração

Um simples processo de calibração foi desenvolvido para ajustar o indesejável *offset* dos acelerômetros da placa móvel. Este é um processo interativo, que aproveita o processamento

em tempo real e o encapsulamento transparente da EESF. Nesta calibração é utilizado o RTA, alinhando cada eixo da EESF (um de cada vez) com o vetor da gravidade e mantendo os outros eixos sem aceleração lateral. Para cada posição a EESF fica parada e é ajustado o *offset* até que o valor médio da aceleração de cada eixo alinhado com o vetor da gravidade atinja 1 *g*.

Depois de feita a calibração é possível verificar o correto funcionamento dos acelerômetros para uma faixa maior, habilitando o sinal de auto-teste e verificando a saída de cada acelerômetro.

Plataforma de Força

A Plataforma de Força (PF) é um instrumento dinamométrico muito utilizado para medir a Força de Reação do Solo (FRS), principalmente em avaliações biomecânicas de marcha, equilíbrio e salto, dentre outros. As PF normalmente apresentam um alto custo e uma especificidade técnica dependendo do tipo de análise ou aplicação para as quais são utilizadas, por exemplo, para alta taxa de amostragem, para equilíbrio, para esporte, portáteis, à prova d'água, dentre outras. Neste trabalho desenvolvemos a nossa própria PF uniaxial, de baixo custo e com as características desejadas para o estudo do impacto. A nossa PF foi projetada para trabalhar tanto estática quanto dinamicamente, para uma faixa de $\pm 2,2$ kN , taxa de amostragem de até 2,4 kHz , alta Relação Sinal-ruído (SNR), alto ganho e tempo de vidro com a opção de sincronismo com vídeo por sua parte de baixo.

3.1 Funcionamento

Da mesma forma que a EESF, a PF também foi projetada para operar de forma bastante simples. Basta ligar os circuitos eletrônicos na fonte de alimentação, conectar a placa de aquisição de dados (DAQ) na porta USB do computador e abrir o *software*. A PF é composta por uma estrutura mecânica com sensores de deformação (*strain gages*), um Circuito de Condicionamento de Sinal (CCS), um circuito amplificador, um circuito de alimentação, uma placa DAQ que realiza a conversão ADC e a interface com a porta USB, além de um computador para armazenamento e processamento dos dados. A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos dos principais componentes da PF.

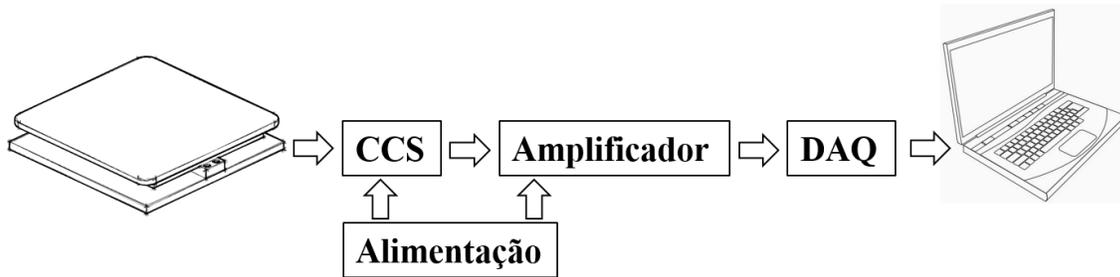


Figura 3.1: Diagrama de blocos dos componentes da PF.

3.2 Hardware

O *hardware* da PF é composto pela estrutura mecânica com sensores de deformação (*strain gages*) e pelos circuitos eletrônicos. Estes componentes são descritos a seguir separadamente, divididos em duas partes: mecânica e eletrônica.

3.2.1 Mecânica

A PF possui quatro estruturas tipo cantiléver ou viga. Para cada cantiléver é definido um ponto de aplicação de força, sendo então posicionado e colado um sensor de deformação mecânica tipo *strain gage* na região de maior estresse (Roesler, 1997). Observe na Figura 3.2 que foram utilizados dois *strain gages* para cada viga, um na parte superior e outro na parte inferior, em configuração de ponte de *wheatstone*, conforme circuito eletrônico descrito na Seção 3.2.2.

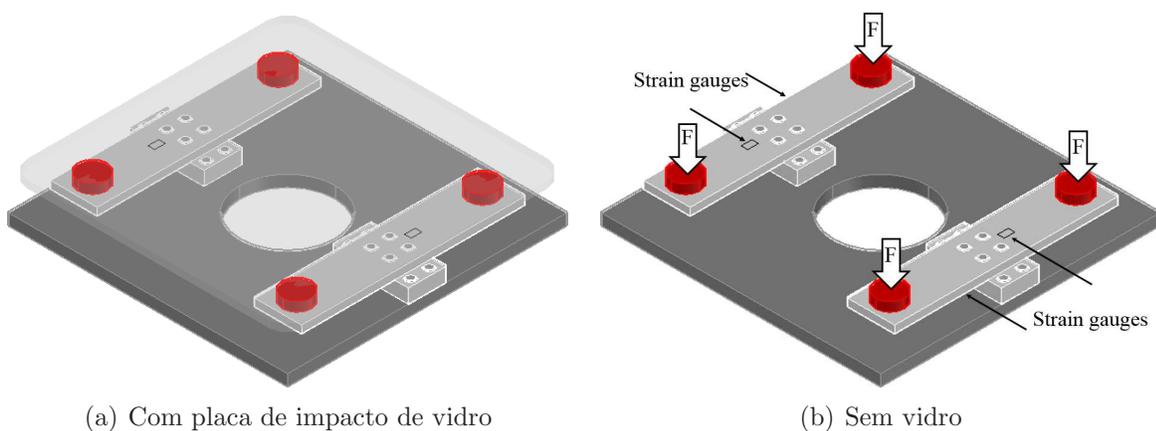


Figura 3.2: Projeto mecânico da PF.

Para cada cantiléver o estresse (*stress*) sofrido pela ação de uma força está relacionado com o torque ou momento em torno do eixo Y e pelo segundo momento de área ou momento de inércia no eixo X, como apresentado na Figura 3.3. Observe que quando uma força é

3.2. Hardware

aplicada na viga, ela flexiona em torno do ponto neutro do eixo Y dependendo do valor da força e da distância entre o engaste da viga e o ponto de aplicação da força. O segundo momento de área está relacionado com a distribuição da área em torno do ponto neutro no eixo X sendo uma medida da eficiência desta distribuição ao efeito de dobra.

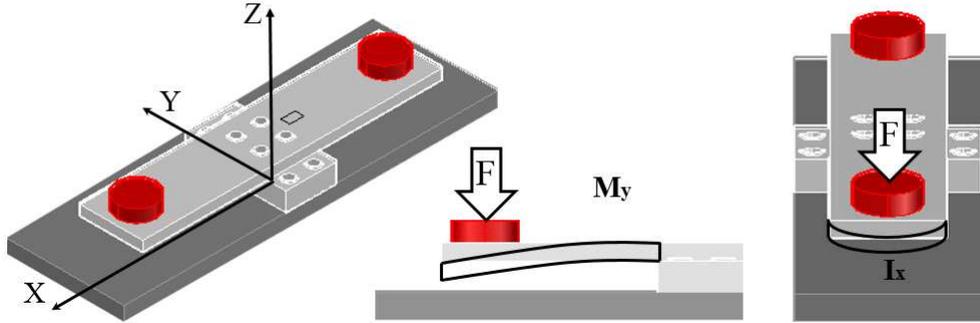


Figura 3.3: Efeito do momento em torno do eixo Y e do segundo momento de área no eixo X do cantiléver.

Matematicamente o estresse (σ) na viga é modelado pela Equação 3.1, sendo M_y o momento em torno do eixo Y, I_x o segundo momento de área no eixo X e $\frac{h}{2}$ o ponto neutro do eixo Y. Na Figura 3.4 são apresentadas as dimensões dos cantilévres utilizados na PF, sendo: $x = 80$ mm, $b = 50$ mm e $h = 8$ mm.

$$\sigma = \frac{M_y(\frac{h}{2})}{I_x} \quad (3.1)$$

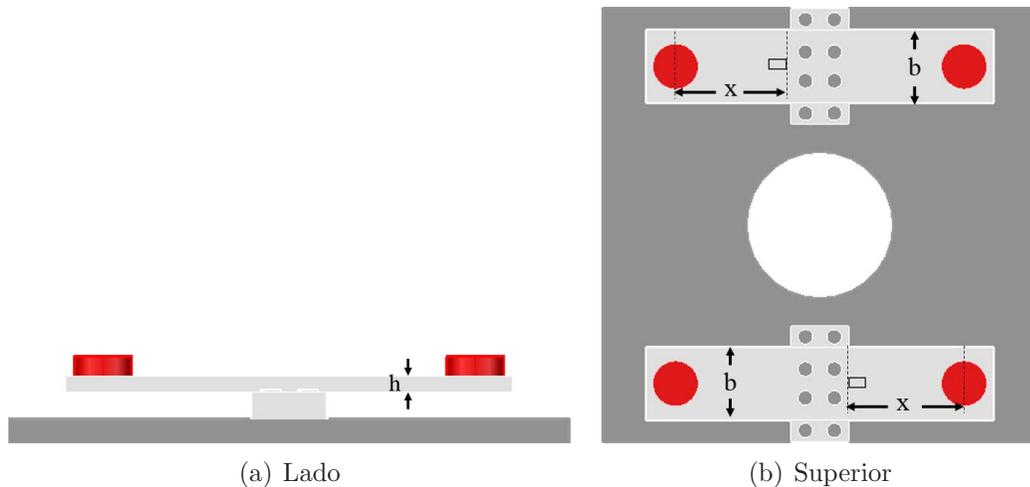


Figura 3.4: Dimensões dos cantilévres utilizados na PF, sendo: $x = 80$ mm, $b = 50$ mm e $h = 8$ mm.

Por sua vez as Equações 3.2 e 3.3 definem o momento em torno do eixo Y e o segundo momento de área no eixo X respectivamente.

$$M_y = Fx \quad (3.2)$$

$$I_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} h^2 b dh \quad (3.3)$$

Substituindo na Equação 3.1, tem-se:

$$\sigma = \frac{M_y(\frac{h}{2})}{I_x} = \frac{FX(\frac{h}{2})}{\frac{bh^3}{12}} = \frac{6FX}{bh^2} \quad (3.4)$$

O sensor utilizado mede a deformação mecânica do material ou *strain* (ϵ), desta forma utilizamos o módulo de elasticidade ou módulo de Young (E) para relacionar o estresse com a deformação, como apresentado na Equação 3.5.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.5)$$

Assim, a Equação 3.4 pode ser reescrita como:

$$\epsilon = \frac{6Fx}{Ebh^2} \quad (3.6)$$

Ou ainda reorganizando a Equação 3.6 fica claro como a força aplicada em cada cantiléver pode ser obtida através da medida da deformação mecânica conhecendo o módulo de Young do material utilizado e as dimensões da estrutura como apresentado na Equação 3.7. Para nosso caso utilizamos alumínio que possui um módulo de Young igual a 70 GPa.

$$F = \frac{\epsilon Ebh^2}{6x} \quad (3.7)$$

A força máxima ou fundo de escala que pode ser medido em cada viga foi calculado utilizando o valor máximo de deformação dos *strain gages*; geralmente este valor é de aproximadamente $2000 \mu\epsilon$. Contudo, testes preliminares utilizando *strain gages* do tipo *welded* que já vem colados numa pequena estrutura mecânica e com um fundo de escala fornecido pelo fabricante, nos permitiram, a partir das dimensões da estrutura e da força máxima, determinar experimentalmente o valor máximo de deformação (ϵ_{max}) que foi de aproximadamente $1500 \mu\epsilon$. Desta forma, a força máxima medida por cada viga pode ser determinada pela Equação 3.8 e conseqüentemente a força máxima da PF, depois de fixar o tampo de vidro, é de aproximadamente quatro vezes a F_{max} em cada cantiléver.

$$F_{max} = \frac{\epsilon_{max} Ebh^2}{6x} \quad (3.8)$$

3.2. Hardware

O engaste mecânico entre os braços dos cantilévers com a placa de impacto de vidro temperado é um ponto crítico durante a montagem da estrutura mecânica. A Figura 3.5 mostra duas vistas da PF destacando os pontos de engaste entre as vigas e a placa de vidro. Este engaste desempenha o papel de interface mecânica entre os braços dos cantilévers e a placa de vidro que recebe diretamente o impacto do objeto em estudo. Durante o desenvolvimento desta interface foram realizados vários testes envolvendo diferentes tipos de materiais e colas, observando aspectos relacionados a resistência mecânica, *offset* e histerese.

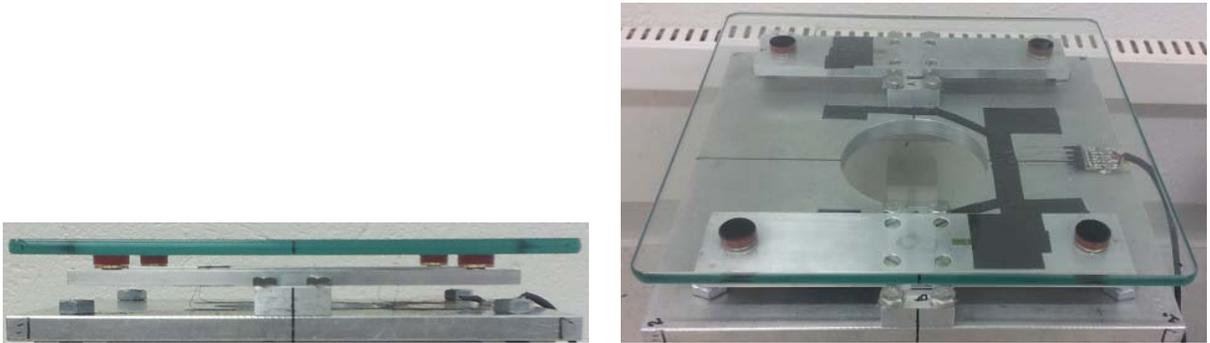


Figura 3.5: Detalhe da interface do vidro temperado com os cantilévers da PF.

O primeiro passo foi escolher o material para realizar a interface entre o vidro temperado e a estrutura de alumínio de forma que o vidro não quebrasse durante o impacto devido a dureza dos materiais. Para isto utilizamos um espaçador de PU. Contudo, o maior problema surgiu quando tentamos colar os materiais, pois, independentemente do produto utilizado, cria-se um estresse nas vigas. Este estresse não permanece constante, variando o *offset* e ainda introduzindo um tempo de espera relativamente grande para estabilizar a estrutura antes de poder ser utilizada.

A solução implementada para minimizar esse efeito foi usinar duas peças. Uma peça de latão para ser rosqueada no ponto de aplicação da força da viga e outra de PU, colada no vidro e encaixada na peça de latão como apresentado na Figura 3.6.



Figura 3.6: Detalhe da peça de interface entre o vidro temperado e as vigas da PF.

3.2.2 Eletrônica

A parte eletrônica da PF é composta pelos sensores de deformação, um CCS, um circuito amplificador, um circuito de alimentação e uma placa DAQ para realizar a conversão ADC e a interface com a porta USB.

O CCS utiliza uma configuração de ponte de *wheatstone* completa. A saída desta ponte depende diretamente do *Gage Factor* (G_F) dos *strain gages*, da tensão de alimentação da ponte (V_{in}) e do sinal de deformação medido (ϵ) como apresentado na Equação 3.9:

$$V_{out} = V_{in} \frac{\Delta R}{R} = V_{in} G_F \epsilon \quad (3.9)$$

Para maximizar a sensibilidade da ponte sem incrementar o custo da plataforma, utilizamos *strain gages* de filme metálico, uniaxiais, com 5 mm de comprimento que são mais baratos, mas possuem G_F baixos ($G_F=2,1 \pm 1,0\%$). Contudo, escolhemos um sensor com um valor maior de resistência ($R=1000 \pm 6,8 \Omega$) (Kyowa, 2012) o qual permitiu utilizar uma alimentação estabilizada de 10 V sem ultrapassar a corrente máxima permitida no sensor. Desta forma foi possível maximizar o efeito da ponte sem a necessidade de utilizar sensores de filme semicondutor mais caros. Além disso, a estrutura mecânica foi projetada de forma que a força máxima medida em cada viga estivesse dentro da faixa de máxima de deformação de cada *strain gage*.

Na sequência, o sinal é amplificado com um ganho de tensão de 371, com ajuste de *offset* devido ao desbalanceamento inicial da ponte e por último se aplica um filtro passa-baixas de primeira ordem para eliminar ruído de alta frequência à entrada da placa DAQ. Na Figura 3.7 é apresentado o diagrama esquemático completo e a foto da placa de circuito eletrônico da PF.

Cabe mencionar que foram tomados todos os cuidados na fixação dos *strain gages*, na escolha dos componentes eletrônicos e no tratamento dos sinais de forma que a PF apresenta uma alta sensibilidade para medir forças a partir de $\pm 3,5$ N até ± 2200 N com uma alta SNR.

3.3 Software

A GUI da PF também foi programada utilizando LabVIEW[®] e o padrão de máquina de estados. Este programa é menos complexo que os implementados anteriormente na EESF. Na Figura 3.8 é apresentado o diagrama de transição de estados, sendo: (1) inicialização, (2) configuração dos canais da DAQ e da taxa de amostragem, (3) estado de eventos, neste estado o programa fica esperando que o usuário aperte o botão do início da aquisição, ou o botão para parar o programa, (4) leitura dos dados brutos em tensão, (5) calibração, (6)

3.3. Software

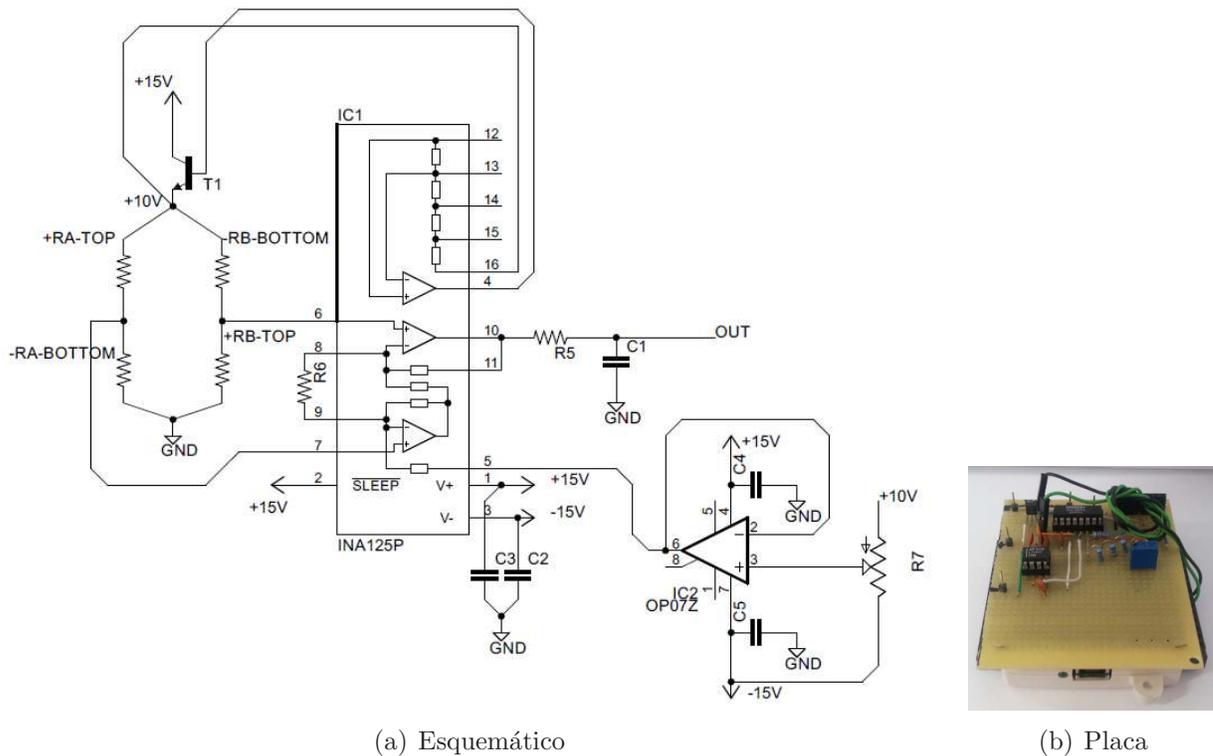


Figura 3.7: Diagrama esquemático e foto do circuito eletrônico da PF.

processamento e visualização dos dados brutos, da massa e da força, (7) salva os dados no disco e (8) parada.

Descrição dos estados:

1. Inicialização
2. Configuração DAQ
3. Eventos
4. Leitura
5. Calibração
6. Processamento
7. Salvar
8. Parada

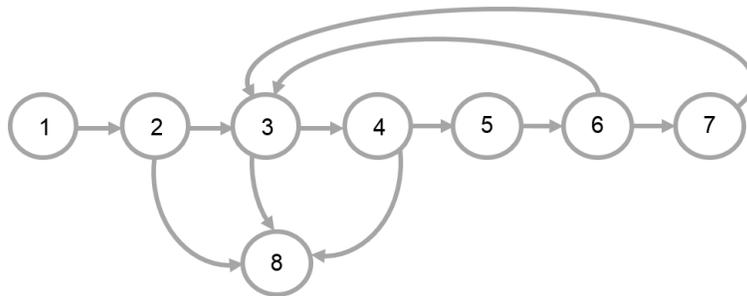


Figura 3.8: Diagrama de transição de estados do *software* da PF.

A interface gráfica do programa da PF mostrada na Figura 3.9 apresenta os gráficos dos dados brutos em tensão, da massa (kg) e da força (N) em janelas fixas de tempo. Para cada janela de dados é calculado o valor médio, máximo, mínimo e delta. O programa ainda permite salvar os dados no disco, realizar tara, ajustar a taxa de amostragem e a sensibilidade para o processo de calibração.



Figura 3.9: Interface gráfica da PF.

3.4 Calibração

A calibração estática da plataforma está dividida em duas partes. Inicialmente é realizado um ajuste de *offset* no *hardware* da PF, garantindo que a tensão média de saída sem nenhuma massa sobre a PF seja zero. Na sequência, utilizando uma massa de referência de 50 kg sobre a PF é ajustada a sensibilidade no *software* da mesma. Dado que os *strain gages* apresentam uma resposta linear, tentamos calibrar o ponto mais próximo da nossa região de interesse com os pesos que tínhamos a nosso dispor.

Nos testes de impacto foi verificado que a interface de PU utilizada entre as vigas e o vidro temperado, aumentava a sensibilidade da PF durante os impactos. Consequentemente, foi necessário um pequeno ajuste da sensibilidade estática para a condição dinâmica. Este ajuste foi realizado experimentalmente comparando os dados da velocidade de saída da bola de futebol medidos com a PF e com a cinemetria.

A sensibilidade da PF foi ajustada até igualar a velocidade de saída medida com os dois sistemas. Este procedimento foi repetido 3 vezes, obtendo o mesmo fator de atenuação igual a 1,245 em todos os testes. Concluindo, a interface de PU utilizada aumentou a sensibilidade da PF em 1,245 vezes durante os impactos, sendo este valor compensado durante a calibração.

3.5 Estrutura de queda livre

Na sequência, construímos uma estrutura para realizar os testes de queda livre. Esta estrutura conta com um atuador pneumático para liberar o objeto em teste e possibilita realizar o ajuste da altura da queda e centralizar o objeto sobre a PF. A altura da estrutura pode ajustada desde alguns centímetros até 2,4 m. A Figura 3.10(a) mostra a estrutura ajustada para uma altura de 35 cm antes da queda da EESF e a Figura 3.10(b) mostra a mesma estrutura ajustada para uma altura de 2 m antes da queda livre da bola de futebol.

O posicionamento desta estrutura dentro do laboratório (LSM) levou em consideração o enquadramento necessário para a utilização das câmeras no método da cinemetria, que será discutido em detalhes no Capítulo 4. No Apêndice C são apresentadas algumas fotos da estrutura e do enquadramento das câmeras no LSM.



Figura 3.10: Estrutura de queda livre.

Cinemetria

A cinemetria é um método biomecânico que se destina ao estudo das variáveis cinemáticas para a descrição de posições ou movimentos no espaço. Por sua vez, trata da “geometria” do movimento, relacionando posição, velocidade, aceleração e tempo, sem referência às causas do movimento (Barros, 2009). Os procedimentos utilizados na cinemetria são fundamentalmente ópticos, relativos à aquisição de imagens, tendo marcadores como referências para posterior identificação e obtenção das coordenadas bidimensionais ou tridimensionais dos pontos de interesse.

4.1 Metodologia

De maneira geral uma coleta de dados com o método da cinemetria funciona da seguinte forma: inicialmente é definido o *layout* das câmeras, que inclui o posicionamento, enquadramento, ajuste dos parâmetros das câmeras, iluminação dentre outros. Na sequência é realizada a filmagem de um objeto de calibração e outra do movimento em estudo por todas as câmeras de forma sincronizada. A primeira filmagem é utilizada para a calibração das câmeras e para a obtenção dos parâmetros necessários para a conversão das imagens em 2D, com informação em pixels, em um arquivo com informação 3D da posição. A segunda filmagem é a do movimento em estudo; neste registro é realizado o rastreamento do marcador de interesse e a reconstrução 3D utilizando os parâmetros de calibração previamente determinados na filmagem do objeto de calibração.

4.2 Layout da aquisição

Utilizamos duas câmeras digitais Casio EX-F1 de alta velocidade, com sensor CMOS, resolução de 512×384 pixels, taxa de amostragem de 300 FPS, velocidade do obturador (*Shutter* 1/640), foco (AF 3,8), *zoom* (41 mm) que foram montadas sobre tripés, nos testes de repique com bola de futebol. Além destas duas câmeras, também utilizamos uma outra câmera Casio EX-F1 de alta velocidade, com resolução de 432×192 pixels, taxa de amostragem de 600 FPS, *Shutter* (1/650), foco (AF 3,3), *zoom* (41 mm), posicionada embaixo da PF para a estimativa da área de contato. As câmeras utilizadas e o *layout* da aquisição são mostrados na Figura 4.1.

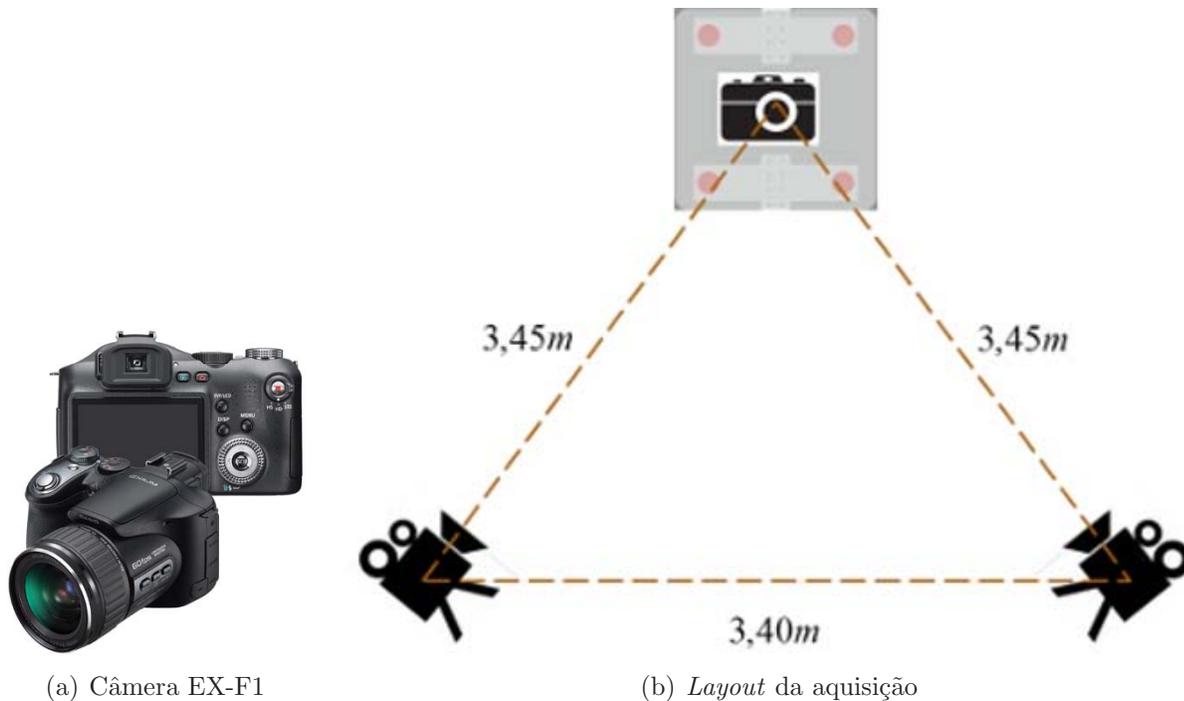


Figura 4.1: Câmera digital Casio EX-F1 e *layout* utilizado com a cinematria.

Os registros destas câmeras são armazenados em um cartão de memória no formato MOV e posteriormente são transferidos ao computador para serem processados. Inicialmente é necessário realizar uma conversão de formatos de vídeo, do MOV para o AVI com codec MPEG-4, para a qual utilizamos o programa X-Video converter. A calibração das câmeras, medição dos dados e reconstrução tridimensional é realizada utilizando o *software* para análise cinemática tridimensional de movimentos (Dvideow) desenvolvido por Figueroa et al. (2003) no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB) da Faculdade de Educação Física (FEF) da UNICAMP. As rotinas para processar os dados de calibração e definir o sistema de coordenadas foram implementadas no programa Matlab. Neste processamento não foi

4.3. Calibração

utilizado nenhum tipo de filtragem. A Figura 4.2 mostra a janela principal do programa Dvideow com um quadro de cada câmera utilizada.

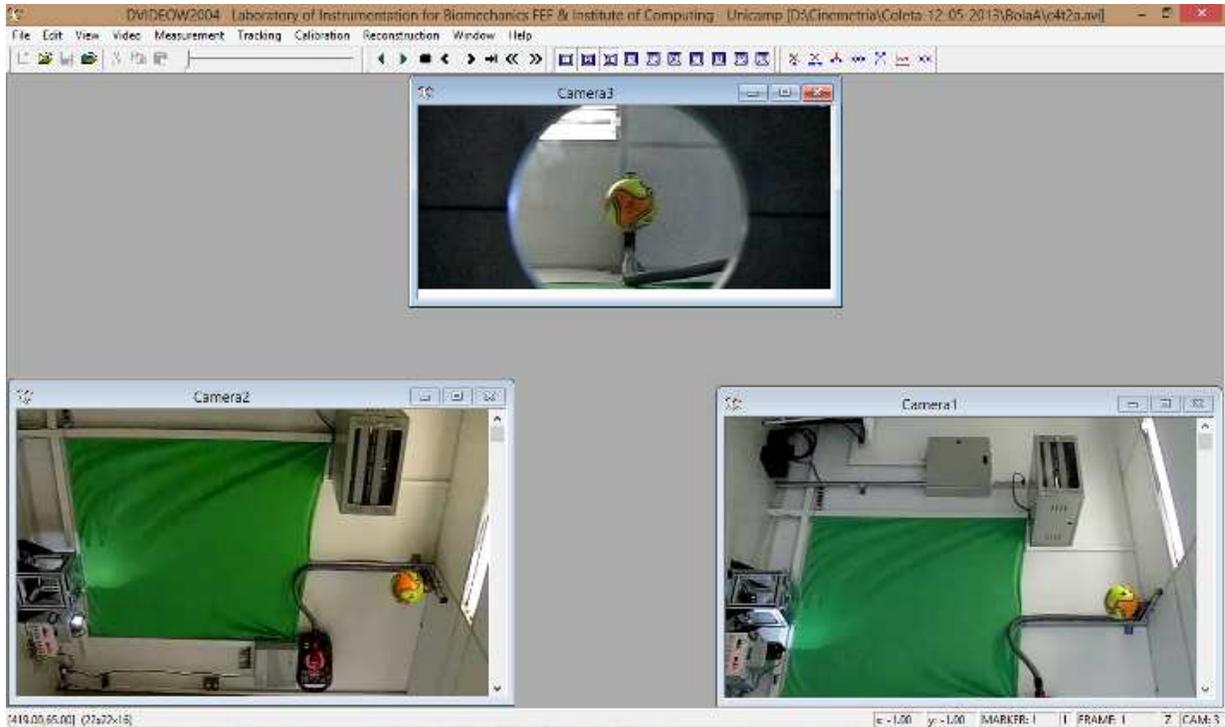


Figura 4.2: Programa Dvideow mostrando um quadro de cada câmera utilizada.

4.3 Calibração

A calibração das câmeras é um processo realizado para determinar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos envolvidos. Parâmetros intrínsecos estão associados às características físicas internas de uma câmera, como a geometria de montagem, a característica e configuração das lentes, a característica do elemento sensor, a distância focal, as coordenadas do centro da imagem, o tamanho do pixel da imagem e os parâmetros de distorção da imagem. Parâmetros extrínsecos são definidos pela posição tridimensional e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas. O procedimento de calibração precisa ser realizado para encontrar os parâmetros e permitir uma relação matemática entre as coordenadas 3D de um ponto no espaço e as coordenadas 2D de suas projeções nas imagens gravadas pela câmera (Silvatti, 2013).

A calibração utilizada neste trabalho foi baseada nas equações básicas do método de reconstrução tridimensional de coordenadas DLT (*Direct Linear Transformation*) proposto, inicialmente por Abdel-Aziz and Karara (1971). Para obter as coordenadas 3D (X,Y,Z) do

deslocamento a partir das coordenadas de tela (x, y) de cada câmera é preciso encontrar os parâmetros de transformação da DLT apresentados nas Equações 4.1 e 4.2.

$$(n_1^k - n_3^k x_i^k)X_i + (n_4^k - n_6^k x_i^k)Y_i + (n_7^k - n_9^k x_i^k)Z_i + n_{10}^k - x_i^k = 0 \quad (4.1)$$

$$(n_2^k - n_3^k y_i^k)X_i + (n_5^k - n_6^k y_i^k)Y_i + (n_8^k - n_9^k y_i^k)Z_i + n_{11}^k - y_i^k = 0 \quad (4.2)$$

sendo, x_i^k e y_i^k são as coordenadas de tela do i -ésimo ponto do sistema de referências, para cada câmera k ; X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais do i -ésimo ponto de referência e n_h^k ($h=1, \dots, 11$) são os 11 parâmetros da transformação para a k -ésima câmera, a serem determinados.

Neste método não há uma separação entre parâmetros intrínsecos e extrínsecos; os 11 parâmetros encontrados precisam ser reescritos para encontrar sua relação física. Assim, são necessários onze parâmetros para a calibração de cada câmera.

Uma explicação detalhada deste procedimento de calibração é descrita por Barros (1997). O cálculo da DLT está incorporada no *software* Dvideow.

4.3.1 Objetos para calibração

Para a delimitação do volume calibrado no método da DLT, tradicionalmente são utilizados objetos rígidos ou ainda fios de prumos com diferentes quantidades e distribuição de pontos de controle. Nesta calibração foram definidos 7 pontos sobre a PF nos quais foi posicionado um bastão com 15 marcadores pretos. Os marcadores foram feitos com duas faixas de fita isolante preta, deixando um fino espaçamento entre elas para facilitar a marcação na imagem.

A posição dos pontos no plano da PF e a vertical obtida com o bastão formam o nosso volume de calibração com 105 posições de referência (X,Y,Z) conhecidas. Esta abordagem é normalmente utilizada para a criação de volumes customizados ou ainda para a realização de coletas em campo. A verificação do volume calibrado é realizada com uma reconstrução do mesmo a partir dos dados das câmeras utilizando o programa Matlab. A Figura 4.3 mostra a marcação de todos os pontos do volume e do bastão posicionado no ponto 1 que são filmados pelas duas câmeras.

4.3. Calibração

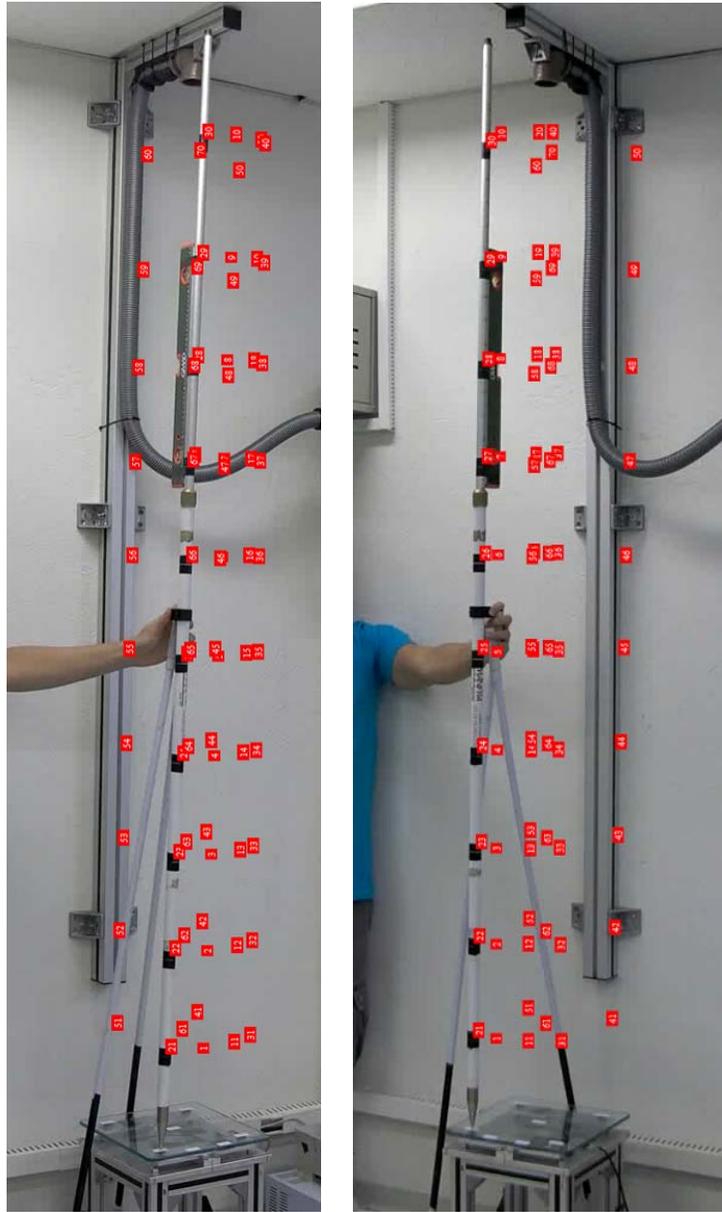


Figura 4.3: Marcação de todos os pontos do volume e do bastão posicionado no ponto 1 que são filmados pelas duas câmeras.

4.3.2 Sistema local de coordenadas

Foi definido um sistema de coordenadas com três eixos ortogonais entre si e centralizado sobre a PF. A vertical foi definida como o eixo Z e os planos horizontais definidos pelos eixos X e Y. A Figura 4.4 mostra os eixos do sistema de coordenadas e a Figura 4.5 mostra a posição real (X,Y) dos 7 marcadores sobre a superfície da PF e a reconstrução feita no Matlab.

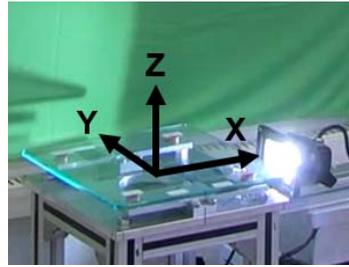


Figura 4.4: Sistema local de coordenadas da cinematria.

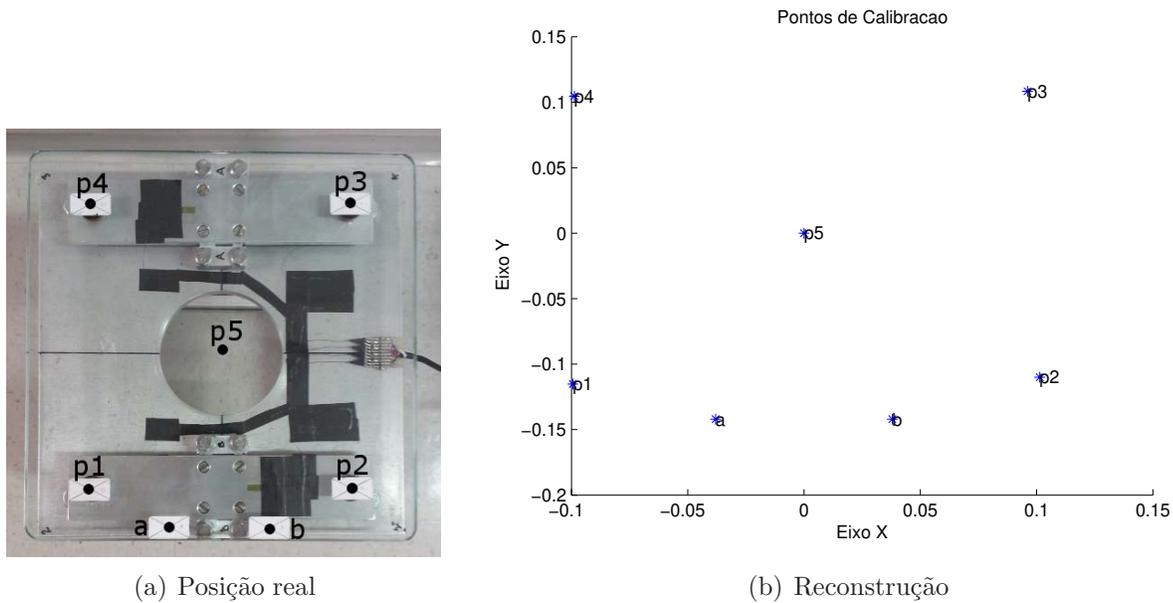


Figura 4.5: Posição dos marcadores sobre a PF.

4.4 Acurácia

A acurácia dos dados dentro do volume calibrado a , foi calculada utilizando a Equação 4.3, sendo b a diferença entre o valor médio da distância (observado) e o valor esperado (*bias*) e p a precisão, dada pelo desvio padrão das medidas. Para este cálculo foi feita uma coleta dentro do volume calibrado rastreando dois dos marcadores do mesmo bastão utilizado na calibração. Para o volume utilizado nos testes de repique da bola de futebol a precisão dos dados foi de 2,41 mm e o *bias* de 2,66 mm, que corresponde a uma acurácia de 3,6 mm.

$$a^2 = b^2 + c^2 \quad (4.3)$$

A variação da distância obtida pelo sistema Dvideo entre os dois marcadores do bastão (m e n) em função do tempo, é calculada utilizando a Equação 4.4, sendo que t_i é o i -ésimo

4.5. Rastreamento dos marcadores

instante em que foi feita a medição.

$$d_{n,m}(t_i) = \left| \vec{P}_m(t_i) - \vec{P}_n(t_i) \right| \quad (4.4)$$

Para analisar os erros associados às distâncias do corpo rígido é comparado o valor medido pelo sistema Dvideo menos o valor esperado (medição direta realizada com paquímetro).

4.5 Rastreamento dos marcadores

A medição dos dados, ou rastreamento dos marcadores, foi realizada no *software* Dvideo. Utilizamos um marcador preto colado no centro da bola de futebol e ajustamos os parâmetros morfológicos de pré-processamento de imagem com os algoritmos de erosão e *get markers* disponíveis no mesmo programa. A erosão da imagem visa melhorar o contraste do marcador enquanto o algoritmo *get markers* é responsável por calcular o contorno do marcador na imagem pré-processada (Barros, 1997). Contudo, devido a qualidade das imagens e ao tipo de marcador utilizado, o rastreamento não foi 100% automático e foi necessário realizar marcações manualmente. A Figura 4.6 mostra o rastreamento do marcador da bola de futebol durante os testes de repique.

4.6 Reconstrução Tridimensional

O procedimento de reconstrução tridimensional dos marcadores acontece através das mesmas equações básicas do método DLT e, portanto, estas equações são aplicadas duas vezes: a primeira para quantificar os parâmetros da transformação (calibração) e a segunda para efetuar a reconstrução propriamente dita.

Já para a reconstrução tridimensional, x_i^k e y_i^k são as coordenadas de tela do ponto de interesse na i -ésima imagem, da k -ésima câmera; n_h^k ($h=1,\dots,11$) são os 11 parâmetros de calibração para a k -ésima câmera e X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais do ponto de interesse na i -ésima imagem, a serem determinadas. Para que seja possível obter a reconstrução tridimensional é necessário que pelo menos duas câmeras filmem o mesmo ponto, e que pelo menos seis pontos do sistema de calibração sejam marcados durante o processo de calibração. O resultado da reconstrução 3D é um arquivo com a posição (X,Y,Z) do marcador para cada quadro da imagem.

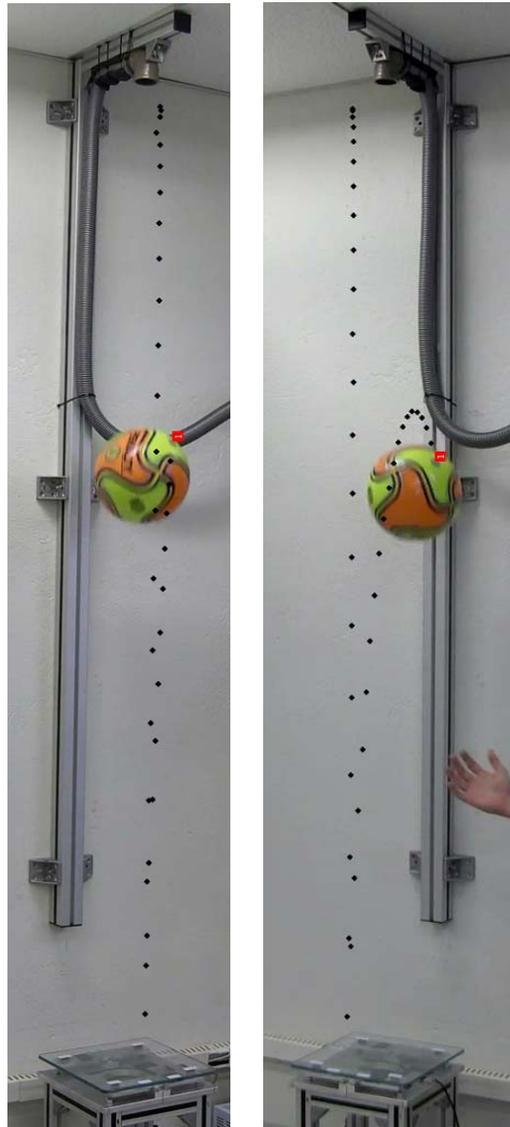


Figura 4.6: Rastreamento do marcador da bola de futebol nos testes de repique.

Resultados experimentais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a Esfera Eletrônica Sem Fio (EESF), a Plataforma de Força (PF), a cinemetria e as diferentes interações entre os mesmos.

Com a EESF foram realizados testes de queda livre em laboratório, sincronizados com a PF, para comparar os valores dos impactos obtidos pelos dois instrumentos, e testes em unidades de beneficiamento (*packing houses*) de maçã e laranja para medir os impactos sofridos pelas frutas no processo de pós-colheita. No Apêndice D são mostradas algumas fotos das diferentes unidades de beneficiamento.

A PF também foi utilizada durante os testes de repique com diferentes bolas de futebol, em sincronismo com a cinemetria, comparando os resultados obtidos com os dois sistemas e ainda caracterizando cada bola através das variáveis cinemáticas e dinâmicas.

Posteriormente, avaliamos o efeito da variação da pressão de uma única bola de futebol na altura do repique, utilizando a cinemetria, e por último foi estimada a área de contato da bola com a PF durante os testes de repique. Este último teste foi possível devido a um diferencial da nossa PF, que permite utilizar uma câmera por baixo, junto com a medição sincronizada da força, podendo com isto, calcular a variação da pressão sofrida pela PF durante o impacto da bola de futebol.

5.1 Testes de queda livre

Os testes de queda livre foram realizados em ambiente controlado dentro do Laboratório de Sensores Microeletrônicos (LSM), utilizando a estrutura de queda livre com atuador pneumático descrita na Seção 3.5, a EESF e a PF de forma sincronizada.

Para este teste, a altura entre a parte inferior da EESF e a superfície de contato com a PF

foi ajustada inicialmente para 2,5 cm. Na sequência, a altura foi incrementada em passos de 2,5 cm até o valor máximo de 40 cm. Para cada altura foram realizadas 18 quedas, sendo seis para cada eixo da EESF alinhado com o eixo da gravidade. Este alinhamento foi realizado para verificar a atenuação do módulo da aceleração e a possível variação da sensibilidade em cada um dos eixos causado principalmente pelo encapsulamento da EESF.

A PF foi calibrada, antes de qualquer medida, de acordo com o procedimento descrito na Seção 3.4. Na Figura 5.1 é apresentado o valor de pico e o desvio padrão da força sofrida pela PF nos 18 impactos da EESF para cada altura. A aceleração foi calculada dividindo o valor da força pela massa da EESF que é de 0,1684 kg como apresentado na Equação 5.1.

$$\vec{A}_Z = \frac{\vec{F}_Z}{m} \quad (5.1)$$

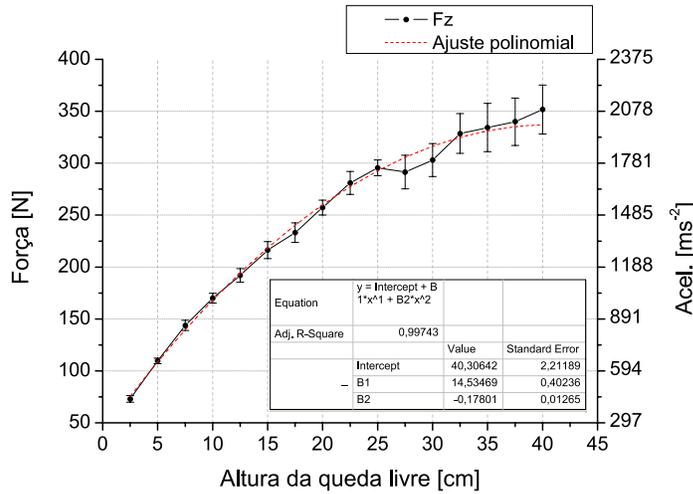


Figura 5.1: Variação da força em função da altura da queda livre da EESF medida com a PF.

Os dados experimentais da Figura 5.1 mostram um comportamento não linear, principalmente para quedas acima dos 22,5 cm. O ajuste com o polinômio de segunda ordem mostrado na Equação 5.2, na qual h é a altura da queda em centímetros [cm] e F_Z é a força sofrida pela PF em newton [N], foi a melhor aproximação matemática dos dados, com coeficiente de determinação R^2 igual a 0,997.

$$F_Z = 40,306 + 14,534h - 0,178h^2 \quad (5.2)$$

O resultado esperado para uma esfera relativamente rígida e fechada seria uma variação linear da força sofrida pela PF em função da variação de altura. Contudo, nossa EESF é composta por um circuito eletrônico no centro de um revestimento de Poliuretano (PU)

5.1. Testes de queda livre

com dureza de A60 *shore* (COIM, 2010) e com um orifício radial para carregar a bateria. Acreditamos que o comportamento não linear, mostra uma tendência de saturação no valor da força máxima com o aumento da altura, isto pode estar relacionado com a abertura em um dos extremos da EESF, pois parte da energia durante o impacto pode não ser transferida para a PF e sim ser dissipada pela deformação do material da EESF e também pelo orifício.

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores de força (\bar{F}) e aceleração média (\bar{A}) além do seu respectivo valor do Desvio padrão (Dp), mostrados na forma de gráfico na Figura 5.1. O número de amostras utilizado para o tratamento estatístico dos dados foi de $n = 18$.

Tabela 5.1: Variação da força em função da altura da queda livre da EESF medida com a PF.

Altura [cm]	Força [N] ($\bar{F} \pm \text{Dp}$)	Aceleração [ms^{-2}] ($\bar{A} \pm \text{Dp}$)
2,5	73,01 ± 3,10	433,56 ± 18,41
5,0	109,64 ± 2,65	651,10 ± 15,78
7,5	143,85 ± 4,91	854,24 ± 29,19
10,0	170,03 ± 4,77	1009,69 ± 28,37
12,5	191,91 ± 6,48	1139,66 ± 38,49
15,0	216,33 ± 8,16	1284,66 ± 48,45
17,5	233,02 ± 9,44	1383,77 ± 56,09
20,0	257,32 ± 7,14	1528,05 ± 42,40
22,5	280,92 ± 11,05	1668,19 ± 65,63
25,0	295,50 ± 7,60	1754,76 ± 45,16
27,5	291,46 ± 16,09	1730,81 ± 95,58
30,0	303,01 ± 15,89	1799,35 ± 94,39
32,5	328,61 ± 19,11	1951,36 ± 113,51
35,0	334,34 ± 23,24	1985,42 ± 138,03
37,5	339,92 ± 22,81	2018,57 ± 135,50
40,0	351,70 ± 23,59	2088,49 ± 140,08

Utilizando a EESF, foram medidas as acelerações sofridas internamente pela mesma durante todos os impactos. Dado que a EESF mede as acelerações nos três eixos do seu próprio sistema de coordenadas como descrito na Seção 2.2.4 e para facilitar a comparação com os dados da PF, foi calculado o módulo da aceleração, ou aceleração resultante utilizando a Equação 5.3.

$$|A| = \sqrt{A_X^2 + A_Y^2 + A_Z^2} \quad (5.3)$$

Como já foi mencionado, cada eixo da EESF foi alinhado com o eixo da gravidade, sendo realizadas seis quedas para cada alinhamento. Na Figura 5.2 são apresentados os valores dos módulos das acelerações para cada orientação da EESF. No gráfico fica claro que quando a EESF foi orientada com os eixos X ou Y alinhados com a gravidade, o impacto medido foi similar, para todas as alturas avaliadas, mas quando a EESF foi alinhada no eixo Z as

acelerações medidas foram maiores em todas as alturas.

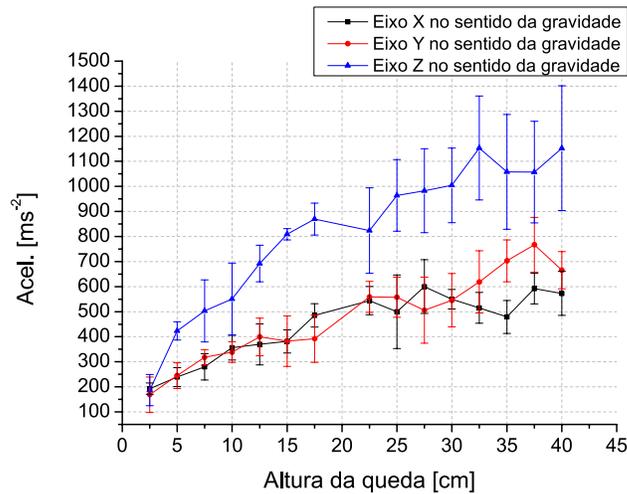


Figura 5.2: Valor de pico do módulo da aceleração interna da EESF em função da altura da queda livre.

Esta diferença na sensibilidade entre os eixos X,Y e o eixo Z está relacionada com a variação da espessura do material do encapsulamento. Sendo que no plano formado pelos eixos X e Y, a camada de material entre a PCB (*Printed Circuit Board*) e a borda da EESF foi de aproximadamente 10 mm de espessura. Já a camada entre o topo dos componentes da PCB e a parte superior da EESF no eixo Z foi de aproximadamente 20 mm. Observe que o PU *shore* A60 utilizado no encapsulamento possui uma textura similar ao de uma rodinha de patins. Sendo assim, podemos explicar o efeito ao comparar a rigidez que teria uma rodinha de patins de PU *shore* A60 com 10 mm ou 20 mm de diâmetro. A rodinha de 10 mm seria evidentemente menos rígida que a rodinha de 20 mm. Consequentemente, na EESF o eixo Z que possui a camada mais grossa é comparativamente mais rígida que a camada de 10 mm dos eixos X,Y. Sabemos ainda que a aceleração sofrida nos impactos com materiais mais rígidos é maior que nos materiais mais moles, pois estes se deformam perdendo energia durante o impacto. A validação experimental desta hipótese foi feita abrindo o encapsulamento de uma EESF como apresentado na Figura 5.3, no qual fica evidente a diferença na rigidez do material.

Comparando as acelerações medidas com a EESF e os dados obtidos com a PF, podemos observar que todas as acelerações medidas internamente na EESF foram atenuadas pelo encapsulamento de PU, que era uma característica desejada já que além do monitoramento dos impactos, o sistema pode ser utilizado para avaliar o efeito do amortecimento do material utilizado no encapsulamento. Eis a importância de trabalharmos com pelo menos dois instrumentos de forma sincronizada, neste caso a PF fornece as acelerações externas sofridas

5.1. Testes de queda livre

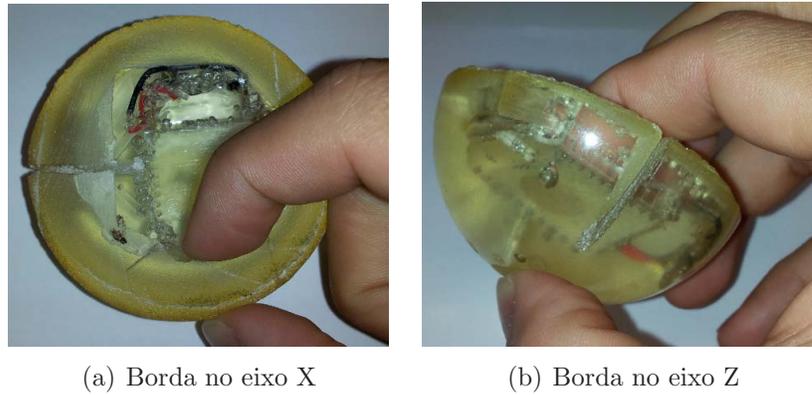


Figura 5.3: Foto do encapsulamento cortado no meio.

durante o impacto e a EESF as acelerações internas. Desta forma podemos calcular o fator de atenuação do encapsulamento. Na Figura 5.4 são apresentados as acelerações medidas pela EESF e a PF.

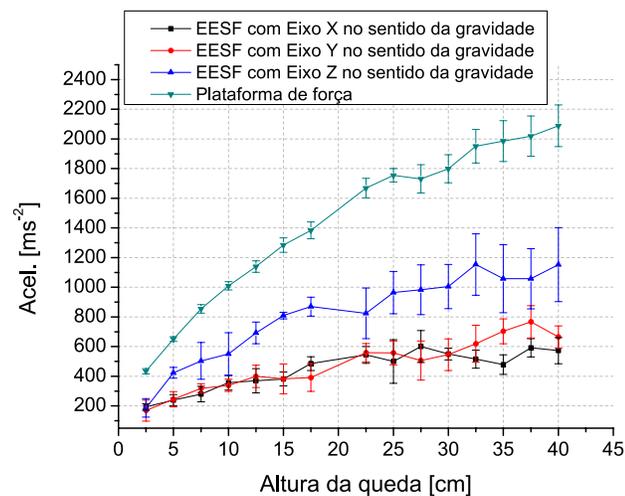


Figura 5.4: Acelerações da EESF e da PF em função da altura da queda livre.

A utilização dos testes de queda livre para avaliar a magnitude dos impactos já foi citada na literatura na avaliação de outras esferas como a IRD (Zapp et al., 1990), a PMS60 (Herold et al., 1996) e a BIRD (Yu et al., 2011a). Contudo, os resultados obtidos por cada um destes autores diferem na magnitude da aceleração dos impactos, que dependem das características de cada esfera, principalmente em relação ao encapsulamento. A abordagem utilizada neste trabalho permite calcular o fator de atenuação do encapsulamento, permitindo que seja feita uma correção caso se deseje conhecer a aceleração real sofrida, independentemente do tipo de encapsulamento utilizado.

5.2 Testes em unidades de beneficiamento

A EESF foi utilizada para medir os impactos em três unidades de beneficiamento de maçã e uma de laranja nos estados brasileiros do Rio Grande do Sul e de São Paulo. A unidade de beneficiamento (*packing house*) é um termo técnico adotado para uma unidade ou estabelecimento onde a fruta é recebida, processada e embalada antes da distribuição para o mercado.

Nestes ensaios colocamos a EESF na linha de processamento junto com as outras frutas e monitoramos todos os estágios da linha. Para cada linha de processo fizemos três repetições em cada unidade de beneficiamento de maçã e cinco repetições na unidade de beneficiamento de laranja.

Utilizando o *Software* de Análise em Tempo Real (RTA) foi possível acompanhar nos gráficos os impactos que a EESF foi sofrendo ao longo da linha enquanto era feita a aquisição, verificando a integridade dos dados e realizando uma análise preliminar.

Para o processamento final dos dados utilizamos o *software* de análise e pós-processamento (PPA) ajustando limiares de aceleração baixos ($|A| > 10 g$), médios ($|A| > 20 g$) e altos ($|A| > 30 g$) afim de contabilizar o número de impactos em cada faixa. As acelerações são apresentadas em unidades de gravidade (g), em que $1 g$ é considerado equivalente a $9,81 \text{ ms}^{-2}$.

A redução do número de impactos sofridos pelos frutos, principalmente aqueles de altas magnitudes, deve ser uma preocupação comum nas unidades de beneficiamento, pois estes estão diretamente relacionados com a qualidade do produto, contudo, devido a uma limitação nas esferas instrumentadas comerciais, a avaliação de impactos de menor amplitude, ou até mesmo de vibrações na linha, dificilmente é realizada.

A EESF desenvolvida neste trabalho supera a mencionada limitação, de forma que é possível definir diferentes limiares afim de identificar melhor o perfil de cada unidade de beneficiamento. Esta característica pode ajudar os pesquisadores a, por exemplo, avaliar a qualidade dos frutos submetidos a um grande número de impactos de baixa magnitude. Na Tabela 5.2 são apresentados os principais resultados dos testes realizados com a EESF nas diferentes unidades de beneficiamento, com n igual a 3 e 5 para o tratamento estatístico dos dados das unidades de beneficiamento de maçã e laranja respectivamente.

Os dados da Tabela 5.2 mostram três unidades de beneficiamento de maçã com características bem diferentes em função do tempo da linha, do número de impactos e do valor de pico do módulo da aceleração (impacto). Das três unidades testadas, a B apresentou o maior número de impactos acima de $10 g$, o menor número de impactos acima de $30 g$ e o menor valor de pico do módulo da aceleração. Já o C apresentou a característica oposta como pode ser observado com maior facilidade no gráfico da Figura 5.5.

5.2. Testes em unidades de beneficiamento

Tabela 5.2: Resultados dos testes realizados com a EESF nas diferentes unidades de beneficiamento.

Fruta	Maçã			Laranja
	A ($\bar{X} \pm Dp$)	B ($\bar{X} \pm Dp$)	C ($\bar{X} \pm Dp$)	D ($\bar{X} \pm Dp$)
Número de impactos ($ A > 10 \text{ g}$)	29,66 \pm 5,68	45,00 \pm 4,00	17,66 \pm 2,08	62,40 \pm 7,40
Número de impactos ($ A > 20 \text{ g}$)	7,33 \pm 1,15	6,33 \pm 1,15	6,33 \pm 2,08	19,40 \pm 3,60
Número de impactos ($ A > 30 \text{ g}$)	1,66 \pm 0,57	0,66 \pm 0,57	3,66 \pm 1,15	7,60 \pm 2,07
Valor de pico do $ A $ [g]	38,72 \pm 13,39	30,61 \pm 5,77	47,49 \pm 2,88	57,43 \pm 8,88
Duração [mm:ss]	02:38 \pm 00:07	05:34 \pm 00:11	03:05 \pm 00:05	02:29 \pm 00:17

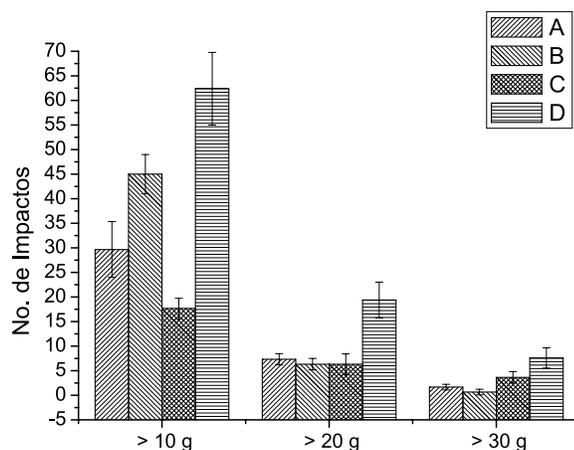


Figura 5.5: Resultados dos testes realizados com a EESF nas diferentes unidades de beneficiamento.

Com relação a unidade de beneficiamento de laranja, esta apresentou a linha de processamento mais rápida, com um número de impactos e um valor de pico do módulo da aceleração maior à das unidades de beneficiamento de maçã, resultado esperado em função das características mecânicas de cada linha de processamento e dos maiores cuidados observados no processamento das maçãs se comparadas com as laranjas, aparentemente devido a menor resistência aos impactos das maçãs.

O perfil da linha obtido com a EESF fornece informações valiosas para o melhoramento das unidades de beneficiamento e para futuras pesquisas relacionando a qualidade dos frutos com a unidade na qual foram processados.

5.2.1 Identificação de pontos de transferência e padrões

Na sequência, foi realizado um levantamento dos pontos de transferência e da altura de cada um. Na Tabela 5.3 são apresentados os pontos de transferência para a unidade de beneficiamento de maçã A.

Tabela 5.3: Pontos de transferência da unidade de beneficiamento de maçã A.

Número	Nome do ponto de transferência	Altura [cm]
1	Do rolete para esteira	9,0
2	Da esteira para a rampa de rolete	5,0
3	Do rolete para rampa	4,0
4	Da rampa para a esteira	14,0
5	Da esteira para a rampa	8,0
6	Do rolete para rampa	9,0
7	Da rampa para a cinta	1,5
8	Da cinta para o sincronizador	4,5
9	Do sincronizador para o calibrador	36
10	Do calibrador para a esteira	14
11	Da esteira para a rampa de embalagem	5,5

Utilizando a informação triaxial dos acelerômetros da EESF é possível identificar cada um destes pontos como apresentado na Figura 5.6.

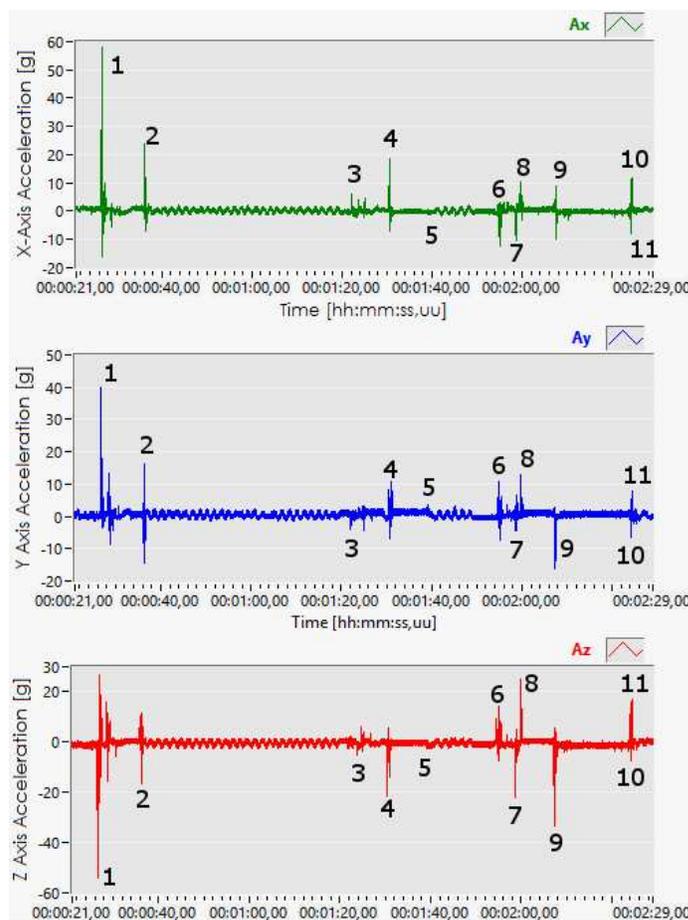


Figura 5.6: Linha de processamento da unidade de beneficiamento de maçã A, com identificação dos pontos de transferência.

5.3. Sincronismo da EESF com vídeo

Ainda é possível identificar alguns padrões que caracterizam uma determinada seção da linha, como por exemplo os roletes entre os pontos 2 e 3, ou logo depois do ponto 5, sobre os quais a EESF apresenta um sinal senoidal em pelo menos dois dos eixos da aceleração com valores de pico-a-pico em torno de $\pm 1 g$, como consequência da rotação da EESF e da decomposição vetorial da aceleração da gravidade. Outro resultado de interesse é quando a EESF é transportada sobre uma esteira, como aparece entre os pontos 4 e 5. Neste caso o sinal de aceleração fica constante com valores perto de $0 g$ para dois dos eixos e ao redor de $\pm 1 g$ para o terceiro eixo. Na Figura 5.7(a) é possível observar em detalhe estes dois padrões numa seção da linha de processamento antes e depois do ponto 5.

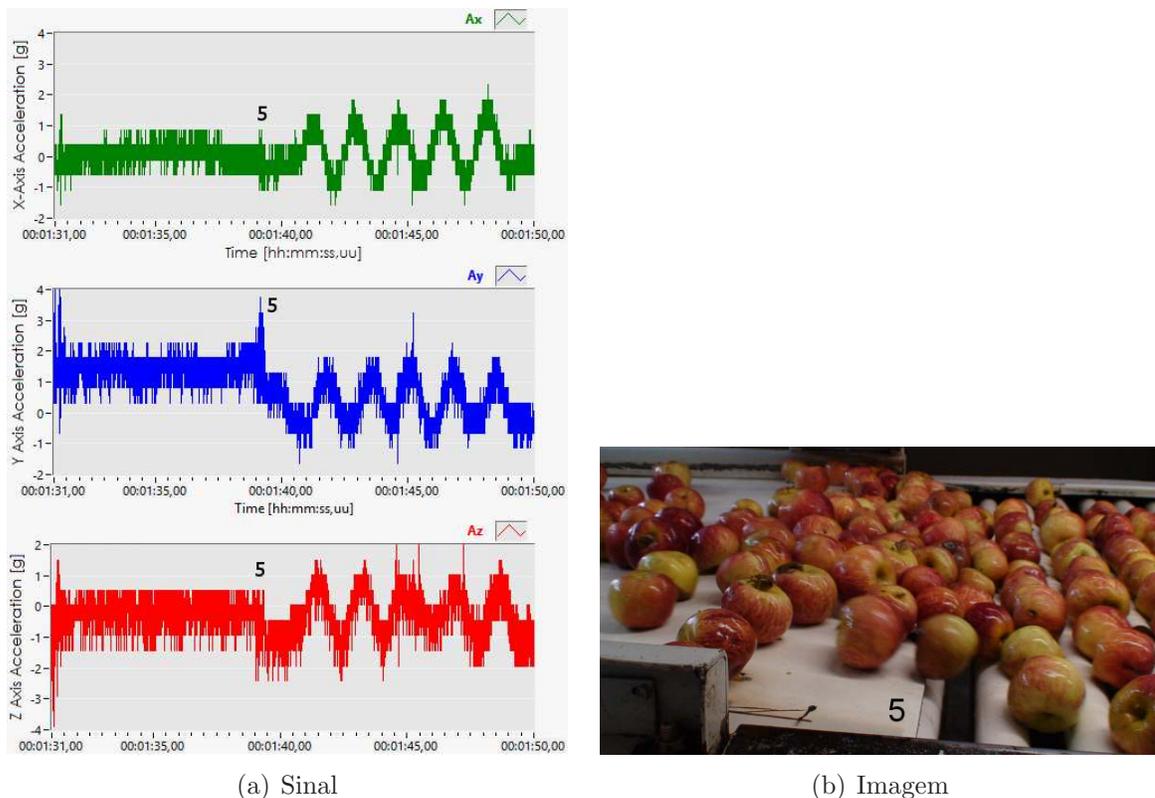


Figura 5.7: Identificação de uma esteira seguida de um rolete numa seção da linha.

5.3 Sincronismo da EESF com vídeo

A opção de sincronização da informação da EESF com a informação de vídeo, permite ao usuário relacionar com facilidade a aceleração medida pela EESF com a sua localização durante o evento desencadeador.

Neste sistema é possível utilizar qualquer tipo de câmera de vídeo, desde que se conheça sua frequência de aquisição, inclusive uma câmera de celular. Para sincronizar os dados da

EESF e do vídeo é preciso gravar uma pequena queda livre com os dois sistemas. O PPA permite fazer o ajuste nos *frames* de vídeo e nos dados de aceleração, sincronizando o valor de pico da aceleração referente ao impacto, com o *frame* de vídeo que mostra a imagem do contato da EESF com a superfície de referência.

Realizado o sincronismo inicial, o *software* permite a visualização quadro-a-quadro, avançando ou retrocedendo no tempo do vídeo e dos dados de aceleração correspondentes. Na Figura 5.8 é apresentado o gráfico com os três eixos de aceleração, no qual aparecem dois cursores paralelos que indicam o intervalo da aceleração relacionado com o quadro de vídeo selecionado. Neste caso a imagem no vídeo mostra a EESF em contato com a mesa, mas olhando os cursores paralelos no gráfico podemos identificar que essa imagem corresponde ao segundo impacto com a mesa depois da queda.

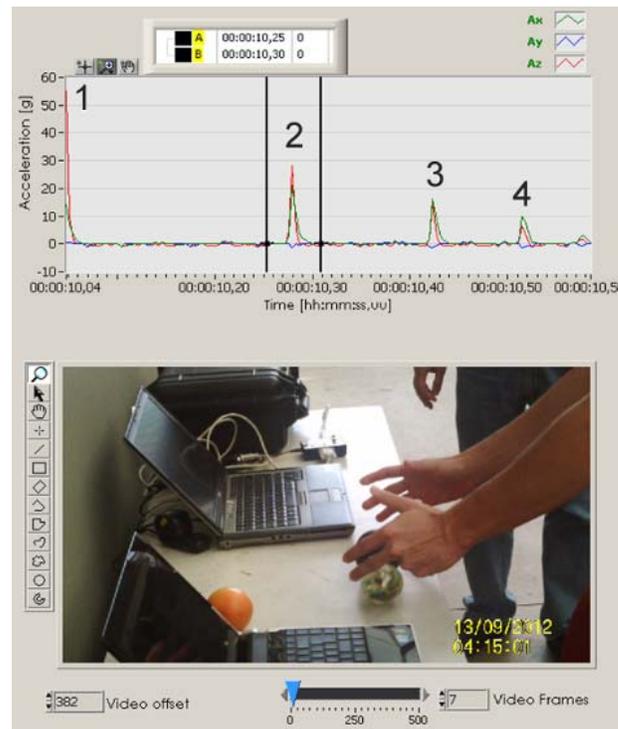


Figura 5.8: Sincronismo da EESF com vídeo utilizando o PPA.

5.4 Testes de repique com bolas de futebol

Foram avaliadas três bolas de futebol da marca Penalty[®] fabricadas com materiais diferentes pela empresa brasileira Cambuci S.A. Cada uma das bolas foi testada três vezes utilizando a PF e a cinematria de maneira sincronizada. Para cada teste de repique utilizamos uma estrutura de queda livre com liberação do objeto em estudo através de um atuador

5.4. Testes de repique com bolas de futebol

pneumático, ajustando a altura entre a superfície de contato e a parte inferior da bola para 2 metros. Esta estrutura é descrita em detalhes na Seção 3.5. A pressão das três bolas foi calibrada para 11,6 PSI (aproximadamente 0,8 Bar) e a temperatura da sala foi mantida em aproximadamente 20°C, seguindo os mesmos critérios utilizados pela FIFA neste tipo de teste (FIFA, 2013).

Processando os dados obtidos pela cinemetria, obtivemos o deslocamento nos eixos X, Y e Z para o sistema local de coordenadas com origem no centro da PF. Neste sistema de coordenadas os eixos X e Y formam o plano paralelo à superfície de contato e o eixo Z corresponde à altura, sendo positivo para todos os valores acima da superfície da PF como descrito na Seção 4.3.2. A Figura 5.9 apresenta o deslocamento da bola A nos eixos X, Y e Z respectivamente. Nos três gráficos observa-se o deslocamento desde o momento de início da queda livre da bola até alguns instantes depois da bola atingir a altura máxima do repique após o contato com a PF.

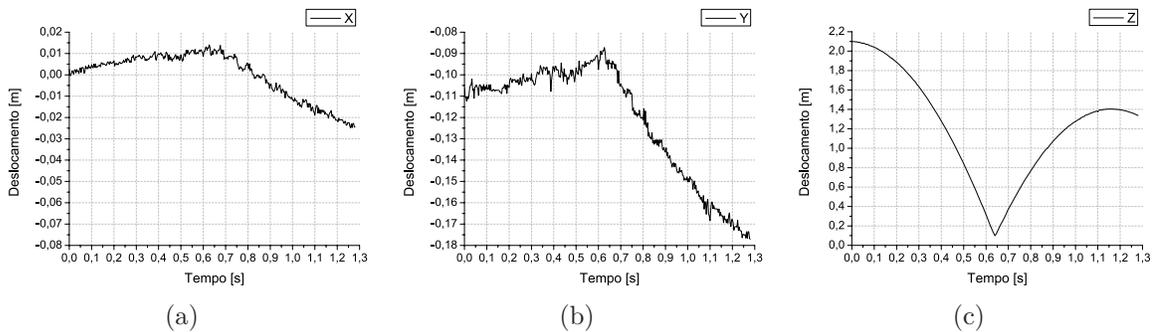


Figura 5.9: Deslocamento nos eixos X, Y e Z durante a queda livre e o repique da bola A de futebol.

Note-se que o bocal do atuador pneumático para a fixação da bola foi alinhado com o centro da PF, de forma que ao posicionar a bola no bocal, o centro dela ficasse na posição $(X\ Y) = (0\ 0)$ no sistema local de coordenadas. Contudo, para poder realizar o rastreamento da bola utilizamos um marcador de superfície colado de forma centralizada na frente da bola, dessa forma a posição inicial do marcador no início da queda livre da bola é $(0\ -0,11)$ como observado nas Figuras 5.9(a) e 5.9(b) apresentadas na mesma escala. Já no eixo Z a posição inicial do marcador ficou 11 centímetros acima da altura de dois metros $(X\ Y\ Z) = (0\ -0,11\ 2,11)$ como observado na Figura 5.9(c).

A bola fica em queda livre durante aproximadamente 0,64 segundos. Durante este tempo os eixos X e Y permanecem muito próximos da condição inicial, com uma variação no deslocamento menor que dois centímetros. Já no eixo Z a bola vai perdendo altura até bater na PF. Observe que o eixo Z não atinge o zero pois o marcador continua centralizado na frente da bola. Após o impacto na PF, a bola repica, aumentando novamente a altura no eixo Z

até um valor máximo de aproximadamente 1,4 m como observado na Figura 5.9(c).

No eixo X podemos observar que a bola se encontrava a um centímetro do centro da PF na hora do impacto e após o impacto a bola muda de direção chegando até 2,5 cm do centro da PF na direção negativa do eixo X, ou seja uma variação máxima de aproximadamente 3,5 cm como observado na Figura 5.9(a). No eixo Y o comportamento foi similar, com uma variação máxima no deslocamento de aproximadamente 8,5 cm ou 6,5 cm a partir da condição inicial como mostrado na Figura 5.9(b).

Realizando a primeira e segunda derivada do deslocamento no eixo Z, calculamos a velocidade e a aceleração respectivamente. A Equação 5.4 e a Figura 5.10 apresentam de esquerda para direita o deslocamento, a velocidade e aceleração no eixo Z.

$$\vec{Z} \Rightarrow \vec{V}_Z = \frac{d\vec{Z}}{dt} \Rightarrow \vec{A}_Z = \frac{d\vec{V}_Z}{dt} \quad (5.4)$$

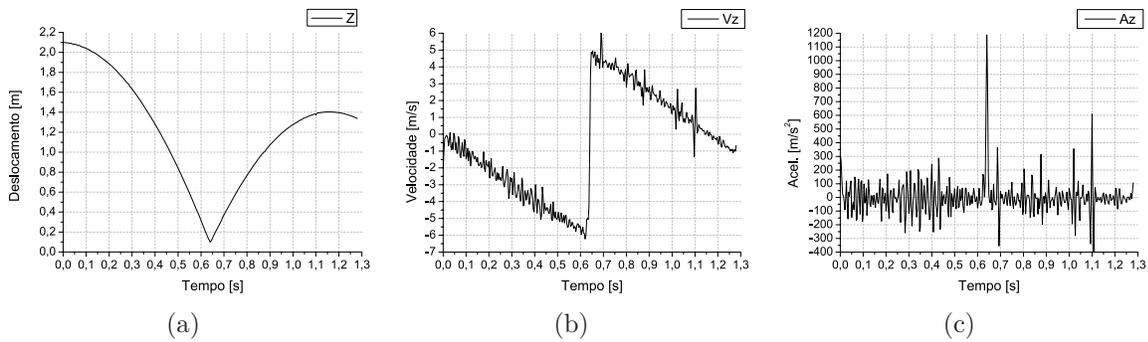


Figura 5.10: Deslocamento, velocidade e aceleração do eixo Z da bola A de futebol.

Durante a queda livre a única aceleração na bola é devido à força da gravidade, dessa forma a velocidade durante a queda é proporcional a esta e ao tempo como definida pela Equação 5.5.

$$\vec{V}_Z = -gt \quad (5.5)$$

Conhecendo o tempo de voo podemos calcular a velocidade máxima com que a bola atinge a PF na hora do impacto. O tempo de voo por sua vez, pode ser calculado em função da altura inicial da bola utilizando a Equação 5.6.

$$t_{voo} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (5.6)$$

Para uma altura de 2 m e a constante da gravidade igual a $9,81 \text{ ms}^{-2}$ o tempo de voo é de 0,638 s. Já a velocidade teórica com que a bola atinge a PF é de $-6,264 \text{ ms}^{-1}$. Estes dois

5.4. Testes de repique com bolas de futebol

valores teóricos coincidem com os dados experimentais do tempo de voo igual a 0,64 s e da velocidade inicial no contato com a PF igual a $-6,21 \text{ ms}^{-1}$, ambos mostrados na Figura 5.10(b). Na mesma figura é possível observar uma variação no sentido da velocidade, pois durante o contato da bola com a PF, a bola se deforma e deixa a PF com uma velocidade positiva de saída de $4,91 \text{ ms}^{-1}$.

Neste processo, o cálculo da derivada aumenta o ruído do sinal e como consequência, o resultado da velocidade durante a queda livre da bola deveria ser uma rampa perfeita com pente negativo, entretanto apresenta algumas oscilações. Da mesma forma, a segunda derivada aumenta ainda mais os níveis de ruído, que não permite identificar a aceleração da gravidade constante durante a queda livre antes do impacto na Figura 5.10(c). Na mesma figura, o valor máximo da aceleração, que foi de aproximadamente 1188 ms^{-2} , pode estar bastante atenuado devido ao ruído do sinal e a limitação na taxa de aquisição das câmeras utilizadas. Para o enquadramento necessário, a frequência máxima que conseguimos configurar foi de 300 FPS (*Frames Per Second*) a qual limitou o tempo entre quadros em 3,33 ms, com isto, a detecção do valor pico dos impactos ficou comprometida, já que este tipo de evento tem uma duração média de aproximadamente 8 ms, ou seja, a frequência de amostragem das câmeras utilizadas ainda é baixa para permitir maior acurácia na medida do valor de pico da aceleração.

No mesmo teste com a bola A de futebol utilizamos a PF para medir a força de reação da PF durante o impacto. Diferentemente da cinemetria, com a PF somente temos informação durante o tempo em que a bola fica em contato com a PF, porém com a vantagem de poder trabalhar com altas taxas de amostragem.

A partir da força medida com a PF e conhecendo a massa da bola podemos calcular a aceleração da bola e posteriormente realizar a primeira e segunda integral para calcular a velocidade e o deslocamento respectivamente.

A Equação 5.7 e a Figura 5.11 apresentam de esquerda para direita a aceleração, velocidade e deslocamento no eixo Z da PF durante o impacto da bola.

$$\vec{A}_Z = \frac{\vec{F}_Z}{m} \Rightarrow \vec{V}_Z = \int \vec{A}_Z dt + V_{in} \Rightarrow \vec{Z} = \int \vec{V}_Z dt \quad (5.7)$$

Para o cálculo da aceleração foi utilizada a massa da bola A igual a 0,430 kg. Na Figura 5.11(a) é apresentada a força e a aceleração durante o impacto da bola A, sendo o valor máximo da força 1393,5 N, que corresponde a uma aceleração máxima de $3240,6 \text{ ms}^{-2}$ ou $330,3 g$. Observe que o impacto da bola aumenta a aceleração durante os primeiros 5 ms até atingir o valor máximo, na sequência muda o sentido da aceleração chegando a um valor mínimo de $-477,3 \text{ ms}^{-2}$ quando a bola desencosta da PF. O tempo total de contato da bola

com a PF foi de 7,91 ms.

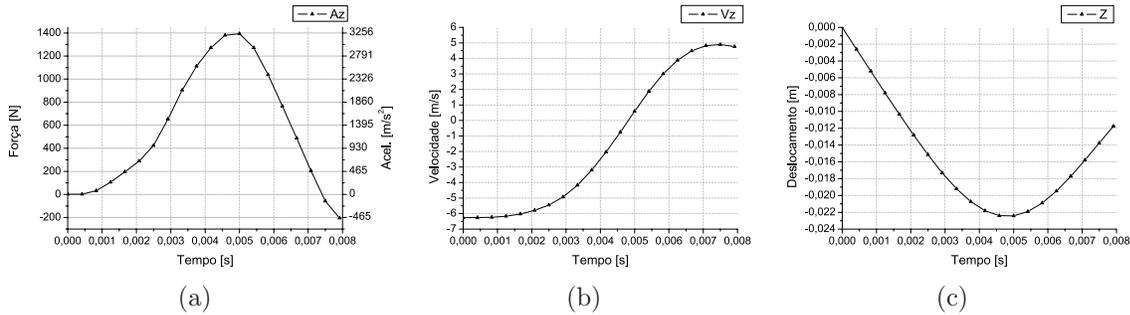


Figura 5.11: Força, aceleração, velocidade e deslocamento no eixo Z medidos e calculados com base nos dados colhidos pela PF durante o impacto da bola A de futebol.

Para poder obter o valor correto da velocidade é necessário conhecer a velocidade inicial com que a bola atinge a PF. Neste caso, como estamos trabalhando com um sistema de queda livre bem controlado, podemos utilizar o valor teórico calculado anteriormente igual a $-6,264 \text{ ms}^{-1}$ ou, se estivermos trabalhando em um cenário não controlado, podemos utilizar o valor obtido com a cinematria de $-6,21 \text{ ms}^{-1}$. Este é um exemplo de como a cinematria pode fornecer informações que não são possíveis de ser medidas de forma isolada com o uso da PF. Na Figura 5.11(b) é apresentada a velocidade da bola A durante o impacto com a PF. Observe que a velocidade de saída da bola foi de $4,89 \text{ ms}^{-1}$ muito próxima dos $4,91 \text{ ms}^{-1}$ medidos com a cinematria.

O deslocamento da Bola A calculado a partir da integral da velocidade durante o impacto é apresentado na Figura 5.11(c). Observe que a bola A se deslocou 22,4 mm no sentido negativo do eixo Z nos primeiros 5 ms de contato e depois mudou o sentido do deslocamento retornando para 11,8 mm.

Os três testes realizados com a bola A de futebol e processados com o método de cinematria e com a PF apresentaram curvas características muito similares, de forma que somente foi apresentado um dos três testes com cada equipamento.

Da mesma forma foi avaliada a segunda bola de futebol (bola B) utilizando a cinematria. A posição inicial do marcador no início da queda livre da bola foi similar ao da bola A (X Y Z) = (0 -0,11 2,11) como observado na Figura 5.12.

O deslocamento máximo a partir da condição inicial foi de aproximadamente 4 cm no eixo X e 3,5 cm no eixo Y sendo menor do que na bola A. Já no eixo Z o repique da bola foi de aproximadamente 96 cm.

Realizando a primeira e segunda derivada do deslocamento da bola B no eixo Z, calculamos a velocidade e a aceleração respectivamente, que são apresentadas na Figura 5.13. O tempo de voo e a velocidade inicial no contato com a PF foram similares ao teste com a bola A,

5.4. Testes de repique com bolas de futebol

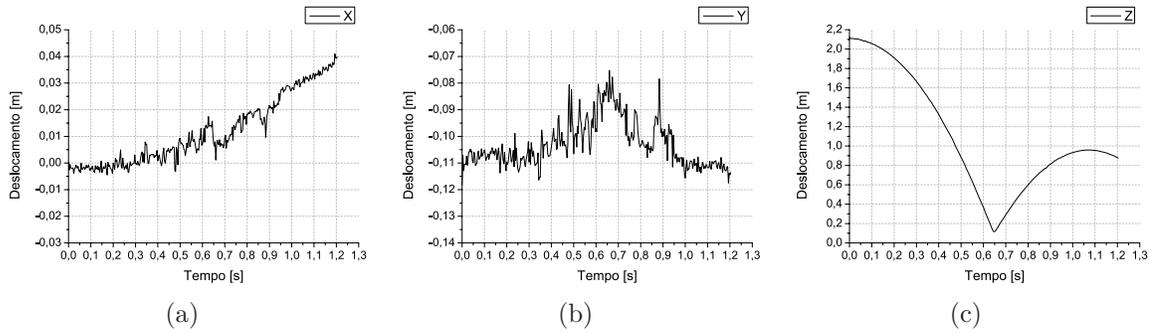


Figura 5.12: Deslocamento nos eixos X, Y e Z durante a queda livre e o repique da bola B de futebol.

como era esperado por se tratar de duas variáveis diretamente relacionadas com a altura da queda livre e a gravidade. Na Figura 5.13(b) além da velocidade inicial pode ser observada a velocidade de saída da bola B que foi de aproximadamente $4,24 \text{ ms}^{-1}$, menor que a bola A. O valor da aceleração máxima também foi menor que na bola A atingindo aproximadamente 629 ms^{-2} .

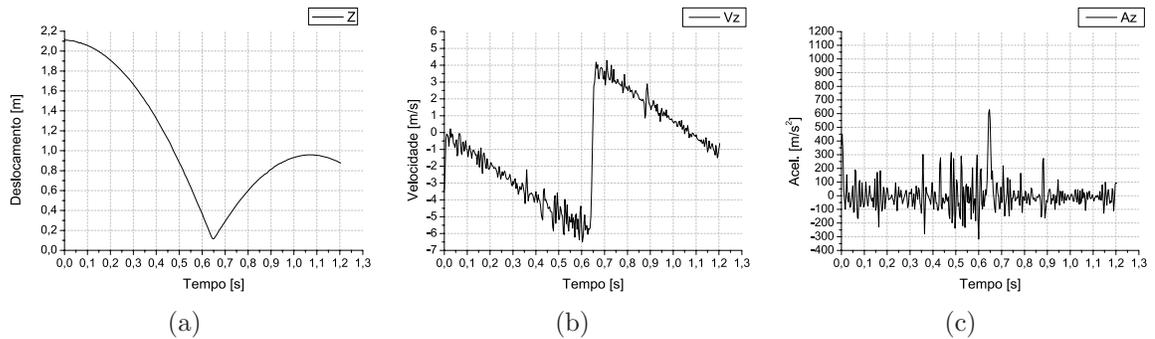


Figura 5.13: Deslocamento, velocidade e aceleração do eixo Z da bola B de futebol.

Na Figura 5.14 são apresentados da esquerda para direita a aceleração, velocidade e deslocamento da Bola B no eixo Z durante o impacto com a PF. Para o cálculo da aceleração foi utilizada a massa de $0,437 \text{ kg}$. Na Figura 5.14(a) é apresentada a força e a aceleração durante o impacto da bola B, sendo obtido o valor máximo da força $1372,8 \text{ N}$, que corresponde a uma aceleração máxima de $3141,6 \text{ ms}^{-2}$ ou $320,2 g$ valores estes menores que com a bola A.

Na Figura 5.14(b) é apresentada a velocidade da Bola B durante o impacto com a PF. Observe que a velocidade de saída da bola foi de $4,32 \text{ ms}^{-1}$ muito próxima dos $4,24 \text{ ms}^{-1}$ medidos com a cinemetria. Já o deslocamento durante o impacto, apresentado na Figura 5.14(c) mostra que a Bola B se deslocou $22,5 \text{ mm}$ no sentido negativo do eixo Z nos primeiros 5 ms de contato e depois mudou o sentido do deslocamento retornando para aproximadamente 13 mm ainda no eixo negativo.

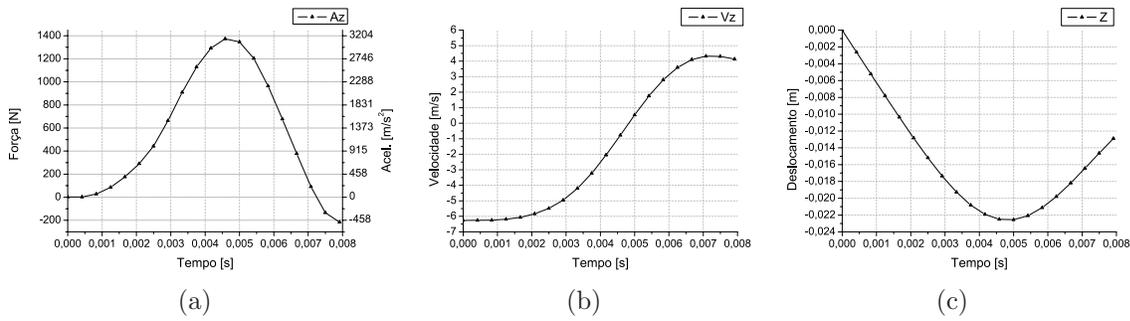


Figura 5.14: Força, aceleração, velocidade e deslocamento no eixo Z medidos e calculados com base nos dados colhidos pela PF durante o impacto da bola B de futebol.

A terceira bola de futebol avaliada com a cinemetria foi a bola C. A posição inicial do marcador no início da queda livre da bola foi $(X \ Y \ Z) = (0 \ -0,12 \ 2,11)$ como observado na Figura 5.15.

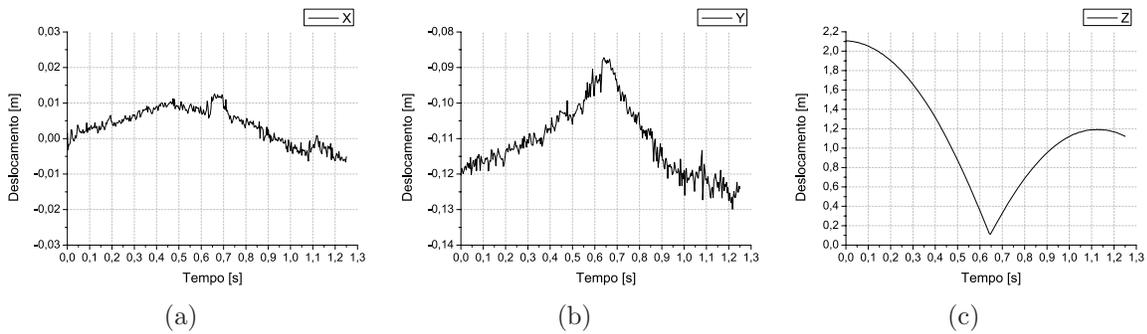


Figura 5.15: Deslocamento nos eixos X, Y e Z durante a queda livre e o repique da bola C de futebol.

O deslocamento máximo foi de aproximadamente 2 cm no eixo X e 3,5 cm no eixo Y sendo o menor das três bolas avaliadas. Já no eixo Z o repique da bola foi de aproximadamente 1,19 m. Realizando a primeira e segunda derivada do deslocamento da bola C no eixo Z, calculamos a velocidade e a aceleração respectivamente, que são apresentadas na Figura 5.16.

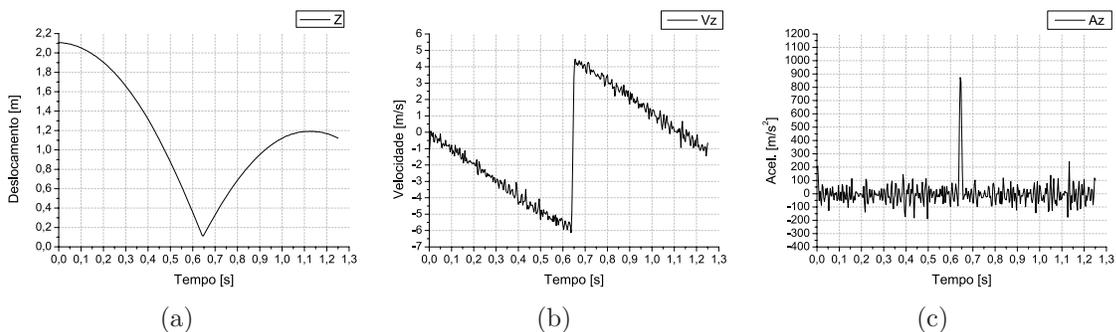


Figura 5.16: Deslocamento, velocidade e aceleração do eixo Z da bola C de futebol.

5.4. Testes de repique com bolas de futebol

Na Figura 5.17 são apresentados de esquerda para direita a aceleração, velocidade e deslocamento da Bola C no eixo Z durante o contato com a PF. Para o cálculo da aceleração foi utilizada a massa de 0,436 kg. A Figura 5.17(a) mostra a força e a aceleração durante o impacto da bola C, sendo o valor máximo da força 1403,4 N, que corresponde a uma aceleração máxima de $3218,8 \text{ ms}^{-2}$ ou $328,1 g$. A Figura 5.17(b) apresenta a velocidade da Bola C. Observe que a velocidade de saída da bola foi de $4,58 \text{ ms}^{-1}$ muito próxima dos $4,46 \text{ ms}^{-1}$ medidos com a cinemetria. A Figura 5.17(c) mostra um deslocamento de 22,2 mm no sentido negativo do eixo Z nos primeiros 5 ms de contato e depois uma inversão no sentido retornando para aproximadamente 11,9 mm ainda no eixo negativo.

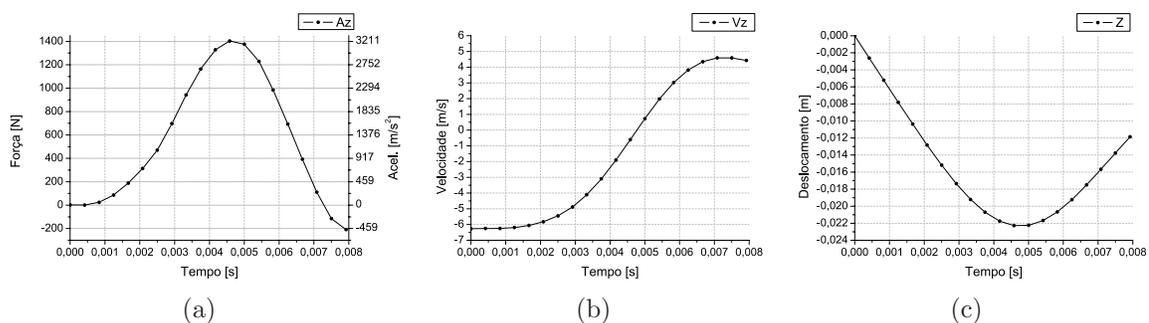


Figura 5.17: Força, aceleração, velocidade e deslocamento no eixo Z medidos e calculados com base nos dados colhidos pela PF durante o impacto da bola C de futebol.

Observe que tanto com a cinemetria quanto com a PF é possível caracterizar cada bola através de variáveis cinemáticas, identificando por exemplo, a bola mais “veloz”. A cinemetria fornece algumas informações adicionais que não podem ser obtidas com a PF, como por exemplo, a altura do repique e a velocidade de chegada na PF. Contudo, a informação durante o contato da bola, medida com a PF é muito mais acurada, principalmente na medida da aceleração e da velocidade. Nas Tabelas 5.4 e 5.5 é apresentado um resumo das principais variáveis avaliadas com a cinemetria e com a PF respectivamente, para as três bolas de futebol.

Na Tabela 5.4 podemos observar que a velocidade de chegada na PF de todas as bolas medidas com a cinemetria foi muito próxima, que era esperado e condiz com o cálculo teórico apresentado na discussão desta mesma seção. A velocidade de saída, foi diferente para cada bola, e está diretamente relacionada com os materiais utilizados na fabricação de cada bola. Além disso, a velocidade de saída é diretamente proporcional à altura do repique, sendo este último, um parâmetro utilizado pela FIFA para certificar a qualidade da bola de futebol para uso profissional.

Na Tabela 5.5 podemos observar valores de velocidade de saída muito próximos dos obtidos com a cinemetria utilizando a PF, para cada uma das bolas. A PF também fornece as

Tabela 5.4: Resultados obtidos com a cinemetria para as três bolas de futebol testadas.

Parâmetro	Bola A	Bola B	Bola C
Altura máxima no eixo Z [m]	2,105	2,123	2,110
Altura mínima no eixo Z [m]	0,100	0,116	0,112
Altura do repique no eixo Z [m]	1,403	0,960	1,195
Velocidade de chegada na PF [ms^{-1}]	-6,21	-6,10	-6,13
Velocidade de saída da PF [ms^{-1}]	4,910	4,24	4,46
Aceleração máxima [ms^{-2}]	1187,9	628,9	873,2
Tempo de voo [s]	0,64	0,646	0,646

acelerações durante os impactos de cada bola, que é um dado pouco confiável na avaliação com a cinemetria. Além de fornecer o tempo de contato e o deslocamento da bola durante o impacto de forma mais acurada que com a cinemetria.

Tabela 5.5: Resultados obtidos com a PF para as três bolas de futebol testadas.

Parâmetro	Bola A	Bola B	Bola C
Massa [kg]	0,430	0,437	0,436
Força máxima [N]	1393,5	1372,8	1403,4
Força mínima [N]	-205,2	-215,8	-208,7
Aceleração máxima [ms^{-2}]	3240,6	3141,6	3218,8
Aceleração máxima [g]	330,3	320,2	328,1
Aceleração mínima [ms^{-2}]	-477,3	-493,8	-478,8
Aceleração mínima [g]	-48,65	-50,33	-48,81
Velocidade de chegada na PF [ms^{-1}]	-6,26	-6,26	-6,26
Velocidade de saída da PF [ms^{-1}]	4,89	4,32	4,58
Deslocamento máximo [mm]	-22,4	-22,5	-22,2
Deslocamento mínimo [mm]	-11,8	-13,0	-11,9
Tempo de contato [ms]	7,916	7,916	7,916

5.5 Efeito da pressão da bola na altura do repique

Avaliamos a bola A de futebol utilizando cinemetria e a mesma estrutura de queda livre com atuador pneumático descrita na Seção 3.5. A altura foi ajustada para 2 metros entre a superfície de contato e a parte inferior da bola. A temperatura da sala foi mantida em aproximadamente 20°C e a pressão da bola A foi calibrada inicialmente para 11,2 PSI. A pressão foi sendo diminuída em aproximadamente 1 PSI a cada novo teste até atingir 5 PSI. Na Figura 5.18 podemos observar que a altura do repique diminuiu aproximadamente 3 cm para cada diminuição de 1 PSI.

5.6. Área de contato e pressão

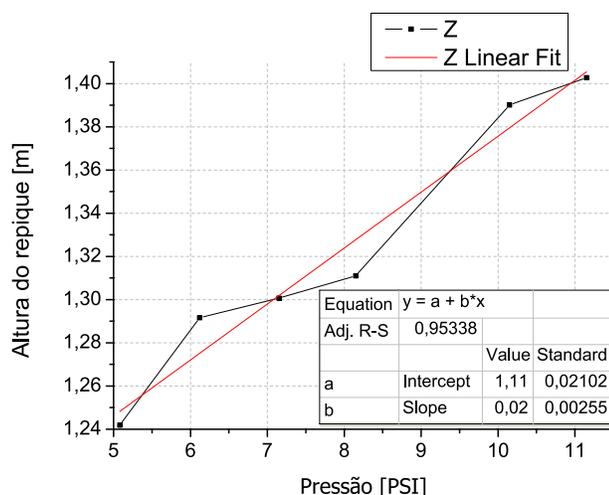


Figura 5.18: Variação da altura do repique em função da pressão da bola A de futebol.

5.6 Área de contato e pressão

Neste último teste foi estimada a área de contato da bola com a PF durante os testes de repique da bola de futebol utilizando a cinemetria. Isto foi possível devido a uma característica da nossa PF, que foi projetada de forma que permite utilizar uma câmera por baixo, em sincronismo com a medida da força realizada pela PF. Os detalhes da fabricação da PF foram apresentados na Seção 3.2.

A Figura 5.19 mostra como a área de contato em cada *frame* do vídeo, e a força medida pela PF vão aumentando até atingir o valor máximo e depois diminui até a bola sair da PF.

Com a estimativa da área (A), e o valor da força (F) correspondente para cada *frame* é possível estimar a variação da pressão sofrida na PF durante o impacto utilizando a Equação 5.8.

$$P = \frac{F}{A} \quad (5.8)$$

Pelo observado nas imagens podemos aproximar a área de contato para uma área circular, que pode ser calculada utilizando a Equação 5.9.

$$A_c = \pi r^2 \quad (5.9)$$

Para a estimativa da área de contato foi feita uma calibração simples, pois conhecemos o diâmetro do furo circular na PF (102,5 mm), de forma que podemos relacionar o valor real com o valor do diâmetro da circunferência na imagem como mostrado na Figura 5.20. Para o valor de pico da força de aproximadamente 1393,5 N, foi estimada uma área de contato de

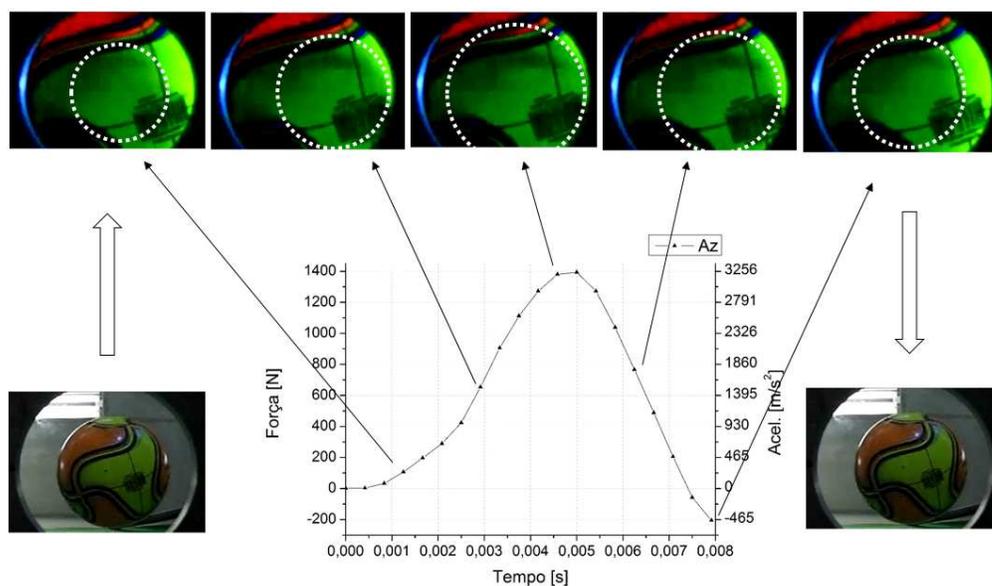


Figura 5.19: Relação entre a área de contato e a força na bola A de futebol durante os testes de repique.

aproximadamente $0,005 \text{ m}^2$, que corresponde a uma pressão de aproximadamente 278600 Pa ou $40,1 \text{ PSI}$.

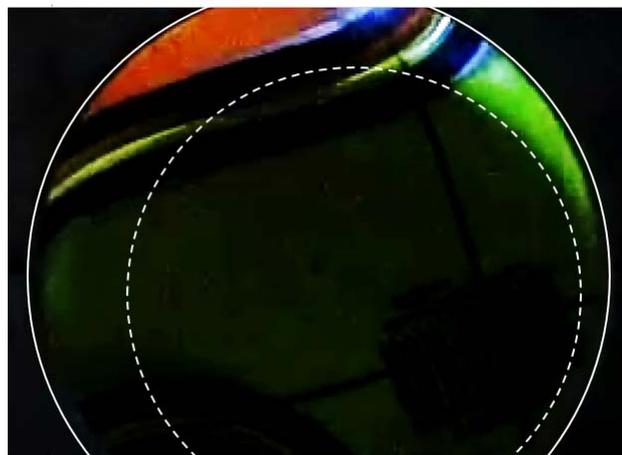


Figura 5.20: Estimativa da área de contato da bola A de futebol durante os testes de repique.

Para uma estimativa mais precisa seria desejável melhorar a iluminação por baixo da PF, evitando regiões sombreadas na imagem que podem alterar a estimativa da área de contato e portanto o cálculo do valor da pressão.

A possibilidade de visualizar a área de contato e relacioná-la a força medida permite analisar a deformação da bola relacionando-a com o material e pressão interna.

Conclusões e perspectivas

Neste trabalho foram desenvolvidos e testados dois novos instrumentos para o estudo e a análise dos impactos sofridos por frutos durante os processos de pós-colheita na agricultura e os impactos sofridos pela bola de futebol em atividades esportivas, um deles com depósito de patente e o outro ainda em estudo de patenteabilidade.

A chamada Esfera Eletrônica Sem Fio (EESF) é um sistema de monitoramento em tempo real de variáveis biomecânicas (aceleração, impacto, velocidade, deslocamento, vibração e tempo), que integra *hardware* e *software*, podendo ser aplicado dentre outros no esporte e na agricultura. Na agricultura, o circuito eletrônico da EESF, também chamado de placa móvel, é encapsulado dentro de uma esfera, facilitando o monitoramento de frutas e outros produtos perecíveis, mediante a aquisição de variáveis que afetam a qualidade do produto durante seu processamento, armazenamento e/ou transporte. No esporte, a placa móvel pode ser encapsulada, acoplada ou embutida em equipamentos esportivos, como por exemplo, bolas, luvas de boxe, calçado, coletes, pulseiras ergonômicas, dentre outros, facilitando o monitoramento do atleta ou do equipamento esportivo.

O *hardware* da EESF desenvolvida possui um diâmetro de 63 mm, massa de 168 g, densidade de aproximadamente 1,1, acelerômetros triaxiais na faixa de $\pm 200 g$ para cada eixo (X,Y,Z), comunicação sem fio no padrão *Zigbee*TM com alcance de 70 m, taxa de amostragem de 438 Hz e autonomia de 45 minutos.

Nos testes de queda livre com a EESF demonstrou-se que as acelerações medidas internamente na EESF foram atenuadas pelo encapsulamento de Poliuretano (PU), que é uma característica desejada já que além do monitoramento dos impactos, o sistema pode ser utilizado para avaliar o efeito do amortecimento do material utilizado no encapsulamento. Também ficou claro que as alterações na espessura do encapsulamento afetam diretamente a magnitude das acelerações medidas no interior da esfera.

O uso da EESF em sincronismo com a PF permitiu observar o valor real das acelerações

durante os testes de queda livre, podendo ser calculado o fator de correção para que a EESF meça as acelerações com e sem o efeito do encapsulamento dependendo da aplicação.

A comparação da aceleração sofrida por esferas instrumentadas distintas deve ser feita com critério, pois o fator encapsulamento deve ser levado em consideração. Além disto, no caso particular do nosso estudo, a mesma EESF mediu valores diferentes para eixos distintos. Uma vez caracterizado o encapsulamento, os valores medidos podem ser normalizados e comparados diretamente para as medidas dinâmicas ou de impacto.

Utilizando o *Software* de Análise em Tempo Real (RTA) foi possível acompanhar nos gráficos os impactos que a EESF foi sofrendo ao longo da linha da unidade de beneficiamento enquanto era feita a aquisição, verificando a integridade dos dados e permitindo uma análise preliminar.

Diferentemente das esferas instrumentadas comerciais, a EESF possui uma ampla faixa de aceleração que permite que sejam monitorados impactos de diferentes amplitudes, ou até mesmo vibrações. Desta forma é possível definir diferentes limiares afim de identificar melhor o perfil de cada unidade de beneficiamento. Esta característica pode ajudar os pesquisadores a por exemplo, avaliar os efeitos na qualidade dos frutos submetidos a um grande número de impactos de baixa magnitude.

Com o uso da EESF foi possível caracterizar cada unidade de beneficiamento em função do número de impactos acima de três limiares diferentes (10 g, 20 g e 30 g), do valor de pico do módulo da aceleração e do tempo. Os resultados mostraram três unidades de beneficiamento de maçã com características diferentes. Já a unidade de beneficiamento de laranja apresentou a linha de processamento mais rápida, com um número de impactos e um valor de pico do módulo da aceleração maior a das unidades de beneficiamento de maçã, resultado esperado em função das características mecânicas de cada linha de processamento e dos maiores cuidados observados no processamento das maçãs se comparadas com as laranjas, aparentemente devido a menor resistência aos impactos das maçãs.

Os dados coletados com a EESF forneceram informações valiosas para o melhoramento das unidades de beneficiamento e para futuras pesquisas relacionando a qualidade dos frutos processados em cada unidade de beneficiamento, com o perfil da linha.

Utilizando a informação triaxial dos acelerômetros da EESF foi possível identificar cada ponto de transferência em uma linha de uma unidade de beneficiamento, os quais são os principais causadores de amassamentos nos frutos. Além do reconhecimento de alguns padrões que caracterizam uma determinada seção da linha, como por exemplo, os roletes e as esteiras.

A opção de sincronização de vídeo do *software* de Análise e Pós-processamento (PPA), permitiu obter uma relação precisa entre a aceleração e a posição da EESF, que em alguns casos pode ajudar a determinar a causa do impacto.

A PF desenvolvida superou as nossas expectativas, apresentando uma alta repetibilidade, altíssima sensibilidade, permitindo a medida de forças a partir de $\pm 3,5$ N até ± 2200 N, alta Relação Sinal-ruído (SNR) e a possibilidade de utilizar uma câmera por baixo, em sincronismo com a medição da força. Este diferencial permite estimar a área de contato em sincronismo com a medição da força, com a qual é possível calcular a pressão sofrida pela PF durante o impacto.

A cinematria mostrou-se uma ferramenta muito útil para a análise de movimento, mesmo sendo um método que requer relativamente maior tempo para realizar o processamento dos dados. A utilização da cinematria foi muito importante para a validação dos resultados obtidos com a PF, principalmente na medida da velocidade e do deslocamento.

Os testes de repique com bola de futebol mostraram que é possível caracterizar cada bola através de variáveis cinemáticas, tanto com a cinematria quanto com a PF identificando por exemplo, a bola mais “veloz”. A cinematria fornece algumas informações adicionais que não podem ser obtidas com a PF, como por exemplo, a altura do repique e a velocidade de chegada na PF. Contudo, a informação durante o contato da bola, medida com a PF é muito mais acurada principalmente na medida da aceleração e da velocidade.

A velocidade de chegada na PF de todas as bolas medidas com a cinematria foi muito próxima, o que era esperado e condiz com o cálculo teórico. A velocidade de saída, foi diferente para cada bola, e está diretamente relacionada com os materiais utilizados na sua fabricação. Além disso, a velocidade de saída é diretamente proporcional à altura do repique, sendo este último, um parâmetro utilizado pela FIFA para certificar a qualidade da bola de futebol para uso profissional.

O uso da cinematria em sincronismo com a PF permitiu a validação e o compartilhamento de informações de forma que os dois sistemas se complementam. A velocidade de saída da bola durante os testes de repique foi muito próxima nos dois sistemas e em todos os testes realizados. Já a medida da aceleração durante o impacto é pouco confiável utilizando a cinematria, mas é muito acurada com a PF. A velocidade de chegada da bola na PF somente pode ser medida com a cinematria, mas é uma informação necessária para calcular corretamente a velocidade de saída da bola na PF.

O uso de uma alta frequência de aquisição na PF permite determinar com maior precisão à aceleração e o tempo de contato da bola de futebol com a PF durante o impacto.

A EESF e a PF foram desenvolvidos visando baixo custo e fácil operação para facilitar a transferência desta tecnologia para uma futura comercialização e difusão industrial.

A integração de diferentes tecnologias mostrou-se ser uma ferramenta valiosa no estudo do impacto e suas relações com o objeto em estudo. As informações colhidas de diversos instrumentos foram comparadas e cruzadas, favorecendo o entendimento da mecânica do

impacto. Estes instrumentos são facilmente adaptáveis a qualquer necessidade específica dentro da análise de problemas que envolvem impacto, tendo aplicações não somente em agricultura e esporte mas também na área médica e de materiais.

Perspectivas

Acreditamos que a tecnologia desenvolvida neste trabalho pode ser adaptada para diferentes aplicações comerciais podendo ser o ponto de partida de uma empresa encubada do tipo *startup*. Algumas das possíveis aplicações comerciais podem ser:

- Avaliação de unidades de beneficiamento.
- Avaliação do transporte de carga de alimentos perecíveis.
- Identificação de diferentes tipos de estrutura ou eventos mediante o análise dos sinais de aceleração.
- Determinação da causa de um impacto utilizando aceleração em sincronismo com vídeo.
- Aprimoramento da técnica esportiva.
- Avaliação de materiais.

Referências bibliográficas

- Abdel-Aziz, Y. I. and Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates, *Proceedings of Close-Range Photogrammetry* pp. 1–18.
- Armstrong, S. (2007). Wireless connectivity for health and sport monitoring, *British Journal of Sport Medicine* **41**: 285–289.
- Baca, A. and Kornfeind, P. (2006). Rapid feedback systems for elite sports training, *IEEE CS, IEEE ComSoc* pp. 70–76.
- Barros, R. M. L. (1997). *Concepção e implementação de um sistema para análise cinemática de movimentos humanos*, PhD thesis, Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas.
- Barros, R. M. L. (2009). *Disciplina cinemetria e antropometria, Especialização em Biomecânica*, FEF, UNICAMP.
- Canneyt, T., Tijsskens, E., Ramon, H., Verschoore, R. and Sonck, B. (2003). Characterisation of a potato-shaped instrumented device, *Biosystems Engineering* **86**(3): 275 – 285.
- Chi, E. H., Borriello, G., Davies, N. and Hunt, G. (2005). Pervasive computing in sport technologies, *IEEE ComSoc, IEEE CS* **05**: 22–25.
- COIM (2010). Imuthane 42-60a data sheet, *Technical report*, Lumapur s.a.
- FIFA (2013). Football tests, *Página na internet*, FIFA. Acesso em: 08 Ago. 2013. Disponível em: <http://footballs.fifa.com/Football-Tests>.
- Figueroa, P. J., Leite, N. J. and Barros, R. M. L. (2003). A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis, *Computer Methods and Programs in Biology* **72**: 155–165.

- Fischer, I. H., Ferreira, M. D., M. B. Spósito, M. and Amorim, L. D. (2009). Citrus postharvest diseases and injuries related to impact on packing lines, *Scientia Agricola* **66**(2): 210–217.
- Fruett, F., Ferreira, M. D. and Nicolau, M. (2013). Dispositivo de monitoramento para frutos hortícolas, frutas e outros produtos perecíveis, sistema de monitoramento para produtos perecíveis e sistema de aquisição de dados. Patente BRPI1009963-8.
- García-Ramos, F. J., Ortiz-Cañavate, J. B. and Ruiz-Altisent, M. B. (2004). Analysis of the factors implied in the fruit-to-fruit impacts on packing lines, *Applied Engineering in Agriculture* **20**(5): 671–675.
- Haan, T. and McNally, W. (2000). Impact measuring device for delicate and fragile articles. Patente US006125686A.
- Herold, B., Truppel, I., Siering, G. and Geyer, M. (1996). A pressure measuring sphere for monitoring handling of fruit and vegetables, *Computers and Electronics in Agriculture* **15**(1): 73–88.
- Kuenzler, U. and Englert, W. (2007). Device and method for measuring a rotational frequency of a movable game device. Patente US20070059675.
- Kyowa (2012). *General-purpose Foil Strain Gages in KFG Series*.
- Liebermann, D. G., Katz, L., Hughes, M. D., Bartlett, R. M., McClements, J. and Franks, I. M. (2002). Advances in the application of information technology to sport performance, *Journal of Sports Sciences* **20**: 755–769.
- Masitek (2013). Smart spud, *Página da internet*, Masitek home page. Acesso em: 28 fev. 2013. Disponível em: <http://masitek.com/products/agricultural/smartsput>.
- Messias, A. R. (2009). Controle remoto e aquisição de dados via xbee/zigbee (ieee 802.15.4), *Página na internet*, RogerCom Homepage. Acesso em: 03 mar. 2013. Disponível em: <http://www.rogercom.com/index.htm>.
- Muller, I., Basso, D., Brusamarello, V. and Pereira, C. E. (2012). Three-independent axis instrumented sphere for compression measurement based on piezoelectric transducers, *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC 2012*, pp. 628–632.

- Muller, I., de Brito, R. M., Pereira, C. E. and Bender, R. J. (2009). Wireless instrumented sphere for three-dimensional force sensing, *SAS 2009 - IEEE Sensors Application Symposium, Proceedings*, IEEE Instrumentat & Measurement Soc, IEEE, pp. 153–157.
- Nicolau, M. (2009). *Esfera instrumentada de baixo custo para monitoramento de impactos e temperatura durante processos pós-colheita*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- O'Brien, M., Fridley, R. B., Goss, J. R. and Schubert, J. F. (1973). Telemetry for investigating forces on fruits during handling, *Transactions of the ASAE*.
- Ohgi, Y. (2002). Microcomputer-based acceleration sensor device for sport biomechanics, stroke evaluation by using swimmer's wrist acceleration, *IEEE Journal* pp. 699–704.
- Pan, F. C. H., Chuang, F.-C. and Chu, C.-C. (2011). Ball movement path measuring method. Patente EP2388048A1.
- Parks, R. and Anderson, G. (1989). Devices for assessing processing stresses. Patente US4829812.
- Roa, Y. H. H. and Fruett, F. (2009). A sport activities monitoring system based on acceleration and rotation microelectromechanical sensors., *8th International Conference and Workshop on Ambient Intelligence and Embedded Systems EMIES-09*.
- Roesler, H. (1997). *Desenvolvimento de plataforma subaquática para medições de forças e momentos nos três eixos coordenados para utilização em Biomecânica*, Tese de doutorado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.
- Sangha, S. P. (2008). Exercise article. Patente WO2008015465.
- Schulte, N., Brown, G. K. and Timm, E. T. (1992). Apple impact damage thresholds, *Applied Engineering in Agriculture* **8**(1): 55–60.
- Seed (2012). Uartsbee wiki, *Página na internet*, Seed Studio. Acesso em: 03 mar. 2012. Disponível em: <http://www.seedstudio.com/wiki/index.php?title=UartSBee>.
- Silvatti, A. P. (2013). *Calibração de câmeras para análises subaquáticas de movimentos*, PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física.
- Slocum, A. and Kennett, R. (2009). Tracking and interactive simulation of real sports equipment. Patente US20090029754.

- Tennes, B. R., Brown, G. K., Clemens, J. R. C., Affeldt, H. A., Siyami, S., Klug, B. A. and Zapp, H. R. (1988). Impact detection apparatus. Patente US4745564.
- Travis, J. and Kring, J. (2006). *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*, 3 edn, Prentice Hall.
- Wixted, A. J., Thiel, D. V., Hahn, A. G., Gore, C. J. and James, D. A. (2007). Measurement of energy expenditure in elite athletes using mems-based triaxial accelerometers, *IEEE Sensors Journal* **7**(4): 481–488.
- Yu, P., Li, C., Rains, G. and Hamrita, T. (2011a). Development of the berry impact recording device sensing system: Hardware design and calibration, *Computers and Electronics in Agriculture* **79**: 103–111.
- Yu, P., Li, C., Rains, G. and Hamrita, T. (2011b). Development of the berry impact recording device sensing system: Software, *Computers and Electronics in Agriculture* **77**(2): 195 – 203.
- Yu, P., Li, C., Takeda, F. B., Krewer, G., Rains, G. and Hamrita, T. (2012). Quantitative evaluation of a rotary blueberry mechanical harvester using a miniature instrumented sphere, *Computers and Electronics in Agriculture* **88**: 25–31.
- Zapp, H., Ehlert, S., Brown, G. K., Armstrong, P. R. and Sober, S. S. (1990). Advanced instrumented sphere (is) for impact measurements, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **33**(3): 955–960.
- Zunkeller, R. (2010). Comunicação confidencial em: 10 de julho de 2010, *Cambuci S.A.* .

Publicações, submissões e patentes

Publicações

Roa, Y. H. H.; Fruett, F. Redes De Sensores Sem Fio: Uma Abordagem Prática. In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito. p. 2329-2336.

Lattes, M. F.; Gatti, R. G. O.; Roa, Y. H. H.; Fruett, F.; Cunha, S. C., Martins, L. E. B. Assessment of micro sensor (SM-MAE) in monitoring of cycling. In: XXIV Congress of the International Society of Biomechanics, 2013, Natal.

Submissões aceitas

Roa, Y. H. H.; Fruett, F.; Ferreira D. M. Real Time Measurement System based on Wireless Instrumented Sphere. Accepted to SpringerPlus journal on 21 October 2013.

Depósito de patentes

O seguinte pedido de patente por Privilégio de Invenção (PI) foi devidamente depositado junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI).

Roa, Y. H. H.; Fruett, F. Dispositivo de medição de variáveis biomecânicas em tempo real e usos. INPI. Processo número: BR 10 2013 021712 3. 26 de agosto de 2013.

Esfera Eletrônica Sem Fio

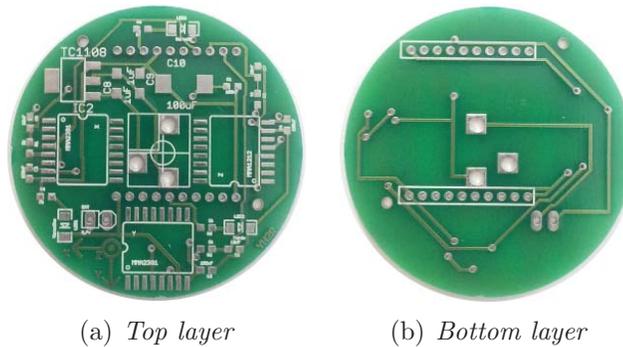


Figura B.1: Fotos da Placa de Circuito Impresso da EESF.

Tabela B.1: Lista de componentes da EESF.

Descrição	Quantidade
Acelerômetro Analógico MMA2301	2
Acelerômetro Analógico MMA1212	1
Regulador TC1108-3.3	1
Módulo XBee XB24-ACI-001	2
Placa UartSbee	1
Bateria <i>Lithium-Ion</i> 300 mAh, 3,7 V (30×20×5 mm)	1
<i>Socket</i> 10 vias, 2 mm	2
Conector 3,5 mm	1
Capacitor 1 μF , 16 V tantalo SMD	2
Capacitor 100 μF , 16 V tantalo SMD	1
Capacitor 100 nF, 16 V Cerâmico SMD	4
Capacitor 10 nF, 16 V Cerâmico SMD	3
Resistor 1 k Ω 1% SMD	4
LED SMD	1

Apêndice C

Fotos da estrutura de queda livre e do *layout* das câmeras



Figura C.1: *Layout* das câmeras no LSM.



Figura C.2: *Layout* das câmeras no LSM.



Figura C.3: *Layout* das câmeras no LSM.

Apêndice **D**

Fotos dos diferentes unidades de
beneficiamento



Figura D.1: Unidade de beneficiamento de maçã A em Vacaria RS.



Figura D.2: Unidade de beneficiamento de maçã B Vacaria RS.



Figura D.3: Unidade de beneficiamento de maçã C Vacaria RS.



Figura D.4: Unidade de beneficiamento de laranja D em Mogi Guaçu SP.