

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA**

CAROLINE PEIXOTO SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE AVALIAÇÃO E
ANÁLISE DE SALTO VERTICAL BASEADA EM SENSORES
PIEZOELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

CAROLINE PEIXOTO SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE AVALIAÇÃO E
ANÁLISE DE SALTO VERTICAL BASEADA EM SENSORES
PIEZOELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Jr.

PONTA GROSSA

2017



FOLHA DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE AVALIAÇÃO E ANÁLISE DE SALTO VERTICAL BASEADO EM SENSORES PIEZOELÉTRICOS

Desenvolvido por:

CAROLINE PEIXOTO SANTOS

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 30 de novembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. O candidato foi arguido pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinado. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dr. Sergio Luiz Stevan Jr.
Professor Orientador

Me. Edison Luiz Salgado Silva
Membro titular

Me. José Jair Alves Mendes Jr.
Membro titular

À Deus, em primeiro lugar
Aos meus pais, Sebastião e Regina
As minhas avós, Maria Ap. e Ana Cristina
Aos meus amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve presente em minha vida, independente de momentos de alegria ou tristeza.

Ao professor Dr. Sergio Luiz Stevan Jr., meu orientador, pela disponibilidade, colaboração e paciência prestada desde o início deste trabalho e, principalmente, por ser um excelente guia, me desafiando e me fazendo enxergar além do meu potencial.

A todos os professores que me auxiliaram no decorrer da pesquisa, ou que me deram a base para que eu pudesse desenvolver o projeto, em especial ao professor Me. José Jair Alves Mendes Jr. pela ajuda com o *software* LabVIEW™.

Aos meus colaboradores Dr. Mauro Ricetti Paes e Me. Paulo Eduardo Redkva pelo apoio e pela disponibilização do material, confiando-me a oportunidade de trabalhar com esportes.

Aos meus pais e familiares, que sempre me apoiaram e ajudaram para continuar no decorrer do curso e que, nos momentos difíceis, me deram conforto, ânimo e alegria.

Ao meu namorado, Augusto Braga de Almeida, por todo seu suporte e pela sua dedicação em me ajudar em todos os meus desafios no decorrer do curso e no desenvolvimento do projeto.

Enfim, aos meus amigos que sempre se fizeram presentes, tanto em momentos de trabalho quanto de lazer; e a todos aqueles que confiaram em meu trabalho e participaram dos testes, principalmente à equipe do CIEBE.

“It is our choices, Harry, that show what we truly are, far more than our abilities.”

(J.K. Rowling, Harry Potter and the Chamber of Secrets, 1998)

RESUMO

PEIXOTO SANTOS, Caroline. **Desenvolvimento de uma plataforma de avaliação e análise de salto vertical baseada em sensores piezoelétricos**. 2017. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

A importância da medição de dados provenientes da condição física e fisiológica do atleta é algo que vem ganhando destaque, pois fornecem base para tomada de decisões e estratégia de treinamento, além de avaliações temporais para melhoria de desempenho e prevenção de lesões. O salto vertical é um movimento no qual carrega informações essenciais para avaliação de condicionamento físico e fisiológico de atletas de diversas modalidades esportivas, como basquetebol, voleibol, natação, entre outras. Algumas das variáveis que podem ser analisadas devido a um teste de salto vertical são tempo de voo, altura e potência. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma de salto vertical utilizando sensores piezoelétricos cerâmicos. O desenvolvimento do equipamento foi realizado com o estudo dos sensores piezoelétricos de 35 mm para medição da tensão em função da força aplicada sobre a superfície da plataforma, seguido de um condicionamento e processamento de sinais, uso de microcontroladores para processamento e identificação dos dados e instrumentação virtual para realização dos cálculos matemáticos para obtenção das variáveis. As medições tiveram início com a caracterização dos sensores piezoelétricos de forma a verificar a sua correlação com a força aplicada nos sensores, projeto e desenvolvimento de um amplificador de carga de modo a atenuar e filtrar o sinal proveniente dos piezos, obtenção e identificação dos dados por programação no Arduino, e instrumentação virtual para análise matemática dos dados e criação de uma interface para o usuário. As medições de tempo de voo foram validadas por meio de análise de vídeo, utilizando a câmera filmadora GoPro Hero 3, tendo como resultados um erro percentual de 1,916% e coeficiente de correlação de Pearson de 0,998, garantindo cálculo dos valores de altura e potência confiáveis.

Palavras-chave: Instrumentação. Plataforma de Salto Vertical. Piezoelétricos. Esportes.

ABSTRACT

PEIXOTO SANTOS, Caroline. **Development of a platform for vertical jump evaluation and analysis based on piezoelectric sensors**. 2017. 69 p. Completion of Coursework (Bachelor's Degree in Electronic Engineering) - Federal Technological University of Parana. Ponta Grossa, 2017.

The importance of measuring data from the physical and physiological condition of an athlete is something that has been gaining prominence. The data acquired provides a basis for decision making and training strategy, as well as temporal evaluations for performance improvement and injury prevention. The vertical jump is a movement that carries essential information for physical and physiological assessment of athletes in a variety of sports, such as basketball, volleyball, swimming, among others. Some of the variables that can be analyzed due to a vertical jump test are flight time, height and power. Thus, this work aims to develop a vertical jump platform using piezoelectric ceramic sensors. The development of the equipment was carried out with the study of 35 mm piezoelectric ceramic sensors to measure the voltage as a function of the force applied to the platform surface, followed by signal conditioning and processing, the use of microcontrollers for data processing and identification, and instrumentation to perform the mathematical calculations to obtain the variables. The measurements began with the characterization of the piezoelectric sensors in order to verify their correlation with the applied force in the sensors, design and development of a load amplifier in order to attenuate and filter the signal from the sensors, obtaining and identifying the data by programming in the Arduino, and virtual instrumentation for mathematical analysis of the data and creation of an interface for the user. The flight time measurements were validated by video analysis using the GoPro Hero 3 camcorder, resulting in a 1.916% percent error and a Pearson correlation coefficient of 0.998, ensuring calculation of reliable height and power values.

Keywords: Instrumentation. Vertical Jump Platform. Piezoelectrics. Sports.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Saltos em esportes, sendo (a) defesa de um goleiro de futebol; (b) corte no voleibol; (c) bloqueio e arremesso no basquetebol.	15
Figura 2 – Protocolo de salto Squat Jump, sendo (a) início do salto na posição semiflexionada; (b) fase concêntrica (velocidade positiva) e saída; (c) impulsão e altura máxima; (d) aterrissagem; (e) absorção do impacto e relaxamento; (f) término do teste.	18
Figura 3 – Protocolo de salto Countermovement Jump, sendo (a) início com pés paralelos, mãos na cintura e tronco ereto; (b) agachamento com 90° de ângulo interno do joelho; (c) impulsão vertical; (d) fase de voo; (e) aterrissagem; (f) absorção do impacto e relaxamento dos músculos; (g) término do teste.	19
Figura 4 – Etapas de um salto vertical, sendo (a) início do teste; (b) FRS é igual à força peso; (c) velocidade positiva; (d) máxima velocidade de subida; (e) instante de impulsão; (f) altura máxima do salto (velocidade zero); (g) momento da aterrissagem.....	19
Figura 5 – Teste Jump and Reach (Pule e Alcance).	20
Figura 6 – Etapas de desenvolvimento do projeto.	22
Figura 7 – Fluxograma de funcionamento da plataforma de salto vertical.	24
Figura 8 – Representação de material piezoelétrico e seus dipolos (a) em repouso; (b) com aplicação de força mecânica ou tensão.....	25
Figura 9 - Modelo de piezoelétrico utilizado com suas etapas de operação, sendo (a) o modelo do piezo; (b) compressão em função da força aplicada; (c) descompressão após remoção da força.....	26
Figura 10 – Topologia básica de um amplificador de carga.	27
Figura 11 – Topologia de um amplificador de carga com filtro passa banda.	28
Figura 12 – Arduino Uno.	29
Figura 13 – Fluxograma de desenvolvimento do protótipo.....	32
Figura 14 – Plataforma construída.	33
Figura 15 – Fixação dos sensores.	33
Figura 16 – Método utilizado para caracterização dos valores de tensão elétrica como resposta às forças aplicadas nos sensores.....	34
Figura 17 – Amplificador de carga projetado.....	36
Figura 18 – Layout da placa dos amplificadores de carga.	37
Figura 19 – Placa de circuito impresso para os amplificadores de carga (a), inserido em uma caixa de proteção (b).	38
Figura 20 – Fluxograma da lógica de programação desenvolvida no Arduino Uno. .	38
Figura 21 – VI desenvolvida no software LabVIEW™, sendo (a) parâmetros iniciais do programa; (b) inicialização da serial; (c) rotina de captura dos dados; (d) extração dos parâmetros de desempenho do salto (tempo de voo, altura e potência); (e) rotinas finais e de salvamento dos dados.	39
Figura 22 – Diagrama de blocos contendo a etapa com os parâmetros iniciais do programa.....	40
Figura 23 – Diagrama de blocos contendo a etapa de inicialização da serial.	40

Figura 24 – Diagrama de blocos contendo a etapa de captura de dados.	41
Figura 25 – Subrotina de conversão dos dados da serial para valores numéricos, com a separação de cada canal.	42
Figura 26 – Diagrama de blocos contendo a etapa de extração dos parâmetros de desempenho do salto.	42
Figura 27 – Subrotina de extração das características do salto e das variáveis fisiológicas.....	43
Figura 28 – Diagrama de blocos contendo a etapa para rotinas finais e salvamento dos dados.....	44
Figura 29 – Subrotina de salvamento dos dados obtidos com a realização do teste.....	45
Figura 30 – Interface do usuário.....	46
Figura 31 – Linha de tendência e Coeficiente de Determinação (R^2).....	48
Figura 32 – Exemplo de um salto vertical realizado na plataforma.	49
Figura 33 – Curva do salto vertical, dada pela média da resposta dos sensores piezoelétricos, sendo (a) entrada na plataforma; (b) preparação para o salto; (c) tempo de voo; (d) recomposição do atleta; (e) saída da plataforma.	50
Figura 34 – Curva do salto vertical, dada pelas respostas individuais de cada um dos sensores piezoelétricos.	51
Figura 35 – Comparação entre as curvas de salto vertical obtidas pela plataforma desenvolvida e por um equipamento comercial.	52
Figura 36 – Histograma para verificação da distribuição normal com os valores dos erros obtidos.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios de tensão e desvio padrão das amostras.	47
Tabela 2 – Resultados e análise de dados dos tempos de voo.	53
Tabela 3 – Análise estatística do tempo de voo.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

μs	Microsegundo
C	Coulomb
cm	Centímetro
F	Farad
g	Aceleração da gravidade
Hz	Hertz
kB	Quilo byte
kg	Quilograma
k Ω	Quilo-ohm
m	Metro
m/s ²	Metros por segundo ao quadrado
m ²	Metro quadrado
MHz	Mega Hertz
mm	Milímetro
ms	Milissegundo
M Ω	Mega-ohm
N.m	Newton-metro
s	Segundo
V	Volts
W	Watts

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
FRS	Força de Reação do Solo
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
qps	Quadros por segundo
SV	Salto Vertical
TFT	<i>Thin Film Transistor</i>
UTFPR-PG	Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ponta Grossa

LISTA DE ACRÔNIMOS

CIEBE	Centro de Estudos em Instrumentação nas Engenharias Biomédica e Esportiva
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
JFET	<i>Junction gate Field-Effect Transistor</i>
LabVIEW™	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2 OBJETIVO GERAL	21
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2 METODOLOGIA	22
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1 DISPOSITIVOS PIEZOELÉTRICOS.....	24
3.2 AMPLIFICADOR DE CARGA	27
3.3 MICROCONTROLADOR	28
3.3.1 Arduino Uno	29
3.4 INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL	30
3.5 AQUISIÇÃO DAS VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS.....	30
4 DESENVOLVIMENTO	32
4.1 PLATAFORMA COM SENSORES PIEZOELÉTRICOS.....	32
4.1.1 Fixação dos Sensores na Plataforma	33
4.1.2 Protocolo de Caracterização dos Sensores Piezoelétricos.....	34
4.2 DIMENSIONAMENTO DOS AMPLIFICADORES DE CARGA	35
4.3 PROGRAMAÇÃO NO ARDUINO UNO.....	38
4.4 IMPLEMENTAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL	39
4.4.1 Parâmetros iniciais do programa	39
4.4.2 Inicialização da Comunicação Serial	40
4.4.3 Rotina de captura de dados	40
4.4.4 Processamento e extração das variáveis	42
4.4.5 Rotinas finais e salvamento dos dados.....	43
4.4.6 Interface do Usuário.....	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA.....	47
5.2 INTERFACE DO USUÁRIO	49
5.3 MEDIÇÃO E VALIDAÇÃO DO TEMPO DE VOO	52
5.3.1 Análise estatística do tempo de voo	53
5.4 RESULTADOS ACADÊMICOS.....	55
5.4.1 Publicações em Congressos.....	55
5.4.2 Atuação Acadêmica	56
5.4.3 Trabalhos Futuros.....	56
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A	65
APÊNDICE B	67

1 INTRODUÇÃO

Toda atividade física e esportiva tem procedimentos a serem executados que conduzem um atleta a um nível de maior ou menor desempenho. Como exemplo, pode-se citar a forma como jogadores de futebol correm e se deslocam durante uma partida de futebol. Se não houver orientação e treinamento, um jogador pode correr excessivamente e desnecessariamente nos primeiros minutos, resultando em uma queda muito grande de rendimento ainda no primeiro tempo. Se o aquecimento e alongamento não for corretamente realizado, a possibilidade de uma lesão nos primeiros lances mais rápidos é grande (CARVALHO; SCAGLIA; COSTA, 2013). De forma semelhante, um judoca deve aprender a estudar seu adversário para atacar e aprender a cair corretamente, e assim reduzir muito as possibilidades de se lesionar (ARAÚJO, 2005).

Assim é para toda modalidade esportiva, onde o entendimento e orientação de como executar uma determinada modalidade é essencial para que o atleta consiga melhorar o seu desempenho com treinamentos corretos. Neste cenário, o uso de equipamentos tecnológicos auxilia atletas e treinadores no acompanhamento e monitoramento dos treinamentos esportivos (VIEIRA; GONÇALVES; STEVAN JR., 2015).

De modo a adquirir os resultados desejados, a aplicação de tecnologia tem sido uma técnica confiável de se avaliar o desempenho de atletas de alto rendimento no âmbito esportivo competitivo (SILVA, 2007). Esta tecnologia pode vir atrelada ao atleta, aos acessórios/equipamentos relativos à modalidade esportiva, ou ao ambiente em si (GHORAYEB, 2013).

Vários exemplos atuais do uso de tecnologia no esporte, tanto com objetivo de monitoramento, quanto do apoio ao treinamento ou competições, podem ser citados (OKAZAKI et al., 2012). Entre eles, destaca-se: uso de sensores inerciais e biométricos para acompanhamento do deslocamento dos jogadores de futebol; uso de equipamentos para análise de vibração em redes de voleibol; uso de sensores de largada e chegada em piscinas; uso de equipamentos de controle de cadência e potência aeróbica despendida no ciclismo, entre outros (MCGINNIS, 2015).

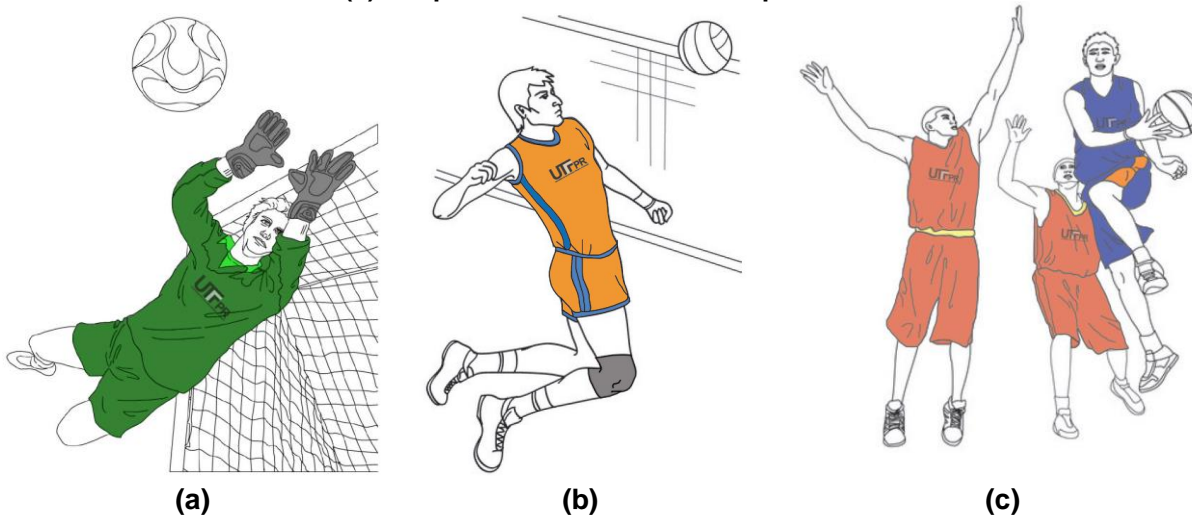
Para se realizar avaliações de desempenho e condicionamento físico, avanços nos estudos fisiológicos e antropométricos são necessários. Com informações mais específicas e detalhadas, os treinadores são capazes de buscar

diferentes estratégias de treinamento que permitam que seus atletas alcancem melhores rendimentos (SOLFA; FERREIRA, 2014).

Por conta disso, o desenvolvimento de tecnologias de forma a contribuir e facilitar a aquisição de dados fisiológicos importantes para realização de avaliações físicas e de desempenho tem evoluído junto com os esportes (OLIVEIRA et al, 2010).

Dentro de modalidades esportivas como o futebol, o basquetebol e o voleibol, além de avaliações de desempenho de corrida, deve-se haver protocolos de treinamentos específicos que permitam exercícios como saltos a serem avaliados com maior cuidado (COTTA et al., 2009). No caso do futebol, para melhorar o desempenho para cabecear a bola ou do goleiro para a defender (Figura 1 (a)); no voleibol, tanto para bloquear quanto para sacar ou atacar/cortar a bola (Figura 1 (b)); e no basquete, para os arremessos e bloqueios (Figura 1 (c)).

Figura 1 – Saltos em esportes, sendo (a) defesa de um goleiro de futebol; (b) corte no voleibol; (c) bloqueio e arremesso no basquetebol.



Fonte: Autoria própria.

No entanto, a maioria dos treinadores esportivos ainda utiliza métodos simples de coleta de dados, como por exemplo, o uso de um cronômetro para medição de tempo (fora do solo ou para alcançar um alvo), régua e fitas métricas durante testes de impulsão vertical para análise da altura de um salto (ARAUJO et al., 2013). Alternativamente, tem-se usado câmeras para a avaliação do movimento através de imagens e, em alguns casos, também para mensurar valores de tempo (FERREIRA; CARVALHO; SZMUCHROWSKI, 2008).

Isso se deve à simplicidade dos métodos manuais simplificados, ou por não haver dispositivos específicos disponíveis para aquisição, ou quando há, muitas vezes estes equipamentos tecnológicos esportivos possuem um custo de aquisição elevado, geralmente por serem importados ou por possuírem poucas empresas fornecedoras no país (FERREIRA; CARVALHO; SZMUCHROWSKI, 2008).

Um dos motivos para equipamentos tecnológicos apresentarem um alto valor de aquisição se deve ao fato de ser aplicado um estudo de instrumentação de forma a obter as variáveis necessárias para avaliação de cada modalidade esportiva. Diferentes tipos de dispositivos utilizam sensores distintos e a escolha dos mesmos é determinada pelos requisitos da aplicação, por suas características físicas e elétricas, por seu comportamento e também pelos custos estipulados de projeto.

Dessa forma, pode-se encontrar equipamentos para as mais variadas aplicações esportivas, como por exemplo o uso de sensores inerciais para avaliar a correta movimentação de uma tacada de golfe ou de beisebol; sensores de fim de curso para detectar a presença das bolas nos alvos do golfe, basquete, etc.; células de carga capacitivas para avaliação de pressão em tapetes e plataformas de força; sensores extensômetros (*strain gauges*) para blocos de partida do atletismo; entre outros (MENDES et al., 2016).

Nesse contexto de desenvolvimento de tecnologia para aplicação, monitoramento e evolução do esporte, este trabalho propõe a elaboração de uma plataforma de salto vertical utilizando sensores que permitam avaliar a pressão de forma a obter respostas dinâmicas e mensurar o tempo de voo, apresentando estas informações de forma simplificada para o atleta e/ou treinador.

Este equipamento se caracteriza por utilizar sensores de baixo custo de aquisição e ser de tecnologia nacional, viabilizando seu acesso à atletas da comunidade, a fim de que as avaliações físicas sejam realizadas de forma científica, garantindo um melhor acompanhamento do desempenho dos esportistas.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Durante a prática esportiva, os movimentos de contato com solo e de saída com um determinado tempo no ar estão presentes constantemente. Essa característica de movimentação é denominada de salto e, durante a realização do

mesmo, diversas características biomecânicas podem ser avaliadas. Para ser possível realizar essas análises se faz necessário o uso da cinética (estudo que envolve as forças aplicadas à um corpo rígido) e da cinemática (que envolve o movimento gerado pelas forças realizadas) (DAL PUPO; DETANICO; SANTOS, 2012). Com isso, análises com dados das reações das forças aplicadas em equipamentos especializados podem colaborar no desenvolvimento e avanço de estudos em áreas como prevenção e tratamento de lesões, melhoria de desempenho, equilíbrio e padrões da biomecânica do movimento humano (KERWIN, 1997).

Levando isso em consideração, o desempenho do atleta nos Saltos Verticais (SV) pode ser considerado um dos melhores parâmetros para se avaliar níveis de potência muscular dos membros inferiores. Isso se deve ao fato do salto ser uma habilidade motora fundamental para a realização de atividades esportivas em diversas modalidades que exijam ações explosivas (DAL PUPO; DETANICO; SANTOS, 2012). Dessa forma, é possível observar essa aptidão como atividade motora primária em esportes como basquetebol, voleibol, handebol, futebol, ginástica artística e rítmica, entre outras. No entanto, o salto pode ainda ser utilizado como um movimento secundário, como pode ser visto na natação e no atletismo (PEIXOTO SANTOS et al., 2016).

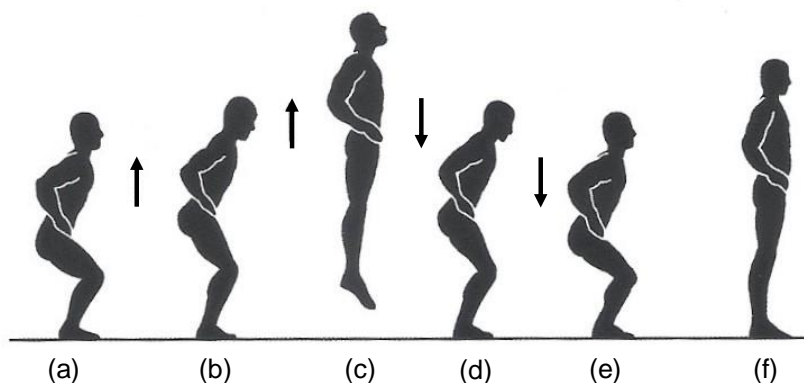
Para se avaliar o esforço de um exercício de SV, é necessário quantificar algumas variáveis fisiológicas, sendo duas variáveis principais: a potência anaeróbia e o tempo de voo. A potência anaeróbia é dada pela quantidade de trabalho realizado pelo sistema muscular, neste caso dos membros inferiores, na ausência de oxigênio (DA SILVA et al., 2007). O tempo de voo é baseado na contabilização do desprendimento do corpo do solo (ou da superfície de contato) até o momento da queda do corpo no mesmo ponto de decolagem (ARAUJO et al., 2013).

Para garantir a correta obtenção das variáveis de desempenho, é imprescindível a adequada movimentação do corpo durante o teste, sendo esta característica determinada e monitorada pelo treinador. Para isso, existem alguns protocolos específicos para realização de salto, sendo dois deles os mais utilizados em testes de salto vertical (VAN HOOREN; ZOLOTARJOVA, 2017).

O primeiro protocolo é denominado *Squat Jump* e é apresentado na Figura 2. Segundo Barbanti (2010), este teste se caracteriza por estimar a capacidade dos membros inferiores para expressar força explosiva. Para a correta realização do mesmo, deve-se iniciar o teste em uma posição semiflexionada (ângulo interno do

joelho de 90°), Figura 2 (a); iniciar o movimento de impulsão (velocidade positiva), Figura 2 (b); sair da plataforma, alcançando a altura máxima e velocidade zero, Figura 2 (c); retornar a plataforma, Figura 2 (d); absorver o impacto e relaxar os músculos das pernas, Figura 2 (e); e terminar o teste retornando a posição vertical, Figura 2 (f).

Figura 2 – Protocolo de salto *Squat Jump*, sendo (a) início do salto na posição semiflexionada; (b) fase concêntrica (velocidade positiva) e saída; (c) impulsão e altura máxima; (d) aterrissagem; (e) absorção do impacto e relaxamento; (f) término do teste.

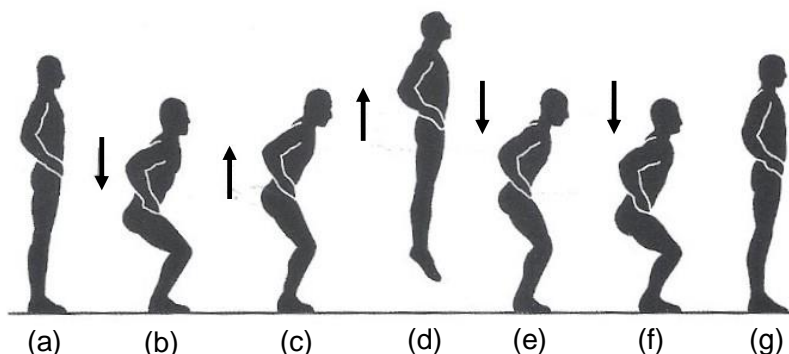


Fonte: Adaptado de Barbanti (2010).

O segundo protocolo utilizado é denominado *Countermovement Jump* (Figura 3), sendo este utilizado para medir a potência explosiva dos membros inferiores de um atleta, investigando a energia elástica armazenada nos tecidos musculares. O salto inicia-se com pés paralelos na linha do quadril, mãos na cintura e com o tronco ereto, Figura 3 (a); em seguida há um agachamento com aproximadamente 90° de ângulo interno do joelho, Figura 3 (b); faz-se a extensão do joelho de modo a impulsionar o corpo para o alto verticalmente, Figura 3 (c); fase de voo, alcançando altura máxima, Figura 3 (d); aterrissagem, Figura 3 (e); absorção do impacto e relaxamento dos músculos, Figura 2 (f); e término do teste, Figura 2 (g) (BARBANTI, 2010).

Além de mensurar as grandezas citadas, de forma a tornar esses dados acessíveis ao avaliador físico, o desempenho de um salto vertical pode ser analisado por meio da visualização gráfica de suas etapas. Essas etapas presentes no gráfico obtido não são as mesmas definidas nos protocolos de teste, porém apresentam características importantes para a avaliação do desempenho. Essa análise pode ser feita, pois, com a correta realização do salto, as características principais podem ser facilmente observadas por meio de uma curva da força de reação do solo (FRS) em relação ao tempo, por exemplo, ou de alguma outra variável correspondente.

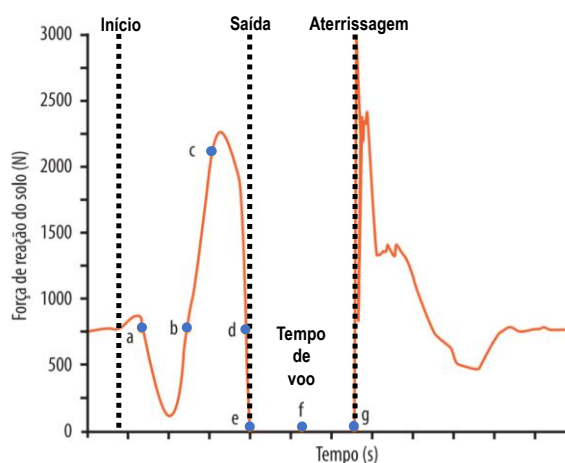
Figura 3 – Protocolo de salto *Countermovement Jump*, sendo (a) início com pés paralelos, mãos na cintura e tronco ereto; (b) agachamento com 90° de ângulo interno do joelho; (c) impulsão vertical; (d) fase de voo; (e) aterrissagem; (f) absorção do impacto e relaxamento dos músculos; (g) término do teste.



Fonte: Adaptado de Barbanti (2010).

Sendo uma das formas de se avaliar o salto vertical por meio de sua visualização gráfica de suas etapas (KERWIN, 1997), a Figura 4 apresenta as etapas do salto vertical utilizando um equipamento que com células de carga para aquisição dos sinais. Dessa forma, o gráfico pode ser avaliado pelo treinador para verificação de suas etapas, que são: (a) entrada do atleta no equipamento e início do teste; (b) ponto de equilíbrio do equipamento onde a força de reação do solo é igual a força peso do atleta; (c) início da impulsão (fase concêntrica), com velocidade positiva; (d) ponto de máxima velocidade de subida; (e) instante de impulsão com saída do equipamento; (f) altura máxima do salto com velocidade zero; (g) momento da aterrissagem (DAL PUPO; DETANICO; SANTOS, 2012).

Figura 4 – Etapas de um salto vertical, sendo (a) início do teste; (b) FRS é igual à força peso; (c) velocidade positiva; (d) máxima velocidade de subida; (e) instante de impulsão; (f) altura máxima do salto (velocidade zero); (g) momento da aterrissagem.

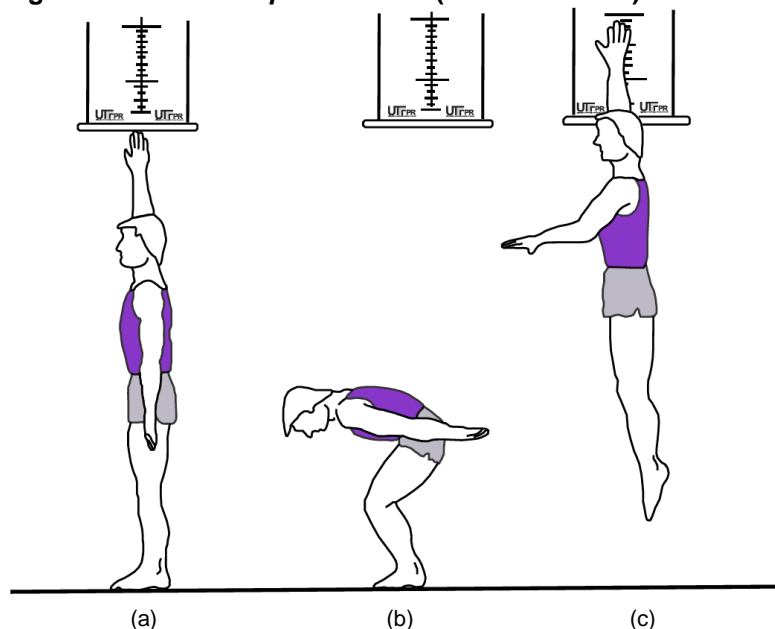


Fonte: Adaptado de Dal Pupo, Detanico e Santos (2012).

Como pode ser observado, as etapas de um SV podem ser identificadas como: início, saída, tempo de voo e aterrissagem. Estas etapas podem ser analisadas em função da força de reação do solo ou da superfície de contato. Essa caracterização possui uma alta importância para a etapa em que uma manipulação dos dados obtidos se faz necessária, a fim de se obter os valores de força, potência, tempo de voo e altura. De forma a obter as grandezas mencionadas, necessita-se mensurar o tempo de voo do SV ou a força realizada pelo atleta para então utilizar equações da física clássica para adquirir os demais valores (KERWIN, 1997).

Para mensurar dados como altura, alguns testes utilizam a diferença vertical entre duas marcas, como o teste de pular e alcançar, como apresentado na Figura 5. Esse tipo de teste se caracteriza por medir a altura máxima do atleta em repouso, Figura 5 (a), abaixar e pegar impulsão para realizar o salto, Figura 5 (b) e marcar com a mão a altura máxima alcançada durante o salto, Figura 5 (c). No entanto, esse tipo de teste não é totalmente confiável, uma vez que o atleta deve saltar muito próximo a parede, podendo dificultar o seu desempenho (KLAVORA, 2000).

Figura 5 – Teste *Jump and Reach* (Pule e Alcance).



Fonte: Adaptado de Weineck (2003).

Para se obter dados mais confiáveis, outros métodos podem ser utilizados como com o uso de sensores ultrassônicos e câmeras filmadoras. No entanto, existem equipamentos desenvolvidos para obter resultados por meio de cálculos utilizando a velocidade vertical de decolagem e/ou força de impulsão, sendo estes denominados

plataformas de força (GRANELL e CERVERA 2003). Estes equipamentos são bastante utilizados para análises biomecânicas, porém, são pouco acessíveis, devido principalmente ao alto custo de aquisição, superior a seis mil reais (SAYERS; HARACKIEWICZ; HARMAN, 1999) (CARDIOMED, 2017).

Por conta disso, nos últimos anos têm se utilizado o tempo de voo para calcular a altura do salto. Ele pode ser medido por meio de dispositivos como sistemas fotogramétricos, raios infravermelhos ligados a um cronômetro e tapetes de contato. Com a utilização dessa variável, estes dispositivos fornecem muitas vantagens sobre os testes de saltar e alcançar, pois, além de serem mais precisos, geralmente são mais eficientes (FERREIRA; CARVALHO; SZMUCHROWSKI, 2008).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é de desenvolver uma plataforma de salto vertical, utilizando sensores piezoelétricos cerâmicos de baixo custo e apresentar os dados para análise em uma interface de fácil compreensão.

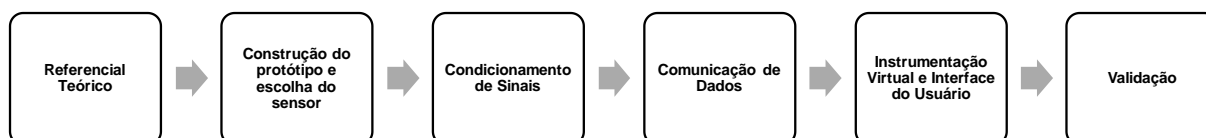
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão da bibliografia de modo a ter uma maior compreensão do salto vertical e do equipamento para realização do teste;
- Estudar, instalar, medir e analisar a resposta dos sensores piezoelétricos para uso na plataforma;
- Mensurar e compreender os dados como tempo de voo, altura e potência dos membros inferiores;
- Desenvolver e aplicar um circuito de aquisição e tratamento de sinais;
- Programar um sistema de comunicação e apresentação dos dados para o usuário;
- Testar e validar os dados adquiridos com o equipamento desenvolvido.

2 METODOLOGIA

O desenvolvimento da plataforma de salto vertical foi dividido em algumas partes, visando facilitar a evolução do projeto de forma eficiente e prevenindo eventuais problemas. Todas essas etapas podem ser vistas no fluxograma apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Etapas de desenvolvimento do projeto.



Fonte: Autoria própria.

Primeiramente, foi realizado um levantamento bibliográfico do assunto, tanto na área de esportes (voltado para a importância do salto vertical), como na área da eletrônica, para que se realizasse um estudo da teoria envolvida no sensor escolhido, identificando os principais aspectos na modelagem numérica, da viabilidade de construção e dos materiais necessários.

Dentre os parâmetros estudados, notou-se a facilidade de acesso aos sensores piezoelétricos e o seu baixo custo de aquisição, justificando sua escolha. No entanto, foi possível notar a ausência de trabalhos científicos que relatam a correlação entre as variáveis de saída dos piezoelétricos (tensão elétrica) com a força aplicada sobre as suas superfícies. Por esse motivo, a primeira etapa do projeto foi focada em levantar uma correlação entre essas duas variáveis (força e tensão elétrica), de forma a analisar corretamente os dados provenientes do sensor e, a fim de confirmar suas características e sua correlação linear com a força.

Como os sensores fornecem valores de saída em tensão elétrica com picos de amplitude elevada, foi necessário fazer um estudo para desenvolvimento de um amplificador de carga, de forma a atenuar e filtrar o sinal para melhor adequação dos valores para se realizar a comunicação dos sinais coletados com o microcontrolador. Para realizar essa etapa, foi necessário estudar os dados provenientes dos sensores juntamente com o movimento estudado, de forma a identificar a faixa de frequência adequada para se trabalhar.

A partir disso, passou-se para a fase de programação do microcontrolador de modo a receber, separar e enviar os sinais, do tipo analógico, provenientes dos sensores. Essa programação foi baseada em bibliotecas já existentes da plataforma Arduino, que facilitam o tratamento dos sinais provenientes da entrada e fornecem a facilidade de desenvolver uma programação simples e eficiente.

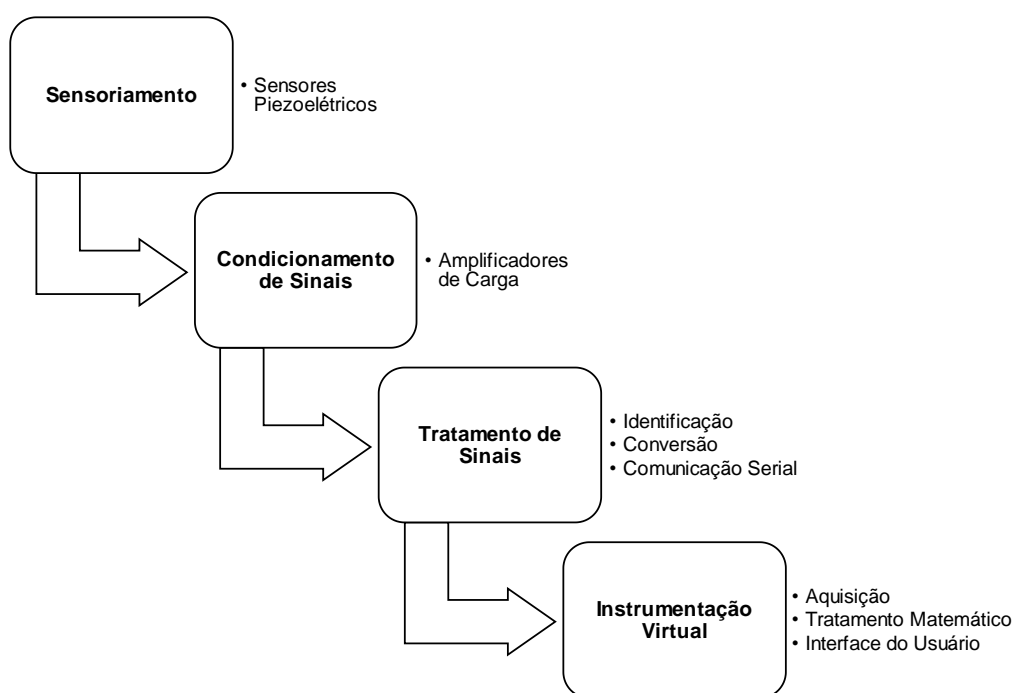
Como o dispositivo tem objetivo de uso prático e uma interface de fácil compreensão, os dados foram direcionados para a plataforma de instrumentação virtual LabVIEW™, a fim de realizar o tratamento das informações e desenvolvimento da área de interação do usuário. Dessa forma, permite-se também os testes em laboratório do equipamento para verificar a confiabilidade dos resultados em relação ao tempo de voo.

O processo de validação do equipamento foi realizado em função de coletas de dados durante a realização de saltos verticais. Os dados provenientes da plataforma foram salvos e os valores de tempo comparados com os resultados obtidos por análise de vídeo. Com isso, o valor de tempo de voo mensurado pode ser validado com uma análise estatística.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção é responsável por abordar os temas que fundamentam este trabalho e os tópicos que auxiliaram a construção do equipamento e a validação dos resultados. De maneira geral, a Figura 7 ilustra as etapas de funcionamento propostas neste trabalho, desde a coleta até a transmissão dos dados digitais ao computador, para visualização das informações já tratadas.

Figura 7 – Fluxograma de funcionamento da plataforma de salto vertical.



Fonte: Autoria própria.

3.1 DISPOSITIVOS PIEZOELÉTRICOS

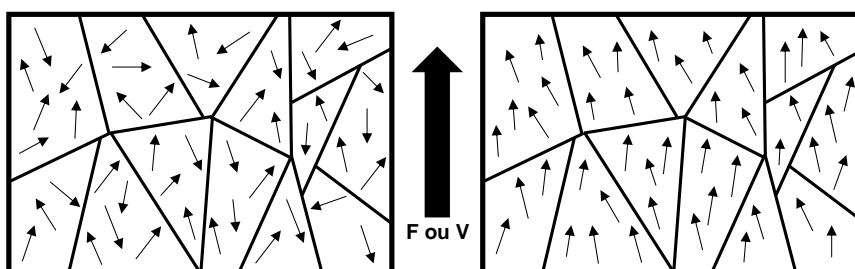
Os sensores piezoelétricos consistem de cristais cerâmicos onde placas de metal são conectadas de forma que, quando uma força é aplicada sobre elas, suas propriedades são alteradas (JORDAN; OUNAIES, 2001). Partindo desse conceito, esse tipo de sensor se torna viável para aplicações em que análises dinâmicas são necessárias, como na medição de variáveis relacionadas à física do movimento, como força, potência e velocidade (MURATA MANUFACTURING CO, 2015).

Outros sensores também são utilizados para aplicações onde as grandezas citadas precisam ser mensuradas, como as células de carga e sensores extensômetros (*strain gauges*). No entanto, por mais que as células de carga possuam uma alta precisão e serem muito versáteis, sendo utilizadas para realizar medição de força de forma indireta, o custo de aquisição desses sensores é elevado (AGILENT TECHNOLOGIES, 2012). Os sensores extensômetros são capazes de obter informações referentes a deformações sofridas pelo sensor de forma linear, com saída dada por valores muito pequenos de resistência. Por esse motivo, as análises e processamento dos sinais provenientes dos extensômetros exigem um maior número de componentes, elevando o seu custo (CAMARGO, 2008).

Por possuir respostas dinâmicas e apresentarem um baixo custo de aquisição, os sensores piezoelétricos foram escolhidos para a etapa de sensoriamento do equipamento. Esses dispositivos foram descobertos por Jacques e Pierre Curie, em 1880, e são também conhecidos pela sua abreviação “piezos”, que, no grego, significa pressão (WEBSTER, 1999).

O funcionamento desses sensores é baseado no conceito de que, quando uma pressão é aplicada a um material polarizado, uma deformação mecânica ocorre e, por sua vez, uma movimentação nas cargas elétricas do material é gerada. Consequentemente, uma diferença de potencial elétrico pode ser notada nos terminais de saída desse componente (SAFARI; BANDYOPADHYAY; KHOLKINE, 1999; MURATA MANUFACTURING CO, 2015). Esse fenômeno é apresentado na Figura 8, onde, no item (a), os dipolos do material estão em repouso (desordenados) e, em (b), os dipolos ordenados após a aplicação de uma força mecânica ou uma tensão elétrica.

Figura 8 – Representação de material piezoelétrico e seus dipolos (a) em repouso; (b) com aplicação de força mecânica ou tensão.

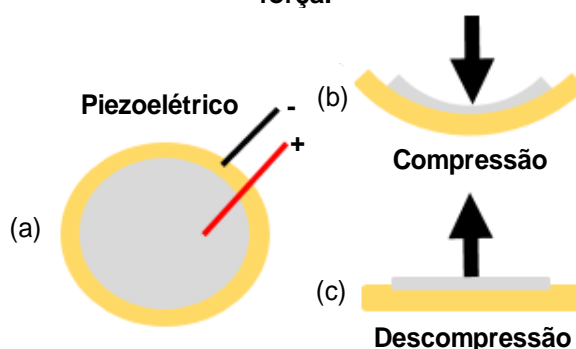


Fonte: Adaptado de Santos et al. (2016).

Cada célula do cristal presente nos piezos possui um dipolo elétrico. Essas células são orientadas tais quais os dipolos elétricos são alinhados. Esse excesso de carga presente na superfície atrai cargas livres da atmosfera envolvente, resultando em um cristal eletricamente neutro (SANTOS et al., 2016). Dessa forma, quando uma força é aplicada ao cristal piezoelétrico, uma deformação acontece, quebrando a orientação dos dipolos elétricos e criando uma situação na qual a carga não é completamente cancelada. Isso resulta em um excesso temporário de carga na superfície, o qual é manifestado como uma tensão elétrica (GAUTSCHI, 2002).

Dessa forma, o modelo do sensor piezoelétrico de baixo custo utilizado pode ser observado na Figura 9. Pode-se notar que o mesmo é formado por um disco metálico com um elemento piezoelétrico cerâmico colado a si, apresentado na Figura 9 (a). Assim, quando uma força externa causa uma deformação no material cerâmico (Figura 9 (b)), uma carga em função da força resulta na sua superfície. Após a aplicação da força, o piezo sofre então uma descompressão (Figura 9 (c)), retornando a seu estado inicial.

Figura 9 - Modelo de piezoelétrico utilizado com suas etapas de operação, sendo (a) o modelo do piezo; (b) compressão em função da força aplicada; (c) descompressão após remoção da força.



Fonte: Santos et al. (2016).

Na região de operação do sensor, uma grande força irá resultar em uma maior quantidade de carga na superfície. Essa carga resulta em uma tensão, descrita na equação (1).

$$V = \frac{Q_f}{C} \quad (1)$$

Onde:

V é tensão elétrica resultante em volts (V);

Q_f é carga resultante de uma força F em coulomb (C); e

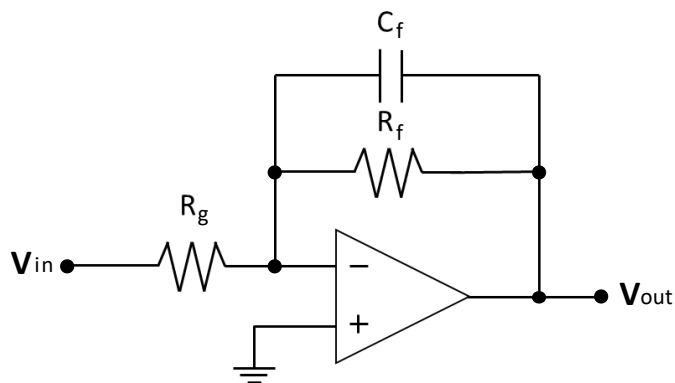
C é capacitância do dispositivo em farad (F).

Devido a esse comportamento, os materiais piezoelétricos atuam como transdutores que transformam a força ou estresse mecânico em cargas elétricas mensuradas em valores de tensão elétrica. Alternativamente, se for aplicada uma tensão nas placas do sistema descrito anteriormente, a resultante do campo elétrico causaria uma deformação do material, pois realinharia os dipolos elétricos internos (SANTOS et al., 2016).

3.2 AMPLIFICADOR DE CARGA

Um amplificador de carga consiste de um modelo variante do amplificador inversor convencional, com seu esquemático apresentado na Figura 10. No entanto, substitui-se a fonte de tensão de entrada do sinal por uma fonte de carga. Este amplificador conceitualmente não amplifica a carga, e sim produz um sinal tensão elétrica. Por esse motivo, esse modelo de amplificador pode também ser denominado de conversor de carga em tensão (HANSEN, 2014).

Figura 10 – Topologia básica de um amplificador de carga.



Fonte: Adaptado de Hansen (2014).

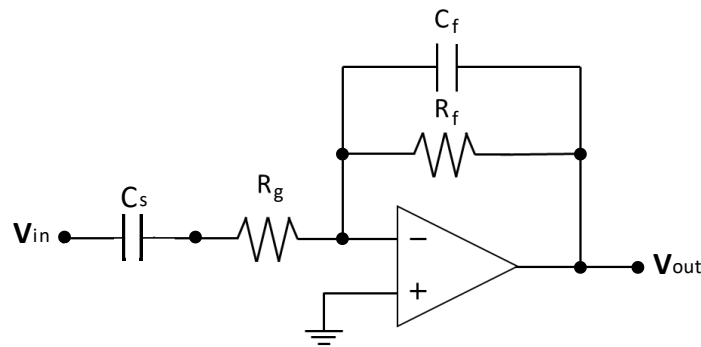
Analisando a Figura 10, percebe-se que seu funcionamento se baseia em uma carga conectada a entrada V_{in} e um dispositivo de medição conectado na saída V_{out} . A carga inserida na entrada será transferida para o capacitor C_f , de forma que se obtém uma tensão de saída proporcional a carga dividida pelo valor da capacitância. Ainda, o resistor R_g tem a função de proteger a entrada inversora do amplificador, enquanto que o resistor R_f funciona como um caminho de baixa frequência que protege o capacitor C_f para evitar a saturação. Esse circuito funciona também como

um filtro passa-baixa e apresenta a função de transferência vista na equação (2) (HANSEN, 2014).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_g - s C_f R_f R_g} \quad (2)$$

Para uma aplicação onde se necessita de um filtro passa banda, a topologia apresentada na Figura 11 pode ser adotada, com sua função de transferência vista na equação (3). Dessa forma, a frequência de corte do filtro passa alta é definida pela ação de R_g e C_s e a ação do filtro passa baixa por R_f e C_f . Assim, a frequência de corte de passa alta (f_{cPA}) é definida pela equação (4), e a frequência de corte de passa baixa (f_{cPB}) é definida pela equação (5).

Figura 11 – Topologia de um amplificador de carga com filtro passa banda.



Fonte: Adaptado de Hansen (2014).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f + s C_s R_f R_g}{s^2 C_s C_f R_f + s C_s} \quad (3)$$

$$f_{cPA} = \frac{1}{2\pi R_g C_s} \quad (4)$$

$$f_{cPB} = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (5)$$

3.3 MICROCONTROLADOR

Microcontroladores são dispositivos (chips) inteligentes que consistem em um circuito processador que contém entradas, saídas e memória. Dessa forma, a arquitetura de um microcontrolador é dada pela integração de diversos circuitos distintos, a maneira como são integrados e seu funcionamento (PEREIRA, 2006). Existem diversos tipos de microcontroladores, apresentando uma diferenciação entre

eles devido à suas características primárias como capacidade de memória, que pode variar de algumas centenas a milhares de bytes, dependendo da área de aplicação, a arquitetura, a velocidade de operação (baseada em um cristal de quartzo como *clock*) e a alimentação necessária (VIEIRA; GONÇALVES, 2015).

3.3.1 Arduino Uno

O Arduino Uno, ilustrado na Figura 12, é uma plataforma de prototipagem eletrônica rápida *open-source* baseada em *hardware* e *software* flexíveis e fáceis de usar, possuindo a vantagem de ser uma placa pequena e leve, 25 g, com dimensões de 68,6 por 53,4 mm, custo acessível e com tecnologia baseada no microcontrolador ATmega328P (ARDUINO, 2017).

Figura 12 – Arduino Uno.



Fonte: Arduino (2017).

Sua configuração traz a necessidade de uma alimentação de 7 a 12 V, operando com um valor de 5 V. Apresenta um total de 14 entradas e saídas digitais, sendo 6 com modulação PWM, que fornecem uma corrente máxima de 20 mA, 6 entradas analógicas, velocidade de *clock* de 16 MHz, uma conexão USB e um *jack* de alimentação. Além disso, possui uma memória flash de 32 kB, SRAM de 2 kB e EEPROM de 1 kB (ARDUINO, 2017).

3.4 INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

A instrumentação virtual consiste de um computador industrial ou estação de trabalho desempenhando funções dos instrumentos tradicionais para resolução de problemas. É capaz de ser aplicado nas mais diversas áreas, diminuindo o tempo de desenvolvimento de sistemas complexos agindo de forma a agrupar diversas unidades, tanto físicas quanto virtuais (FREITAS et al., 2017).

Dentre as ferramentas disponíveis, uma das mais utilizadas é o LabVIEW™ (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). Essa ferramenta é desenvolvida e disponibilizada pela *National Instruments Corporation* (NI), e consiste em uma ferramenta virtual para a criação de aplicações em engenharia permitindo coleta de dados, processamento de sinais e controle (FREITAS et al., 2017). Sua estrutura de programação é baseada em uma linguagem de programação gráfica (linguagem G) em que os programas elaborados nele apresentam duas partes principais: diagrama de blocos (onde é realizada a programação) e painel frontal (interface para o usuário). Os programas desenvolvidos nessa plataforma são denominados de VI (*Virtual Instruments*), onde ainda é possível criar uma subVI, ou seja, uma VI dentro de outra (JOHNSON; JENNINGS, 2006).

3.5 AQUISIÇÃO DAS VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS

Os dados provenientes da saída dos amplificadores de carga são transmitidos pelo Arduino e adquiridos pelo LabVIEW™ como sinais de tensão elétrica. A partir desse momento, a curva com as características do salto vertical pode ser traçada e analisada. Com esse gráfico, é possível fazer um reconhecimento das etapas do SV e identificar o momento de saída e entrada na plataforma. Assim, o tempo de voo pode ser adquirido e, com a informação da massa do usuário, é possível obter as demais variáveis.

- Altura do salto vertical

A altura do salto vertical é umas das variáveis de desempenho mais utilizadas devido a sua fácil aquisição e confiabilidade, a qual pode ser obtida a partir do valor de tempo de voo (SILVA-JUNIOR et al., 2010). Ela é dada pela da equação (6).

$$h = \frac{t^2 * g}{8} \quad (6)$$

Em que:

h é altura máxima atingida em metros (m);

t é o tempo de voo em segundos (s); e

g é aceleração da gravidade em metros por segundo ao quadrado (m/s²).

- Potência dos membros inferiores

A potência muscular é vista como uma variável importante para testes físicos e treinamentos, especialmente para esportes que envolvem velocidade e saltos (SILVA-JUNIOR et al., 2010). Para se calcular essa variável, foi usado o modelo proposto por Sayers, Harackiewicz e Harman (1999) onde o pico de potência (P) é descrito na equação (7).

$$P = (60,7 * h) + (45,3 * m) - 2055 \quad (7)$$

Em que:

P é potência em watts (W);

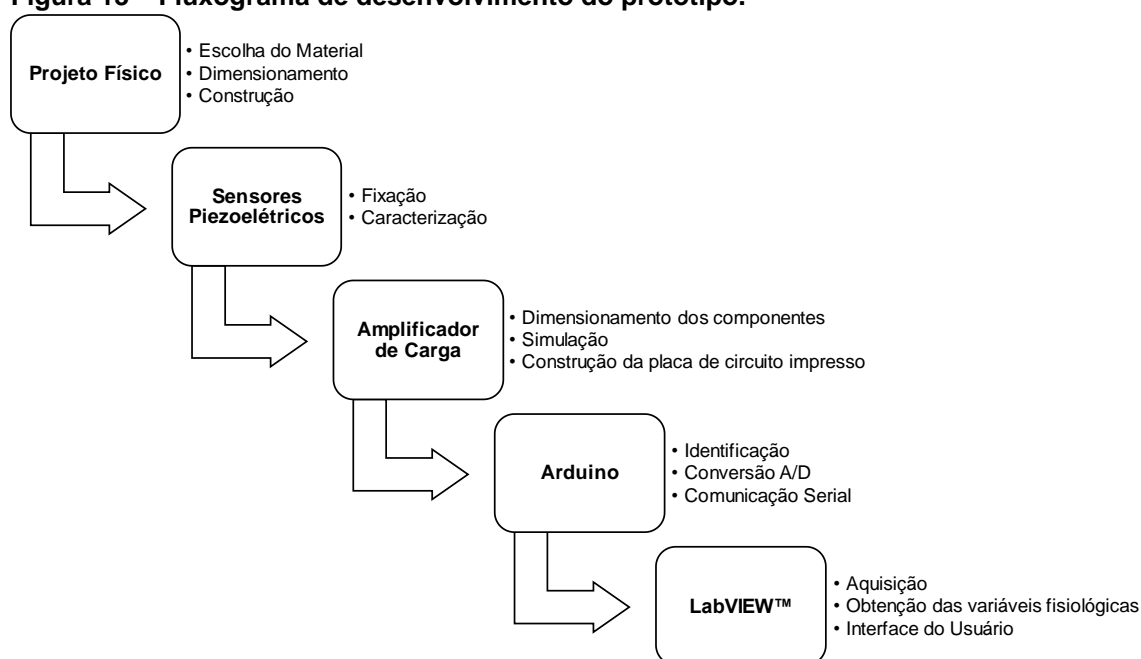
h é a altura do salto vertical em centímetros (cm); e

m é a massa corporal em quilogramas (kg).

4 DESENVOLVIMENTO

Com o estudo realizado dos componentes e seus parâmetros a serem utilizados no projeto de desenvolvimento do equipamento, pôde-se iniciar o protótipo com um objetivo final de desenvolver um circuito capaz de adquirir, transmitir e expor os dados de forma confiável. Dessa forma, o fluxograma da Figura 13 apresenta uma as etapas de construção do dispositivo.

Figura 13 – Fluxograma de desenvolvimento do protótipo.



Fonte: Autoria própria.

4.1 PLATAFORMA COM SENSORES PIEZOELÉTRICOS

A construção da plataforma foi realizada de forma a garantir um maior conforto e segurança durante a realização dos saltos. Após a execução de testes com pessoas de alturas diferentes, optou-se por construir uma plataforma com dimensões de 660 x 580 x 75 mm, conforme apresentado na Figura 14. O material selecionado para o equipamento foi o MDF de 25 mm de forma a garantir uma capacidade de peso acima de 100 kg. Com essas dimensões, e utilizando esse material, a plataforma apresenta uma carga máxima de 315 kg/m², sendo esse um valor obtido por uma tabela de carga máxima fornecida pelo fabricante.

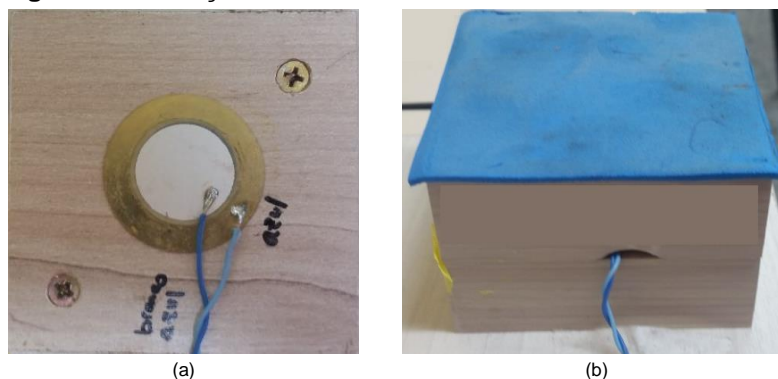
Figura 14 – Plataforma construída.

Fonte: Autoria própria.

De modo a garantir a correta distribuição das forças, a plataforma foi construída contendo quatro suportes (pés), igualmente espaçados nas bordas da mesma, com dimensões de 75 x 75 x 50 mm. Para que isso fosse possível, duas placas de MDF de 75 x 75 x 25 mm foram conectadas uma a outra. Além disso, essa confecção assegura o equilíbrio do indivíduo sobre o dispositivo e utiliza o menor número possível de sensores, reduzindo o número de amplificadores de carga a serem utilizados e, conseqüentemente, o custo total do dispositivo.

4.1.1 Fixação dos Sensores na Plataforma

Após a construção do protótipo, os sensores selecionados (piezoelétricos cerâmicos de 35 mm) foram inseridos nos suportes (pés) da plataforma de forma segura e isolada, garantindo a durabilidade dos mesmos, apresentado na Figura 15. Para isso, as superfícies dos sensores foram dispostas e coladas entre as placas de 25 mm, Figura 15 (a), de tal forma a não apresentarem contato direto com o exterior, Figura 15 (b).

Figura 15 – Fixação dos sensores.

Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Protocolo de Caracterização dos Sensores Piezoelétricos

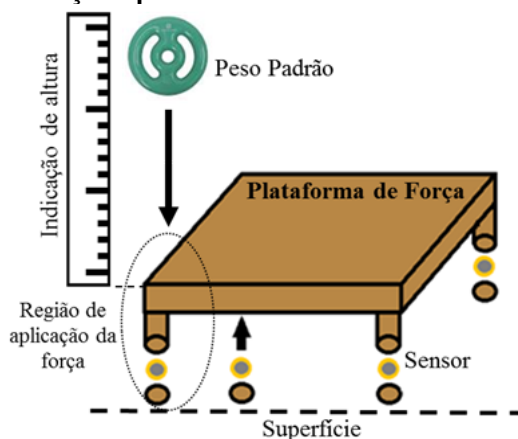
Como previamente citado, os sensores piezoelétricos possuem uma resposta em tensão elétrica de acordo com a força aplicada na superfície do sensor. No entanto, a relação entre as variáveis de entrada e saída não possuem uma caracterização apresentada pela literatura. Por esse motivo, a primeira etapa de desenvolvimento definida foi a caracterização dos elementos piezoelétricos em função da pressão aplicada sobre eles, de forma a verificar a linearidade da resposta de tensão de acordo com a força.

Inicialmente, adotou-se um peso padrão em formato de anilha de 505 ± 1 grama para atuar como aplicador de força nos sensores. Dessa forma, foi desenvolvido um protocolo para aquisição de medidas de diferentes alturas entre a parte inferior da anilha até a superfície da plataforma, a fim de que a ação da gravidade atuasse sobre o peso padrão no contato com a plataforma.

Para que os dados coletados apresentassem uma viabilidade quanto à uma análise estatística, um número de 10 coletas por altura foi estipulado. Cada coleta constituiu-se da obtenção dos valores máximos de tensão elétrica para seis diferentes alturas, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm. Para cada uma das alturas determinadas, o peso padrão é solto de forma repetitiva.

Dessa forma, o método de coleta de dados para correlação da força aplicada aos sensores e a resposta em tensão elétrica pode ser observado na Figura 16. Nela, é possível visualizar a metodologia aplicada para a coleta dos dados.

Figura 16 – Método utilizado para caracterização dos valores de tensão elétrica como resposta às forças aplicadas nos sensores.



Fonte: Santos et al. (2016).

O procedimento limitou-se a concentrar a aplicação da força resultante da ação da gravidade sobre o peso padrão em uma posição específica da plataforma de forma que apenas um sensor piezoelétrico recebesse toda a força aplicada. Isso foi realizado com o objetivo de avaliar o comportamento da resposta do sensor e não da plataforma como um todo.

Para a verificação de uma linearidade entre as variáveis analisadas (força e tensão elétrica), foi estipulado como resultado obter um coeficiente de determinação (R^2) entre as variáveis de, no mínimo, 98%. O coeficiente de determinação é definido como o grau percentual da qualidade de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado, que varia de 0 a 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo obtido consegue explicar os valores analisados (QUININO; REIS; BESSEGATO, 2011).

Todos os valores foram obtidos em laboratório e o levantamento dos gráficos, das equações e dos valores de desvio padrão foram realizados por meio a utilização do *software* Excel. Assim, a relação entre o valor de tensão obtido e a força é dada pela equação (8). Foi utilizada a equação do trabalho da força, levando em consideração que foi adotado um protocolo com diferenças de alturas. No entanto, como o valor inicial é sempre zero, pode-se assumir que o valor do trabalho é igual ao valor da energia potencial gravitacional.

$$\zeta_p = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (8)$$

Em que:

ζ_p é o trabalho da força peso em newton-metro (N.m);

m é a massa em quilograma (kg);

g é a aceleração da gravidade em metros por segundo ao quadrado (m/s^2); e

Δh é a variação da altura em metros (m).

4.2 DIMENSIONAMENTO DOS AMPLIFICADORES DE CARGA

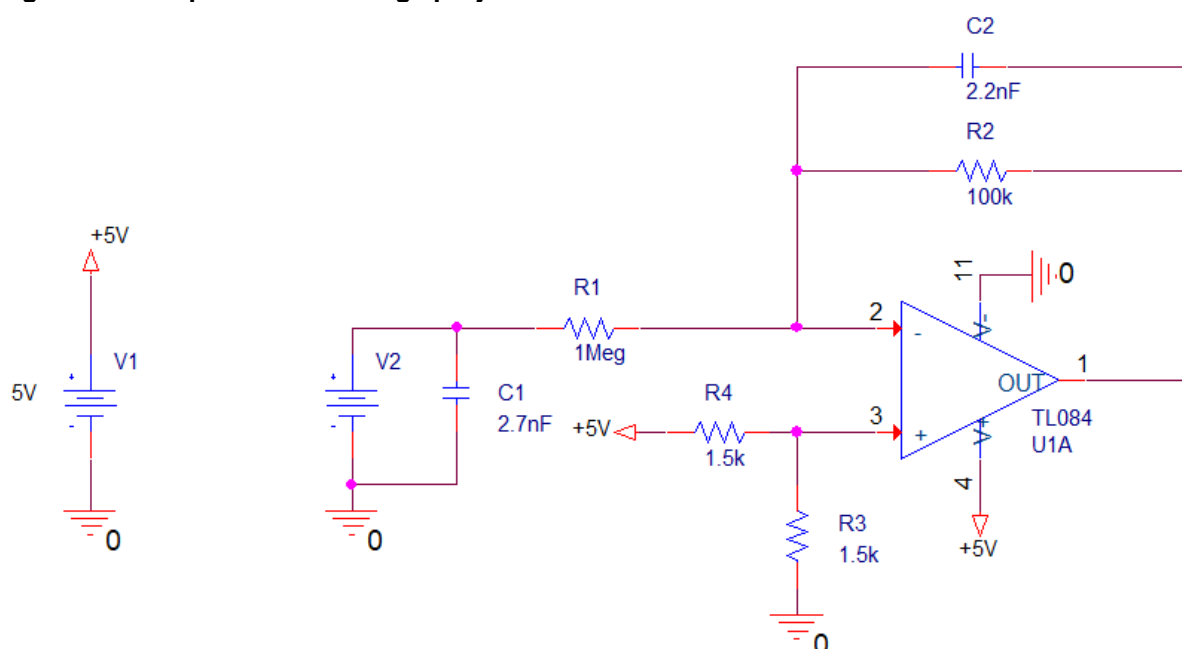
Durante os testes com os sensores piezoelétricos, foram realizados saltos de forma a identificar os valores máximos de tensão elétrica atingidos. Essa grandeza alcançou valores na ordem de 25 V, tanto positivos quanto negativos, ou seja, valores aproximados de 50 V de pico a pico. Dessa forma, para que os dados sejam

processados adequadamente, um amplificador de carga foi projetado a fim de que os valores de tensão pudessem ser analisados por um microcontrolador, com valores em um range de 0 a 5 V.

Para a análise dos movimentos durante um salto vertical, frequências menores que 60 Hz (f_{cPA}) e maiores que 750 Hz (f_{cPB}) podem ser desprezadas (KERWIN, 1997). A partir disso, e adotando valores para os resistores $R_1 = R_g$ de $1\text{ M}\Omega \pm 5\%$ e $R_2 = R_f$ de $100\text{ k}\Omega \pm 5\%$, os valores dos capacitores foram calculados, conforme equações (4) e (5).

Com os valores de capacitância calculados, foram determinados os componentes de valores comerciais a serem utilizados, sendo eles $C_1 = C_s$ de 2,7 nF e $C_2 = C_f$ de 2,2 nF. A partir disso, foram obtidos valores de frequência de corte de $f_{cPA} = 58,95\text{ Hz}$ e $f_{cPB} = 723,43\text{ Hz}$. O circuito projetado com os valores comerciais dos componentes utilizados pode ser visto na Figura 17, onde V_1 é responsável por alimentar o amplificador e V_2 por representar os terminais dos sensores piezoelétricos.

Figura 17 – Amplificador de carga projetado.



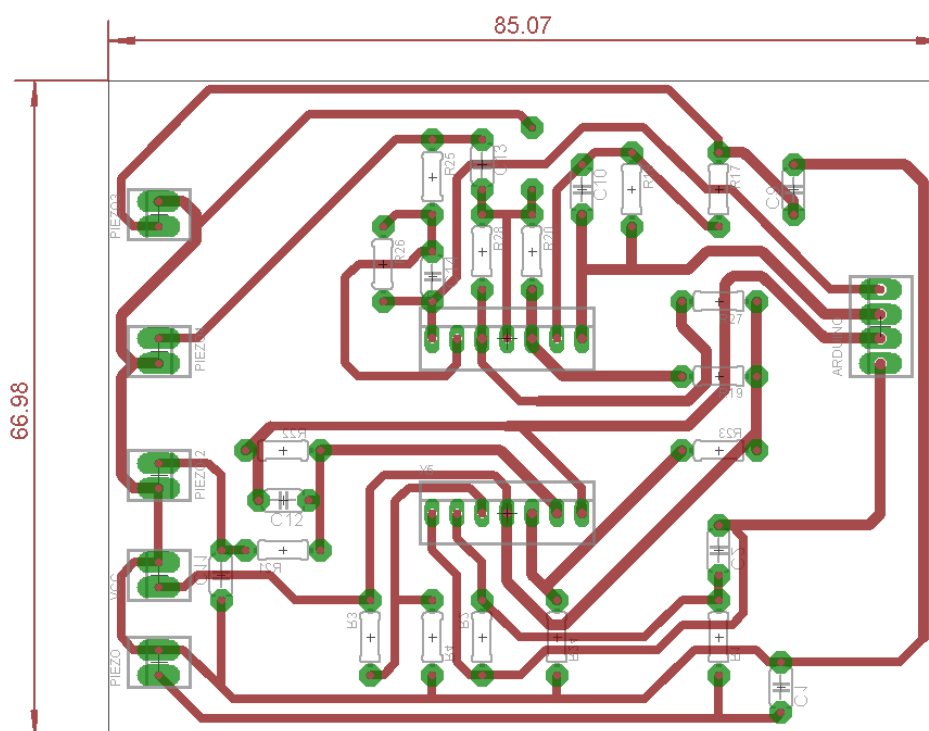
Fonte: A autoria própria.

Além do filtro passa banda projetado para o circuito de amplificação de carga, uma tensão de *offset* com valor de 2,5 V (divisão da tensão V_1 sobre os resistores R_3 e R_4) foi dimensionada de modo a garantir a correta aquisição dos dados no momento de descompressão dos sensores. Assim, quando não há uma força aplicada sobre os sensores, existe uma tensão de saída do amplificador em 2,5 V, que é transmitida

para o microcontrolador de forma a realizar a conversão A/D. Ainda, quando uma força é aplicada na superfície da plataforma, os piezos realizam a compressão e descompressão, com seus valores de tensão variando de 0 a 5 V.

Após o dimensionamento, iniciou-se o desenvolvimento da placa de circuito impresso para acoplar um amplificador de carga para cada um dos quatro sensores utilizados. Para se desenvolver o projeto físico do amplificador de carga, foi necessário fazer uma seleção do dispositivo a ser utilizado. Para esse projeto, adotou-se o amplificador JFET de propósito geral TL084, que possui quatro amplificadores operacionais dentro do seu encapsulamento. Com isso, o *layout* da placa foi desenvolvido e pode ser observado na Figura 18.

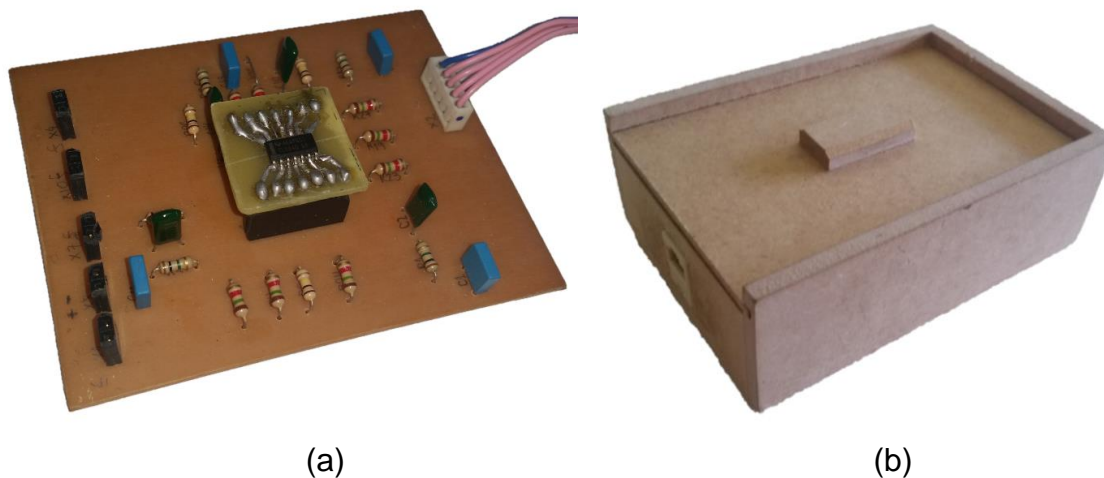
Figura 18 – Layout da placa dos amplificadores de carga.



Fonte: Autoria própria.

Com o *layout* pronto, desenvolveu-se a placa física dos amplificadores de carga, Figuras 19 (a), de forma a se conectar com os sensores piezoelétricos e com o Arduino Uno, sendo este responsável pela alimentação da placa. Ainda, foi utilizado uma caixa de madeira, Figura 19 (b), de modo a manter a placa desenvolvida e suas devidas conexões, tanto com os sensores, quanto com o Arduino, protegidas.

Figura 19 – Placa de circuito impresso para os amplificadores de carga (a), inserido em uma caixa de proteção (b).



Fonte: Autoria própria.

4.3 PROGRAMAÇÃO NO ARDUINO UNO

Após a aquisição dos dados provenientes dos sensores e o condicionamento dos mesmos realizado pelos amplificadores de carga, os valores de tensão são tratados pelo microcontrolador (Arduino Uno), onde são corretamente adquiridos e identificados, para então se realizar uma transmissão dos dados, via serial, para o *software* de instrumentação virtual. Essa etapa pode ser observada no fluxograma apresentado na Figura 20. Após esse estágio, os dados são encaminhados para o LabVIEW™, para que possam finalmente receber a modelagem matemática de forma a adquirir as variáveis fisiológicas.

Figura 20 – Fluxograma da lógica de programação desenvolvida no Arduino Uno.



Fonte: Autoria própria.

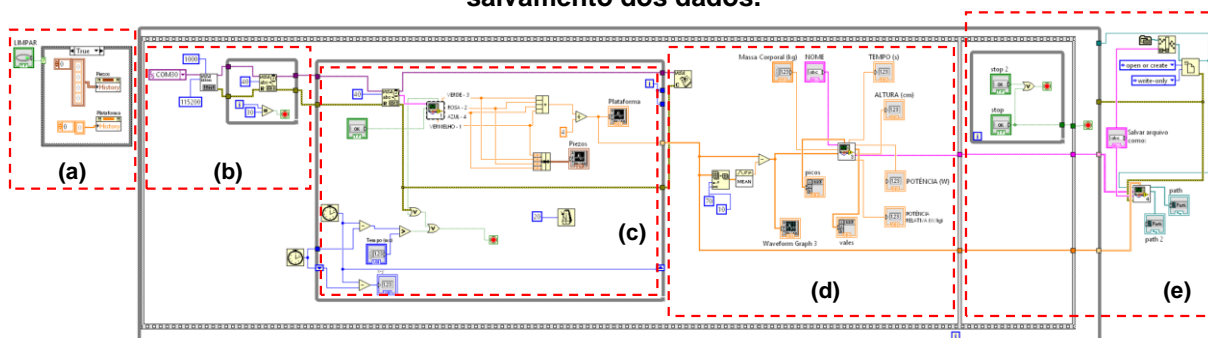
Durante a programação, pôde-se adquirir o valor da frequência de amostragem (f_A) do sinal proveniente da plataforma, de forma a verificar e garantir o funcionamento da mesma. Assim, fazendo a mensuração do tempo gasto na rotina de

conversão dos dados implementada no Arduino, obteve-se um valor de f_A de 650 Hz, o que garante a correta aquisição dos dados para o movimento de salto vertical.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

A partir dos dados corretamente identificados e enviados pela serial do Arduino, os mesmos são adquiridos pelo LabVIEW™ de forma a separá-los e realizar a modelagem matemática para então apresentá-los ao usuário. Na Figura 21, é possível observar a VI desenvolvida no *software* de modo a definir os parâmetros iniciais, Figura 21 (a); receber os dados da serial, Figura 21 (b); classificar os dados, plotar os valores de forma online e separar os sinais de cada sensor, Figura 21 (c); realizar a análise matemática para obter as variáveis fisiológicas, Figura 21 (d); definir as rotinas finais e salvar os dados adquiridos para análises posteriores, Figura 21 (e). Essa programação pode também ser observada no Apêndice A.

Figura 21 – VI desenvolvida no software LabVIEW™, sendo (a) parâmetros iniciais do programa; (b) inicialização da serial; (c) rotina de captura dos dados; (d) extração dos parâmetros de desempenho do salto (tempo de voo, altura e potência); (e) rotinas finais e de salvamento dos dados.

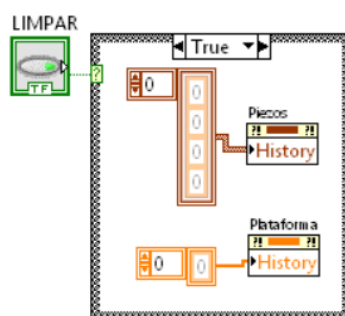


Fonte: Autoria própria.

4.4.1 Parâmetros iniciais do programa

A Figura 22 mostra a rotina de definição dos parâmetros iniciais do programa, realizando a limpeza dos dados referentes a testes realizados anteriormente. Com isso, garante-se que para cada novo teste, os gráficos e as variáveis de resposta serão calculados novamente para serem apresentados ao usuário.

Figura 22 – Diagrama de blocos contendo a etapa com os parâmetros iniciais do programa.

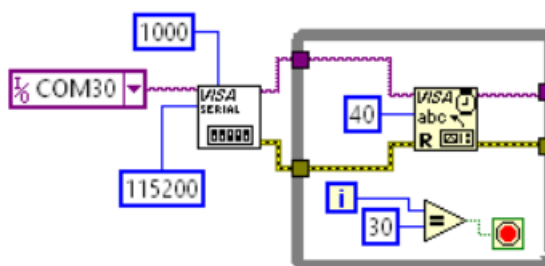


Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Inicialização da Comunicação Serial

Realizada a definição dos parâmetros iniciais a etapa de inicialização da comunicação serial pode ser estabelecida (Figura 23). Nesse estágio da programação ocorre a aquisição dos dados por meio da configuração da comunicação serial. Nele deve-se configurar a porta da comunicação (nesse caso, COM 30), a taxa de transmissão (*baud rate* de 115200) e o tempo de *timeout* (1000 ms), para indicar se não houver resposta por um determinado tempo. Com isso, 40 aquisições do sinal são feitas, utilizando o bloco *VISA Read*, de modo a garantir uma estabilidade no sinal, uma vez que essa ação evita ruídos e sinais indesejáveis após a alimentação dos amplificadores de carga nos primeiros estágios da aquisição.

Figura 23 – Diagrama de blocos contendo a etapa de inicialização da serial.



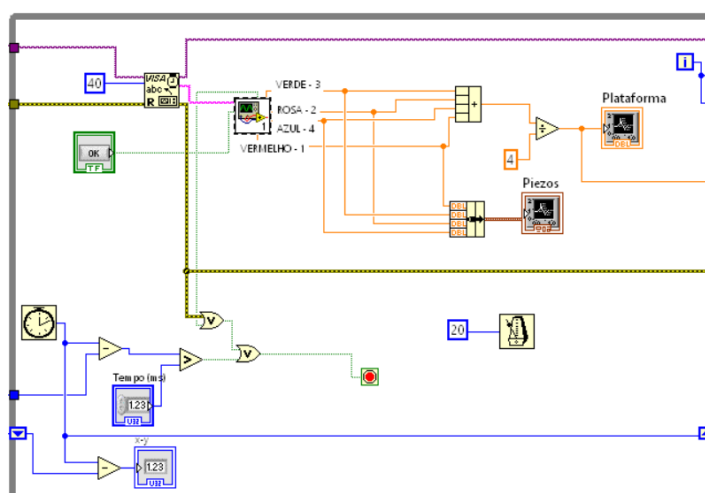
Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Rotina de captura de dados

Após a definição dos parâmetros necessários para garantir a correta comunicação serial, inicia-se a etapa de captura e identificação dos dados. Na Figura 24 é apresentada a rotina de aquisição dos sinais que serão enviados para o

processamento, onde os sinais dos quatro sensores são lidos e enviados para uma subrotina (subVI) de conversão de dados. Além disso, essa rotina também é responsável por contabilizar o tempo em milissegundos e, para garantir uma correta sincronia de execução, um bloco de controle de atraso de 20 ms está presente. A saída do bloco apresenta os quatro dados para visualização gráfica (Piezos) e a média dos sensores para a análise do salto (Plataforma). Após a finalização da rotina, os dados adquiridos nessa etapa são salvos em formato de *array* em um túnel para o posterior processamento.

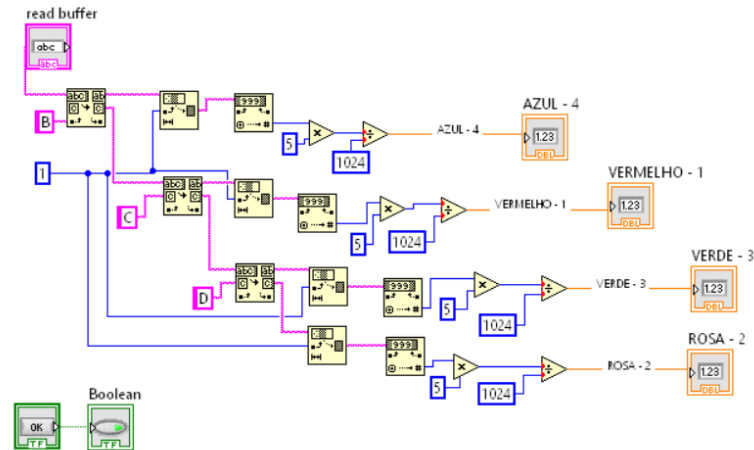
Figura 24 – Diagrama de blocos contendo a etapa de captura de dados.



Fonte: Autoria própria.

Como citado anteriormente, os dados obtidos pela leitura da serial são processados em uma subrotina (Figura 25). Os valores recebidos da serial apresentam o seguinte formato: “A512B512C512D512”, sendo estes do 1º ao 4º sensor respectivamente. Realizada a conversão, estes dados são separados e obtêm-se o seu respectivo valor de tensão (amplitude), retornando para a rotina principal.

Figura 25 – Subrotina de conversão dos dados da serial para valores numéricos, com a separação de cada canal.

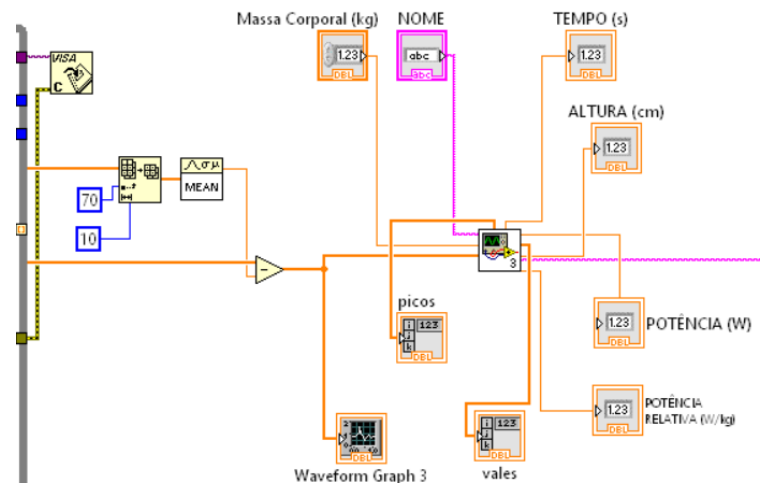


Fonte: Autoria própria.

4.4.4 Processamento e extração das variáveis

Com a correta aquisição e identificação dos dados, parte-se para o processamento dos dados e a extração das variáveis fisiológicas, apresentado na Figura 26. A primeira ação desta etapa é o fechamento da porta serial, para que esta se inicie apenas quando o usuário definir uma nova aquisição de dados. Os valores coletados, bem como o nome e a massa corporal da pessoa (variáveis de entrada), são direcionados para uma nova subrotina (subVI) responsável pela extração das características. Assim, a saída dessa etapa contém o tempo de voo, a altura do salto, a potência e a potência relativa desempenhada durante o salto.

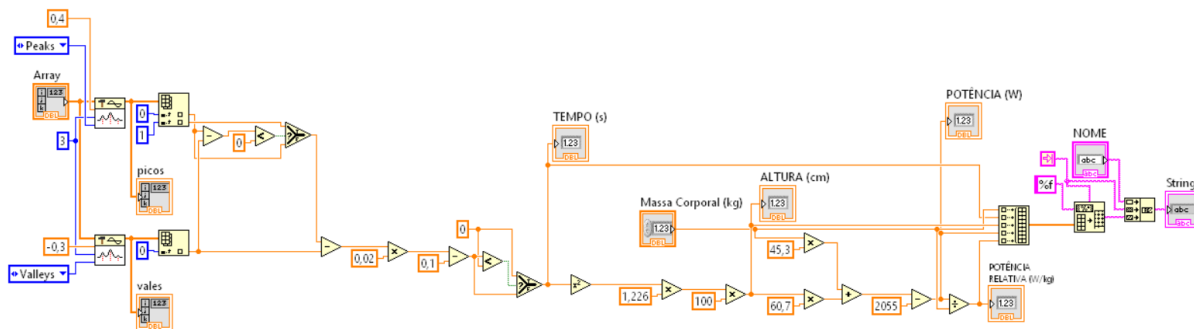
Figura 26 – Diagrama de blocos contendo a etapa de extração dos parâmetros de desempenho do salto.



Fonte: Autoria própria.

A subrotina de manipulação matemática para obtenção dos parâmetros fisiológicos necessários pode ser vista na Figura 27. Nela os dados de tempo de voo (obtido pela programação) e a massa corporal (fornecida pelo usuário) são utilizadas para que, com as equações descritas previamente, os valores desejados sejam adquiridos.

Figura 27 – Subrotina de extração das características do salto e das variáveis fisiológicas.



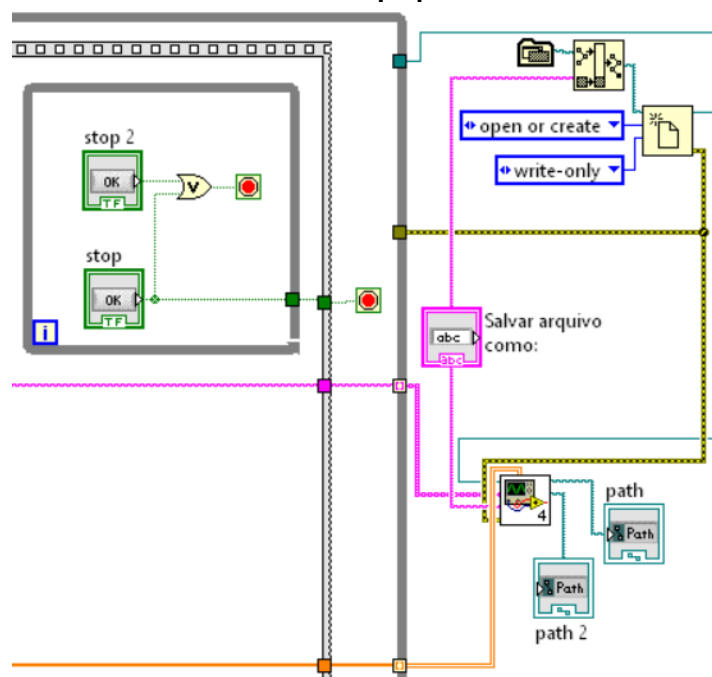
Fonte: Autoria própria.

Os dados calculados são então processados para que possam ser salvos em formato de texto, contendo todas as informações anteriormente citadas, adicionando também nome do indivíduo que realizou o teste e a sua massa corporal.

4.4.5 Rotinas finais e salvamento dos dados

Com a obtenção das variáveis necessárias para a avaliação do salto, iniciam-se as últimas etapas do programa (Figura 28), referentes à continuidade da rotina para aquisição de novos dados, a qual aguarda o usuário adquirir novas informações ou decidir acabar com a rotina de aquisição, e as rotinas de salvamento dos resultados obtidos. Quando o usuário escolhe salvar um novo dado, as rotinas de (b) a (d) da Figura 21 se repetem. Caso contrário, o programa salva todos os parâmetros dos saltos já realizados até o momento.

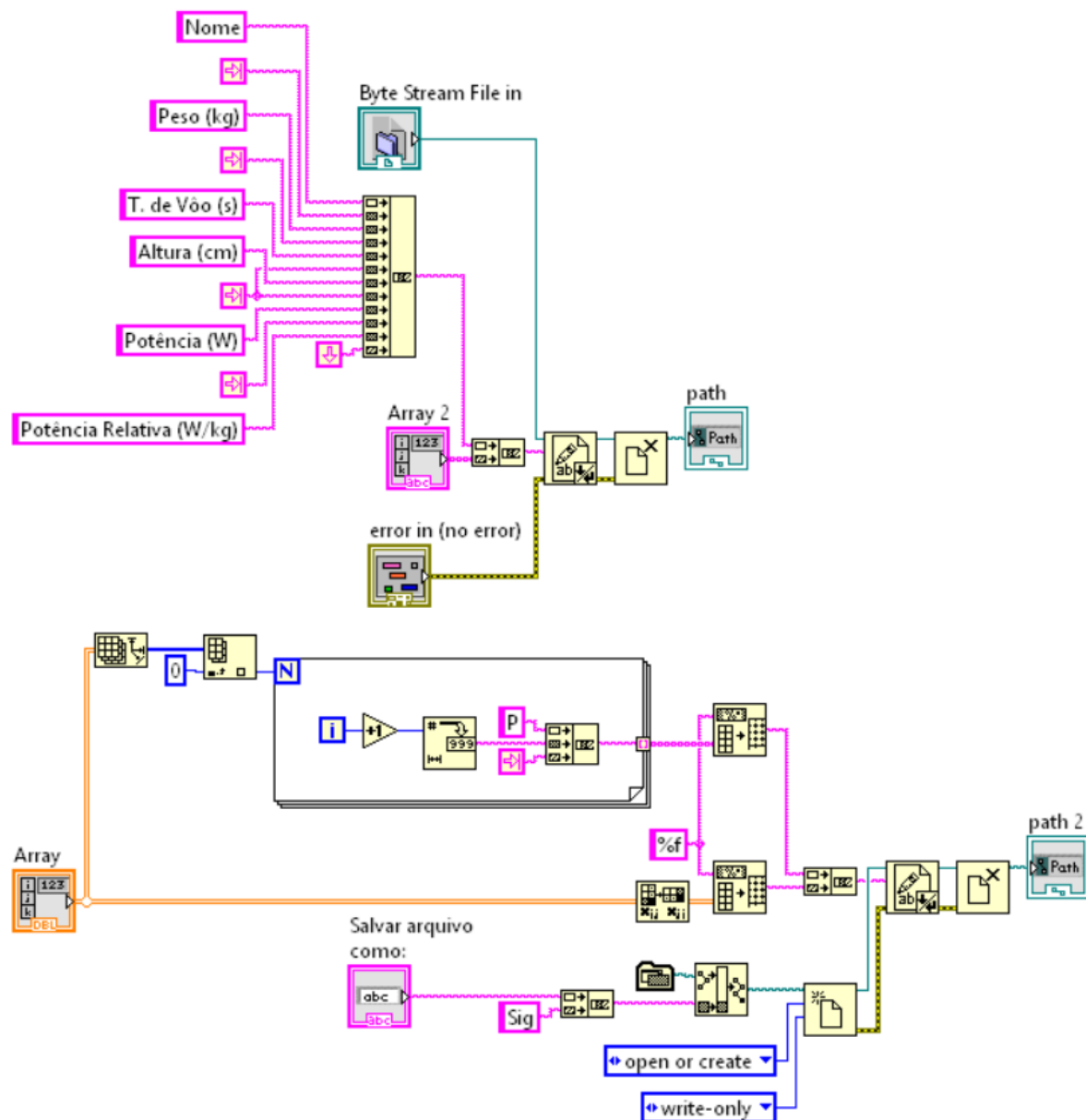
Figura 28 – Diagrama de blocos contendo a etapa para rotinas finais e salvamento dos dados.



Fonte: Autoria própria.

A subrotina de salvamento dos dados em um arquivo de texto pode ser vista na Figura 29. A parte superior é responsável pelo tratamento dos dados provenientes dos parâmetros retirados dos saltos, com a utilização dos blocos disponíveis no *software*, convertendo-os para arquivo de texto (txt). Já a parte inferior trata os dados provenientes de um *array* contendo os sinais dos sensores de cada salto, possibilitando análises futuras com o sinal. Existe um *loop* “for” para a criação da primeira linha do arquivo, contendo a indicação do sinal pelo salto desenvolvido. Estes arquivos são então armazenados na mesma pasta em que o VI executa o programa.

Figura 29 – Subrotina de salvamento dos dados obtidos com a realização do teste.

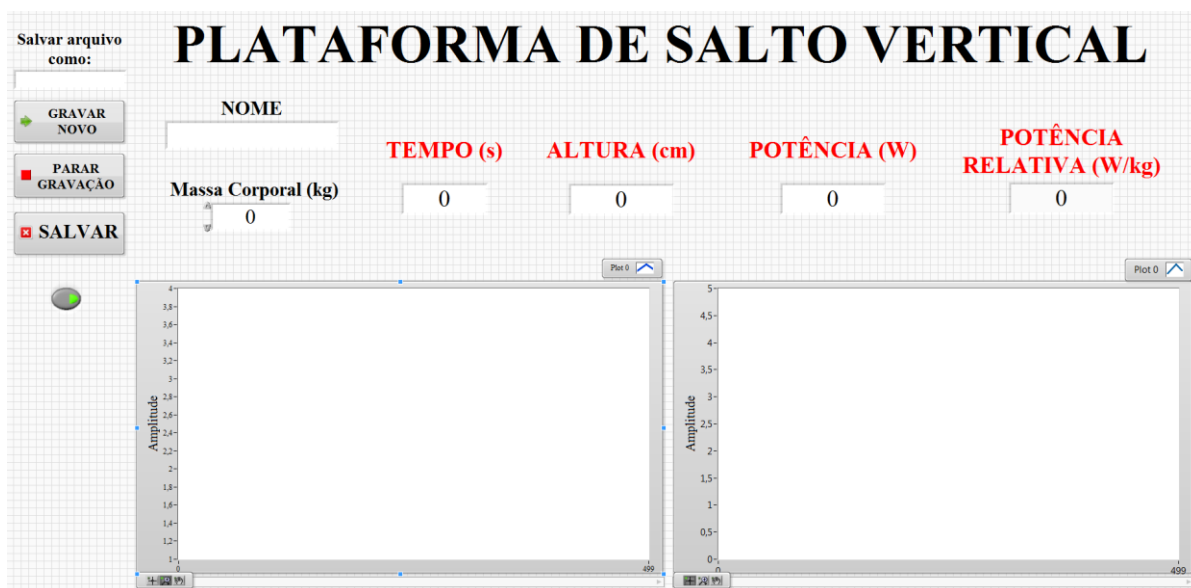


Fonte: Autoria própria.

4.4.6 Interface do Usuário

Tendo desenvolvido toda a programação para processamento dos sinais, focou-se em aperfeiçoar a interface de acesso do usuário, observada na Figura 30. Essa interface foi elaborada para que os parâmetros necessários (nome do arquivo a ser salvo, nome do indivíduo a realizar o teste e massa corporal) sejam inseridos e apresentar os dados obtidos durante o salto vertical para o usuário de fácil compreensão.

Figura 30 – Interface do usuário.



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, a interface desenvolvida apresenta para o usuário os campos de entrada de dados, botões de controle, as variáveis resultantes do teste (tempo de voo, altura e potência) e dois gráficos individuais.

No campo de entrada de dados, o usuário deve fornecer ao programa os dados necessários para o teste: nome do arquivo a ser salvo, nome do indivíduo realizando o teste e massa corporal em kg.

Os botões disponíveis têm a função de iniciar o teste, possibilitar a realização de quantas coletas forem necessárias (“gravar novo”), pausar o teste para recomposição do atleta (“parar gravação”) e, após concluídos os saltos, salvar os dados em um arquivo no formato texto para avaliações posteriores.

Além disso, o gráfico da esquerda apresenta o resultado final obtido pelos quatro sensores presentes na plataforma, de forma a obter o gráfico com as características do salto. Já o gráfico da direita apresenta a resposta de cada piezo individualmente, possibilitando a análise do correto funcionamento dos sensores, bem como o posicionamento do atleta na superfície da plataforma.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O foco deste tópico é apresentar os resultados e discussões obtidos visando o cumprimento dos objetivos anteriormente citados. Todos os valores e análises aqui apresentadas são referentes ao desenvolvimento do protótipo, assim como a demonstração de seu desempenho nas condições de teste.

5.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA PLATAFORMA

Para a caracterização dos sensores presentes na plataforma, foram realizadas 10 coletas de tensão elétrica pelo trabalho da força peso em 6 alturas diferentes, utilizando o peso padrão selecionado. Com a medição dos valores, a Tabela 1 foi gerada com os valores médios de tensão elétrica, variando-se a altura. Os desvios padrões para os valores de tensão foram calculados, bem como os valores do trabalho da força aplicado sobre o piezo.

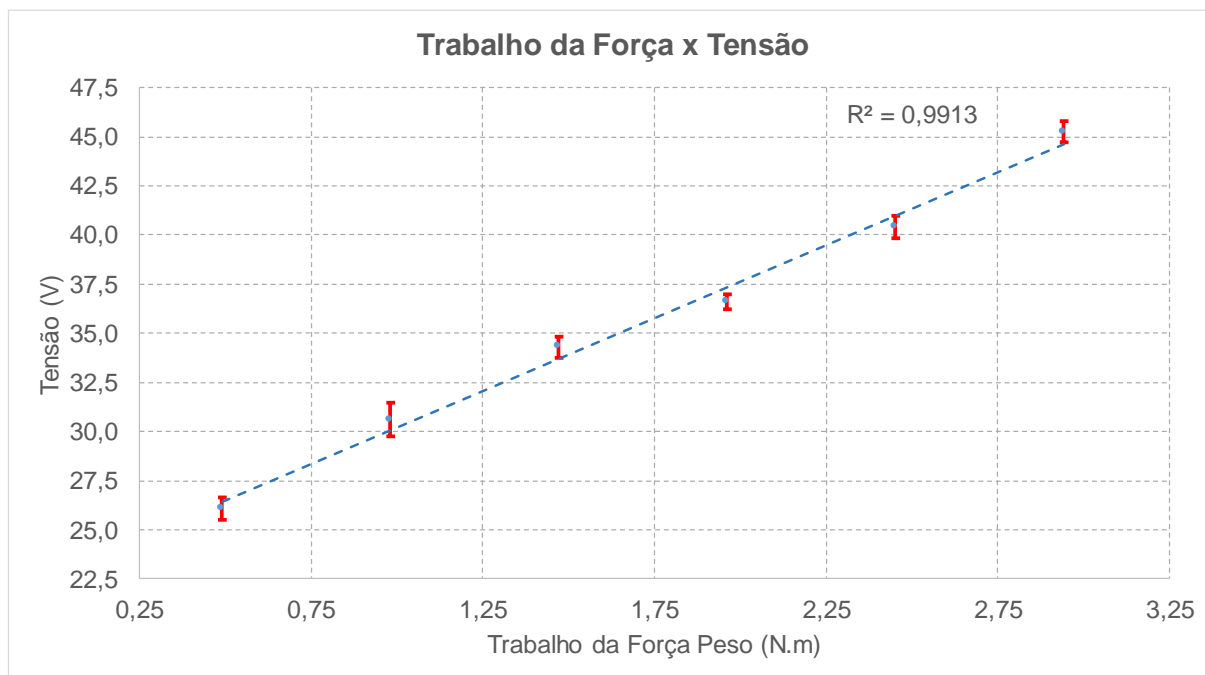
Tabela 1 – Valores médios de tensão e desvio padrão das amostras.

Altura (cm)	Trabalho da Força (N.m)	Tensão média (V)	Desvio Padrão (V)
10	0,49	26,10	0,56
20	0,98	30,60	0,86
30	1,47	34,30	0,52
40	1,96	36,60	0,37
50	2,45	40,40	0,55
60	2,94	45,25	0,54

Fonte: A autoria própria.

Após os cálculos dos valores médios, o gráfico da Figura 31 foi desenvolvido para realizar uma verificação da possível linearidade entre a força aplicada e a tensão elétrica gerada pelos sensores.

Figura 31 – Linha de tendência e Coeficiente de Determinação (R²).



Fonte: Autoria própria.

Com esse gráfico, é possível confirmar a quase linearidade (forte dependência) das duas variáveis, obtendo um coeficiente de determinação de 99,13% (R² de 0,9913). Para uma aproximação linear, obteve-se uma equação de primeiro grau, apresentada como equação (9).

$$y = 7,424x + 22,797 \quad (9)$$

Em que:

y é o trabalho da força peso em N.m;

x é a tensão elétrica em V.

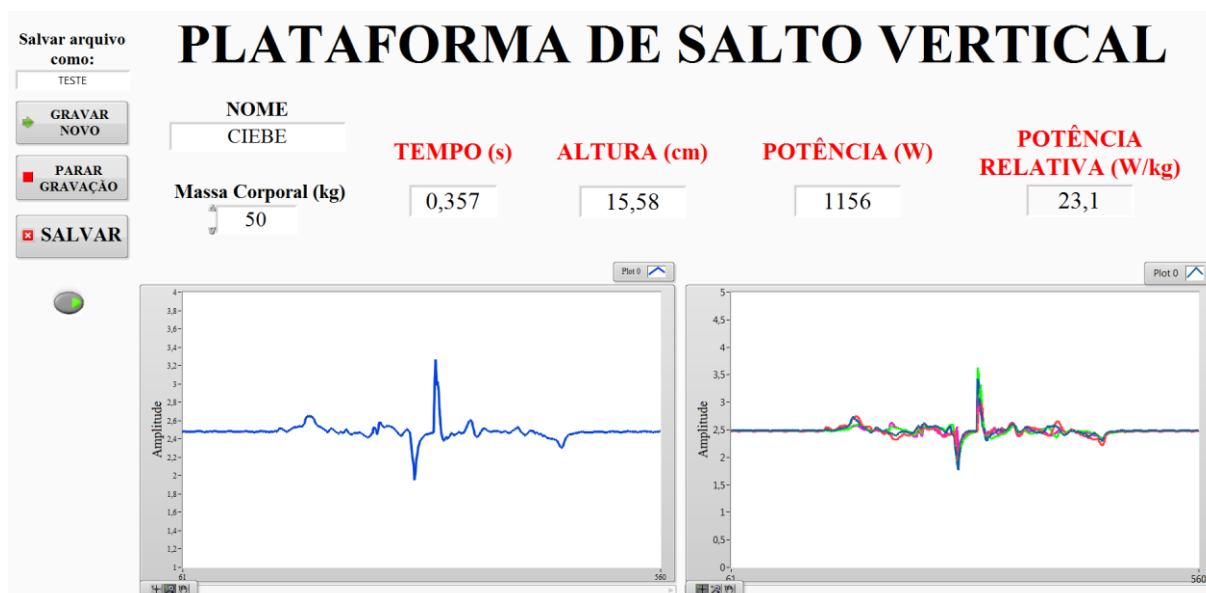
Como os valores apresentados foram satisfatórios e o valor da tensão elétrica apresentou uma boa relação de linearidade com a força aplicada sobre o piezo, garante-se que as análises realizadas a partir dos dados provenientes dos sensores piezoelétricos em valores de tensão elétrica podem ser realizados de maneira confiável.

5.2 INTERFACE DO USUÁRIO

A apresentação dos dados obtidos durante a realização do teste de salto vertical, bem como o seu processamento são realizados utilizando LabVIEW™ que permite a construção de uma rotina de programação em diagramas de blocos e o desenvolvimento de um arquivo executável que tem o seu funcionamento independente do *software* estar instalado no computador.

A criação de uma interface gráfica foi priorizada para facilitar a análise de dados em campo pelo avaliador técnico de maneira que pudesse ser observado o comportamento do movimento executado, assim como as respectivas variáveis fisiológicas. Utilizando essa interface, foi possível realizar testes de salto vertical, analisando de forma online os resultados e avaliando o correto funcionamento do equipamento. Assim, a Figura 32 mostra um exemplo de salto vertical realizado na plataforma elaborada, bem como os resultados obtidos e forma de apresentação para o usuário final.

Figura 32 – Exemplo de um salto vertical realizado na plataforma.

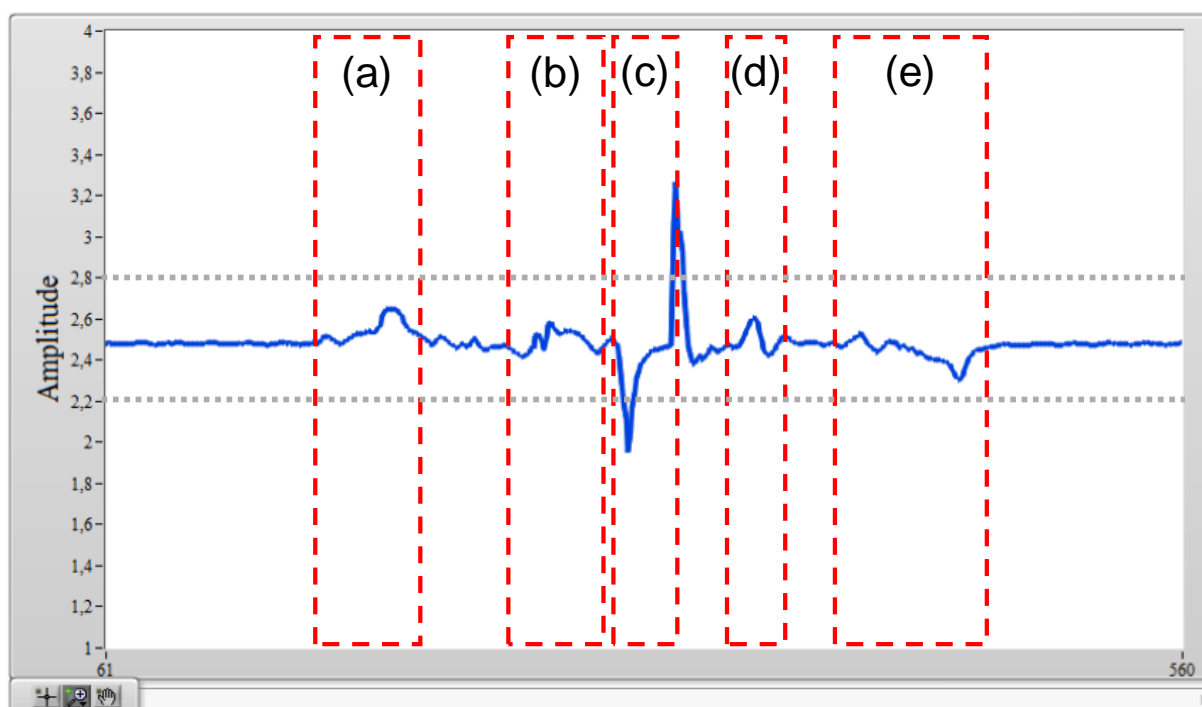


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, são apresentados na interface dois gráficos simultâneos que contém informações capazes de auxiliar o controle da metodologia apropriada de salto efetuada pelo atleta. Ainda, o primeiro gráfico apresenta a média dos valores dos piezos, ou seja, apresenta o resultado final da plataforma, com a força sendo distribuída em todos os quatro sensores, em destaque na Figura 33. Nela, é

possível também observar as etapas do salto vertical, caracterizadas pela entrada do indivíduo na plataforma (Figura 33 (a)), preparação do atleta para iniciar a impulsão vertical (Figura 33 (b)), tempo de voo, com a saída do atleta da plataforma e sua aterrissagem (Figura 33 (c)), absorção do impacto e retorno à posição vertical (Figura 33 (d)) e término do teste e saída da plataforma (Figura 33 (e)).

Figura 33 – Curva do salto vertical, dada pela média da resposta dos sensores piezoelétricos, sendo (a) entrada na plataforma; (b) preparação para o salto; (c) tempo de voo; (d) recomposição do atleta; (e) saída da plataforma.



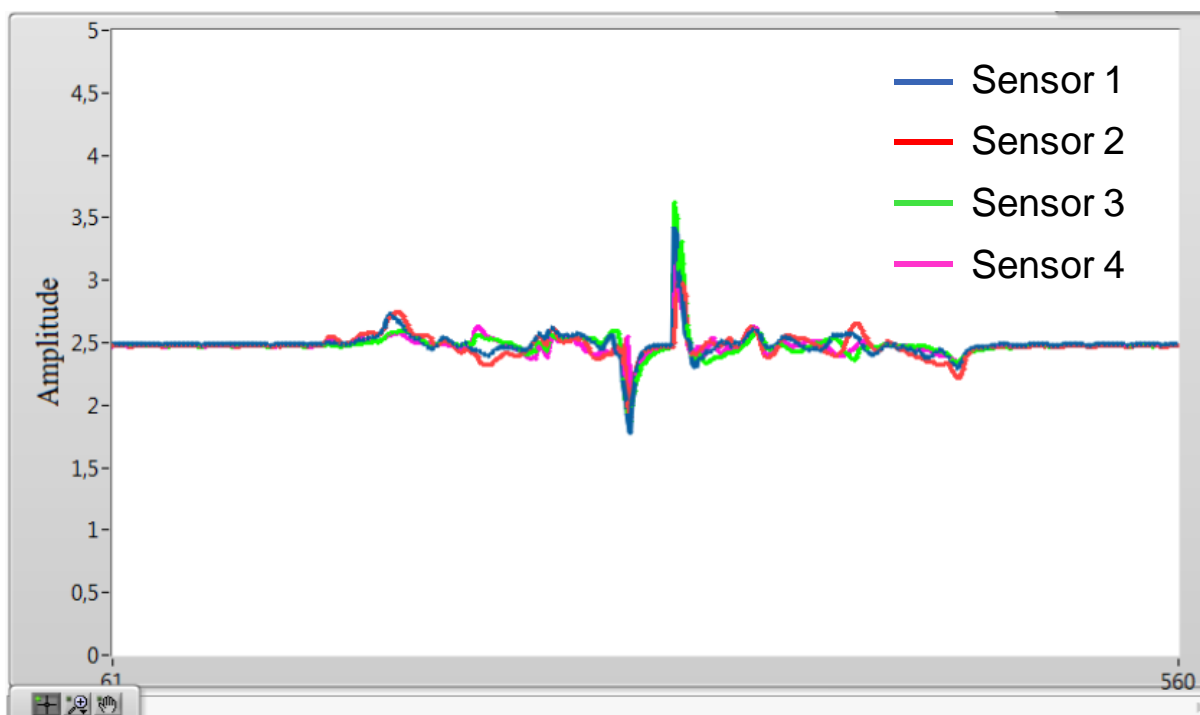
Fonte: Autoria própria.

Para ser possível a realização da aquisição e tratamento dos dados resultantes do salto vertical, os dados de amplitude em tensão elétrica (eixo vertical), são monitorados continuamente no decorrer do tempo (eixo horizontal), de forma a identificar o momento em que há a descompressão dos sensores (instante de decolagem) e uma nova compressão nos mesmos. Essa detecção ocorre quando o valor de amplitude ultrapassa valores pré-definidos (superior a 2,8 V e inferior a 2,2 V), permitindo ao programa mensurar o tempo decorrido entre esses dois instantes (tempo de voo). Esses valores de amplitude foram definidos de modo a assegurar a contabilização do tempo do atleta no ar referente ao salto, não sendo influenciados pelo momento de subida e descida do atleta na plataforma, o que também gera oscilações na amplitude do sinal. Após adquirido o valor do tempo de voo, esse

resultado é utilizado nas equações matemáticas já mencionadas, a fim de se obter os valores de altura e potência.

No entanto, o segundo gráfico, apresentado na Figura 34, plota a saída de tensão de cada piezo individual, possibilitando a análise do funcionamento adequado dos sensores, bem como o correto posicionamento do atleta na superfície da plataforma.

Figura 34 – Curva do salto vertical, dada pelas respostas individuais de cada um dos sensores piezoelétricos.



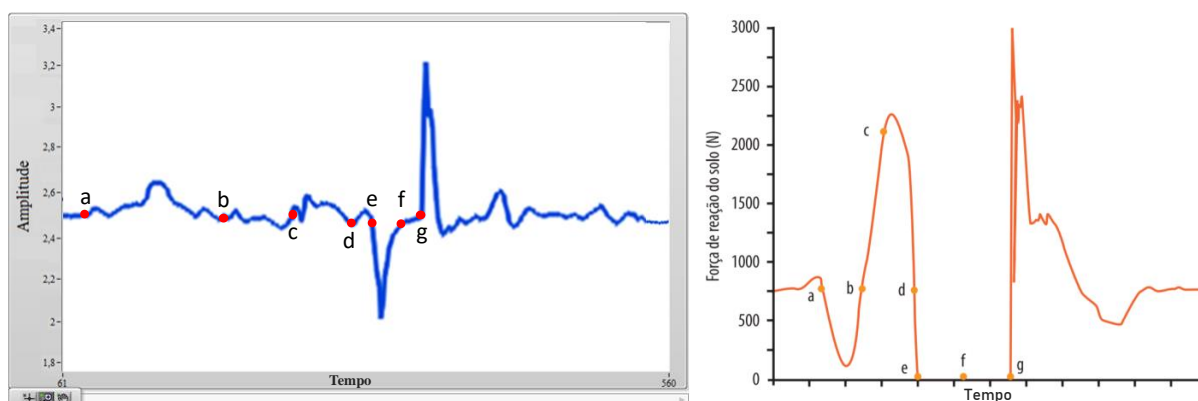
Fonte: Autoria própria.

Como visto, quando todos os sensores piezoelétricos estão funcionando adequadamente, eles apresentam as variações decorrentes da compressão e descompressão ocasionadas devido ao movimento sobre a superfície da plataforma. No entanto, quando um dos sensores não funciona adequadamente, é possível fazer a identificação do mesmo pelo gráfico, pois o valor de amplitude não apresentará o comportamento esperado.

Analisando o gráfico obtido na Figura 33, nota-se uma diferença entre a curva apresentada pelo dispositivo e a curva adquirida utilizando um equipamento comercial que utiliza células de carga (Figura 4). Essa diferença ocorre devido a distinção entre as repostas dos sensores utilizados. No entanto, as características do salto podem

ser identificadas em ambos os gráficos, como visto na Figura 35. Dessa forma, ressalta-se que o equipamento desenvolvido apresenta todos os pontos necessários para realização da análise do teste de salto vertical, mesmo que formato diferente.

Figura 35 – Comparação entre as curvas de salto vertical obtidas pela plataforma desenvolvida e por um equipamento comercial.



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, as duas curvas apresentam as mesmas características importantes para avaliação do salto, que são definidos pelos pontos: (a) entrada do atleta no equipamento e início do teste; (b) ponto de equilíbrio do equipamento, onde a força de reação do solo é igual a força peso do atleta; (c) início da impulsão (fase concêntrica), com velocidade positiva; (d) ponto de máxima velocidade de subida; (e) instante de impulsão com saída do equipamento; (f) altura máxima do salto com velocidade zero; e (g) momento da aterrissagem.

Porém, a curva obtida pela plataforma desenvolvida possui resposta dinâmica em valores de tensão, relacionados ao trabalho da força aplicado sobre a superfície. Diferentemente, a curva apresentada pelo sistema comercial utiliza células de carga, que possuem sinais estáticos em relação a força peso do atleta.

5.3 MEDIÇÃO E VALIDAÇÃO DO TEMPO DE VOO

Como apresentado anteriormente, a variável de tempo de voo é responsável pela obtenção das demais grandezas fisiológicas a serem obtidas por uma plataforma de salto. Por conta disso, a medição desse valor deve ser validada para que todas as demais variáveis sejam confiáveis.

Para realizar a validação do tempo de voo, foi necessário fazer uma comparação dos resultados com análise de vídeo, utilizando uma câmera filmadora capaz de fazer gravações em alta velocidade. Para isso, optou-se pela utilização da GoPro Hero 3, capaz de realizar uma gravação com 240 quadros por segundo (fps), o equivalente a um erro de aproximadamente 4,167 ms (1000 ms/240). Assim, para se realizar a análise dos vídeos gravados pela câmera selecionada, foi utilizado o *software*, gratuito, para análise de vídeos esportivos *Kinovea*. De forma a garantir uma alta representatividade dos dados, foi estipulado um mínimo de 50 amostras de tempo, coletadas ambas pela plataforma e pela câmera.

5.3.1 Análise estatística do tempo de voo

Para se iniciar a validação do tempo de voo, coletou-se um total de 62 amostras de salto vertical, fazendo a mensuração do tempo pela plataforma e com a câmera filmadora com gravação de alta velocidade. Para melhor visualização, os dados das coletas de tempo são apresentados de forma resumida e podem ser observados na Tabela 2. No entanto, a tabela completa, contendo todos os dados podem ser vistos no Apêndice B.

Tabela 2 – Resultados e análise de dados dos tempos de voo.

Coleta	Tempo Plat. (s)	Tempo GoPro (s)	Erro (%)
1	0,539717	0,541	0,237%
2	0,534082	0,537	0,543%
3	0,532363	0,537	0,864%
4	0,519720	0,520	0,054%
5	0,534063	0,533	0,199%
...
58	0,444583	0,450	1,204%
59	0,492605	0,500	1,479%
60	0,520235	0,517	0,626%
61	0,480963	0,483	0,422%
62	0,503010	0,500	0,602%

Fonte: Autoria própria.

Após a coleta desses dados, foi possível calcular os valores de erro percentual, bem como seus valores máximos, mínimos e médio, o desvio padrão e a variável de correlação de Pearson (r) com os dados entre as duas medições de tempo. O coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação produto-

momento ou o r de Pearson mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. É dado por um índice adimensional com valores situados entre -1,0 e 1,0, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados (VARGAS, 2017). Ainda, de acordo Gadotti et al. (2006), um valor de correlação acima de 0,75 indica uma boa confiabilidade. Além disso, Atkinson e Nevill (1998) citam que um valor maior que 0,8 é alto e, se a correlação for significativa, o instrumento pode ser considerado confiável.

Tabela 3 – Análise estatística do tempo de voo.

Erro Máx (%)	Erro Mín (%)	Erro Médio (%)	Desvio Padrão Plataforma (s)	Desvio Padrão GoPro (s)	Correlação de Pearson (r)
1,926%	0,053%	0,715%	0,0642	0,0634	0,998

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, o valor máximo do erro encontrado entre as duas medições de tempo foi de 1,926%, o que é o equivalente a 8,4 ms de diferença entre as medições. Esse valor é aceitável, pois a câmera possui um erro de 4,167 ms entre cada *frame* de análise, fazendo assim com que o tempo da GoPro possua um desvio padrão de $\pm 2,083$ ms.

Ainda, o valor de tempo medido pela plataforma possui atrelado a si um erro presente devido a conversão A/D realizada para processamento dos dados. Sabe-se que o microcontrolador presente na plataforma do Arduino Uno possui um *clock* de 16 MHz. Sabe-se também que cada conversão A/D possui 10 bits de resolução e requer 13 ciclos de *clock* do processador para ser realizada (ARDUINO, 2017). Com isso, para a realização da conversão dos 10 bits, são necessários valores de tempo entre 106 e 108 μ s.

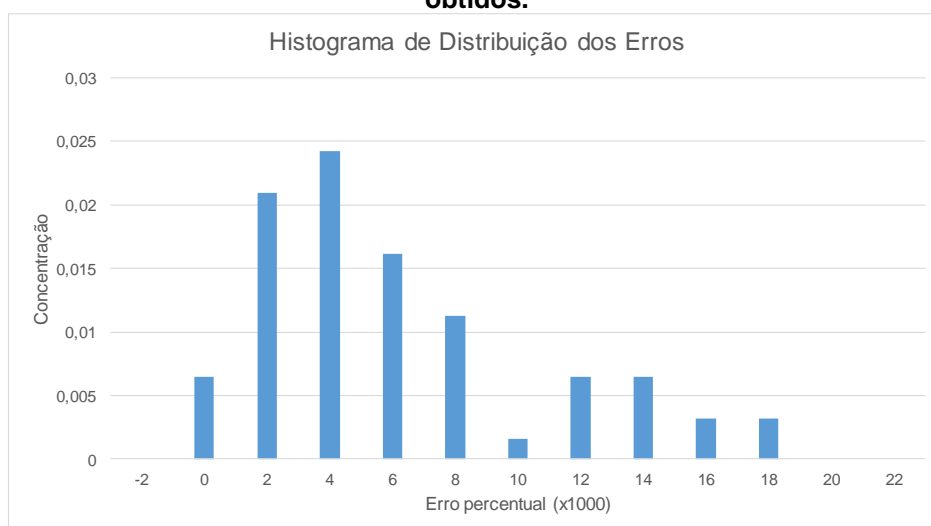
Como o microcontrolador presente no Arduino Uno possui 10 bits de resolução ± 2 bits menos significativos, é possível calcular a resolução do conversor com base na tensão de referência adotada nas entradas analógicas do circuito (5 V). Com isso, obtêm-se um valor de 4,88 mV (5/1024). Assim, é possível afirmar que o erro de conversão é da ordem de 0,098%.

Com a análise realizada e obtendo-se o valor de correlação r de 0,998, pode-se concluir que os dados obtidos pela plataforma são confiáveis para realizar o cálculo das grandezas fisiológicas necessárias para avaliação física e de desempenho.

Não obstante, para uma melhor análise estatística dos erros obtidos, a Figura 36 apresenta um histograma com a distribuição dos erros para as devidas medições do tempo.

A partir desse gráfico, é possível observar a curva de distribuição dos erros adquiridos. Destaca-se o fato de 80,64% dos dados estarem concentrados na faixa de erro menor 1%, sendo a maior concentração no erro de 0,4% com 24,19% dos dados. Esses valores demonstram a viabilidade de utilização da plataforma, uma vez que a mesma não apresenta um erro superior a 2%.

Figura 36 – Histograma para verificação da distribuição normal com os valores dos erros obtidos.



Fonte: Autoria própria.

5.4 RESULTADOS ACADÊMICOS

Além dos resultados práticos e a validação do protótipo, obtiveram-se alguns resultados acadêmicos que são relevantes, visando sempre a importância deste trabalho para a comunidade científica em geral. Esses resultados foram divididos em três tópicos: publicações em congressos, atuação acadêmica e trabalhos futuros.

5.4.1 Publicações em Congressos

Com o desenvolvimento do projeto, duas publicações do trabalho foram realizadas em congressos da área de engenharia. Essas publicações tiveram como

objetivos a divulgação da plataforma desenvolvida e a metodologia de caracterização dos sensores piezoelétricos.

A primeira publicação ocorreu no 11º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, apresentado em Ponta Grossa em agosto de 2016. O título do trabalho foi: Plataforma de força de baixo custo para medição da potência anaeróbia dos membros inferiores em avaliações físicas utilizando sensores piezoelétricos. Para a publicação, a plataforma desenvolvida estava em sua primeira versão, sendo ela construída em um tamanho menor do que versão final desenvolvida, porém apresentava respostas satisfatórias.

A segunda publicação ocorreu no Seminário de Eletrônica e Automação da UTFPR-PG 2016, com o título: Caracterização do Sensor Piezoelétrico para sua utilização em Dispositivos Embarcados. O evento ocorreu no mês de agosto de 2016, sendo que a participação no mesmo foi importante para disseminação das informações dos sensores, bem como a divulgação do trabalho desenvolvido para uma contextualização do equipamento no meio da eletrônica.

5.4.2 Atuação Acadêmica

Além deste trabalho de conclusão de curso, a presente pesquisa foi iniciada como Iniciação Científica da universidade. A pesquisa realizada focou na caracterização dos sensores piezoelétricos para sua aplicação no desenvolvimento de uma plataforma de salto. O título do trabalho foi: Desenvolvimento de uma plataforma de salto com análise e transmissão dos dados do desempenho do atleta, vinculado ao projeto de pesquisa: Desenvolvimento e aplicação de sensores para fins industriais e biomédicos.

O trabalho durou doze meses e teve seus resultados divulgados no Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR realizado no mês de novembro de 2016 em Francisco Beltrão, Paraná.

5.4.3 Trabalhos Futuros

Após o correto funcionamento e validação dos dados provenientes da plataforma, foi apontado uma segunda aplicação para a mesma, voltada para análise

de equilíbrio. Isso é possível devido a característica dos sensores piezoelétricos para com respostas dinâmicas. Dessa forma, a plataforma será caracterizada por possuir duas aplicações práticas de avaliação, sendo a com testes de salto vertical e testes de equilíbrio. Essa segunda aplicação é muito importante para avaliação de indivíduos em reabilitação, pessoas idosas e desenvolvimento de treinamento personalizado. Além disso, com a correta funcionalidade das duas aplicações, o equipamento será algo inédito no mercado, uma vez que dispositivos para ambos os testes são encontrados somente separadamente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância de equipamentos tecnológicos nas aplicações esportivas está cada vez maior e mais abrangente. A medição de dados para análises de condicionamento físico, fisiológico e de desempenho se tornou algo fundamental para treinadores e atletas no desenvolvimento do esporte.

Nesse contexto, o salto vertical e as grandezas fisiológicas atrelados a esse movimento são muito importantes para fazer análises de desempenho de atletas de diversas modalidades, podendo trazer melhorias de treinamento e até exercícios para prevenção de lesões. Assim, a potência dos membros inferiores é dada como a melhor grandeza para avaliar a condição física e fisiológica do atleta.

No entanto, plataformas de força e tapetes de contato são equipamentos de um alto custo de aquisição, devido ao fato de possuírem poucas empresas fabricantes no Brasil, e o modelos internacionais terem um alto valor de importação.

Por esse motivo, este estudo teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma plataforma de salto vertical. Desejou-se desenvolver um equipamento de baixo custo, a fim de nacionalizar a tecnologia e possivelmente concorrer com os equipamentos importados.

O protótipo aqui desenvolvido possui os seguintes componentes e suas funções: quatro sensores piezoelétricos; um TL084 como amplificador de carga, juntamente com resistores e capacitores; e um Arduino Uno como microcontrolador. Esses componentes são responsáveis por obter os sinais dos sensores, processá-los e caracterizá-los, de forma a ser possível a aquisição do tempo de voo e, conseqüentemente, dos dados de altura e potência.

Para isso, foi necessário fazer uma caracterização dos sensores para melhor compreensão dos seus resultados, projetar e simular o amplificador de carga para a aplicação desejada, bem como a comunicação dos dados para uma interface de fácil compreensão.

Após o desenvolvimento do equipamento, a medição do tempo de voo foi validada por meio de uma comparação com análise de vídeo, onde comprovou-se que os valores obtidos pela plataforma são muito próximos aos valores medidos por uma câmera de alta velocidade, com uma correlação de 0,998, valor esse superior ao encontrado utilizando outros equipamentos do mercado. Ainda, a plataforma não apresentou um erro superior a 2%, sendo que 80,64% dos dados se concentraram em

uma faixa inferior a 1% de erro. Com isso, pôde-se garantir e obter as demais grandezas fisiológicas características de um salto vertical de maneira confiável utilizando o dispositivo elaborado.

O equipamento apresentou, além dos resultados satisfatórios, uma grande durabilidade dos sensores. Após um ano de confecção da plataforma e fixação dos sensores, bem como a realização de mais de mil saltos realizados sobre a superfície do equipamento, os sensores piezoelétricos não foram danificados e continuam apresentando a mesma resposta.

Além dos resultados práticos com o protótipo, obtiveram-se importantes resultados acadêmicos, como a publicação do projeto em dois congressos técnicos, uma iniciação científica e a possibilidade de continuação do estudo para desenvolvimento de um equipamento inédito.

Após todas as análises realizadas e a apresentação dos valores obtidos no laboratório, pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados de maneira satisfatória, finalizando a presente etapa do projeto como um todo.

REFERÊNCIAS

AGILENT TECHNOLOGIES. **Resolvendo Problemas em Aplicações de Célula de Carga com a Solução de Conectividade Sem Fio da Agilent**. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-9941PTBR.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2017.

ARAUJO, L.G.; ALVES, J.; MARTINS, A.C.V; PEREIRA, G.S.; MELO, S.I.L. **Salto vertical: Estado da arte e tendência dos estudos**. R. bras. Ci. e Mov 2013;21(1):174-181.

ARAÚJO, Rafael Vieira de. **JUDÔ: DA HISTÓRIA À PEDAGOGIA DO ESPORTE**. 2005. 114 f. Monografia (Especialização) - Curso de Educação Física, Faculdade de Educação Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

ARDUINO. **ARDUINO UNO REV3**. 2017. Disponível em: <<https://store.Arduino.cc/usa/Arduino-Uno-rev3>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

ATKINSON, G; NEVILL, A.M. **Statistical Methods for Assessing Measurement Error (Reliability) in Variables Relevant to Sports Medicine**. Sports Med. 1998; 2: 217–238.

BARBANTI V. J. **Treinamento Esportivo: as capacidades motoras dos esportistas**. Barueri, SP; Manole, 2010.

CAMARGO, Valter Luís Arlindo de. **DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL UTILIZANDO SENSORES EXTENSOMÉTRICOS CONECTADOS EM REDE**. 2008. 211 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

CARDIOMED. **Plataforma de Salto - Jump Test - Hidrofit**. Disponível em: <<http://www.cardiomed.com.br/plataforma-de-jump-test-hydrofit>>. Acesso em: 16 set. 2017.

CARVALHO, Felipe Moniz; SCAGLIA, Alcides José; COSTA, Israel Teoldo da. **Influência do desempenho tático sobre o resultado final em jogo reduzido de futebol.** Revista da Educação Física, Maringá, v. 4, n. 3, p.393-400, 3. trim. 2013.

COTTA, Rafael Martins et al. **Utilização dos testes de salto vertical e salto horizontal para prescrição de treinamento pliométrico.** Revista Digital - Buenos Aires, Buenos Aires, v. 14, n. 131, p.1-1, abr. 2009.

DAL PUPO, Juliano; DETANICO, Daniele; SANTOS, Saray Giovana dos. **Parâmetros cinéticos determinantes do desempenho nos saltos verticais.** Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano, v. 14, n. 1, p.41-51, 2 jan. 2012. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

FERREIRA, J. C.; CARVALHO, R. G. S.; SZMUCHROWSKI, L. A. **VALIDADE E CONFIABILIDADE DE UM TAPETE DE CONTATO PARA MENSURAÇÃO DA ALTURA DO SALTO VERTICAL.** Revista Brasileira de Biomecânica, v. 9, n. 17, p.93-99, nov. 2008.

FREITAS, Melissa La Banca et al. **Uma Visão Tutorial de LabVIEW através de Aplicações em Engenharia Biomédica e Esportiva.** In: 1º CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA, 2017, Ponta Grossa, 2017.

GADOTTI, I.C; VIEIRA, E.R.; MAGEE, D.J. **Importance and Clarification of Measurement properties in Rehabilitation.** Rev. bras. fisioter. 2006; 10(2): 137-146.

GAUTSCHI, Gustav. **Piezoelectric Sensors.** Springer Berlin Heidelberg, p.73-91, 2002.

GHORAYEB, Nabil. **Desenvolvimento da tecnologia tem influência no rendimento esportivo.** 2013. Disponível em: <<http://globoesporte.globo.com/eu-atleta/saude/noticia/2013/07/desenvolvimento-da-tecnologia-influencia-no-desempenho-esportivo.html>>. Acesso em: 02 dez. 2017.

GRANELL, J.C.; CERVERA, V.R. **Teoria e Planejamento do Treinamento Desportivo.** Porto Alegre; Artmed; 2003.

HANSEN, Svein Kristian Esp. **Design and Experimental Investigation of Charge Amplifiers for Ultrasonic Transducers**. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Electric Engineering, Department of Physics and Technology, The Arctic University of Norway, 2014.

JOHNSON, G.; JENNINGS, R. **LabVIEW Graphical Programming**. 4 ed. Mc Graw Hill: New York, 2006.

JORDAN, T.I.; OUNAIES, Z. **Piezoelectric Ceramics Characterization**. Hampton: Universities Space Research Association, 2001. 23 p. NASA/CR-2001-211225. ICASE Report No. 2001-28.

KERWIN, David G. **Force plate analyses of human jumping**. 1997. Tese de Doutorado. © David George Kerwin.

KLAVORA, P. **Vertical-jump tests: A critical review**. Strength and Conditioning Journal. p 70-75, out. 2000.

MCGINNIS, Peter M. **Biomecânica do esporte e do exercício**. Porto Alegre: Artmed, 2015. 448 p.

MENDES, José et al. **Sensor Fusion and Smart Sensor in Sports and Biomedical Applications**. Sensors, v. 16, n. 10, p.1569-1600, 23 set. 2016. MDPI AG.

MURATA MANUFACTURING CO, **Piezoelectric ceramics sensors** (Piezotite®). Acesso em: 07/10/2017. Disponível em: <http://www.farnell.com/datasheets/43406.pdf>.

OKAZAKI, Victor Hugo Alves et al. **CIÊNCIA E TECNOLOGIA APLICADA À MELHORIA DO DESEMPENHO ESPORTIVO**. Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte, v. 11, n. 1, p.143-157, 2012.

OLIVEIRA, Liliam Fernandes de et al. **Perfil antropométrico e funcional de velejadores da classe "Optimist"**. Rev. Bras. Educ. Fís. Esporte, São Paulo, v. 25, n. 1, p.173-179, 17 nov. 2010. Trimestral.

PEIXOTO SANTOS, Caroline et al. **Plataforma de força de baixo custo para medição da potência anaeróbia dos membros inferiores em avaliações físicas**

utilizando sensores piezoelétricos. Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Ponta Grossa, ago. 2016.

PEREIRA, Fábio. **Microcontroladores PIC.** 4.ed. SÃO PAULO: Érica, 2006. 358p.

QUININO, Roberto C.; REIS, Edna A.; BESSEGATO, Lupércio F. **O Coeficiente de Determinação R^2 como Instrumento Didático para Avaliar a Utilidade de um Modelo de Regressão Linear Múltipla.** Belo Horizonte. 2011. 14 p.

SAFARI A, JANAS VF, BANDYOPADHYAY A, KHOLKINE A. **Piezoelectric Transducers and Sensors.** In J. G. Webster. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. Boca Raton: CRC Press, 1999, p. 144-156.

SANTOS, Caroline P. et al. **CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR PIEZOELÉTRICO PARA SUA UTILIZAÇÃO EM DISPOSITIVOS EMBARCADOS.** Seminário de Eletrônica e Automação, Ponta Grossa, ago. 2016.

SAYERS, S. P., HARACKIEWICZ, D. V., HARMAN, E. A. **Cross-validation of three jump power equations.** Medicine & Science in Sports & Exercise, 31(4), 572-577, 1999.

SILVA, António José. **A importância da abordagem científica no treino e competição de nadadores de alto nível na natação pura desportiva: exemplo do salto de partida.** Motricidade, Ribeira de Pena, v. 2, n. 4, p.221-229, 27 fev. 2007. Trimestral.

DA SILVA, Sandro Fernandes et al. **Determinação da potência anaeróbica pico e a potência mecânica na zona do limiar de lactato em sujeitos destreinados.** Coleção Pesquisa em Educação Física, Várzea Paulista, v. 6, n. 2, p.299-304, set. 2007. Trimestral.

SILVA-JUNIOR, Celso José da et al. **Relação entre as potências de sprint e salto vertical em jovens atletas de futebol.** Motricidade, v. 7, n. 4, p.5-13, nov. 2010.

SOLFA, Daniela Ramos; FERREIRA, Fernando Vinícius Leite. **MONITORAMENTO DA CARGA DE TREINAMENTO E RELAÇÃO COM O DESEMPENHO DE**

CORREDORES DE RUA. 2014. 48 f. Monografia (Especialização) - Curso de Educação Física, Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium, Lins, 2014.

VAN HOOREN, B.; ZOLOTARJOVA, J. **The Difference Between Countermovement and Squat Jump Performances.** Journal of Strength and Conditioning Research, v. 31, n. 7, p.2011-2020, jul. 2017. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health).

VARGAS, Dra. Vera do Carmo Comparsi de. **CORRELAÇÃO.** Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Correlacao/Correlacao_Pearson_Spearman_Ke ndall.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2017.

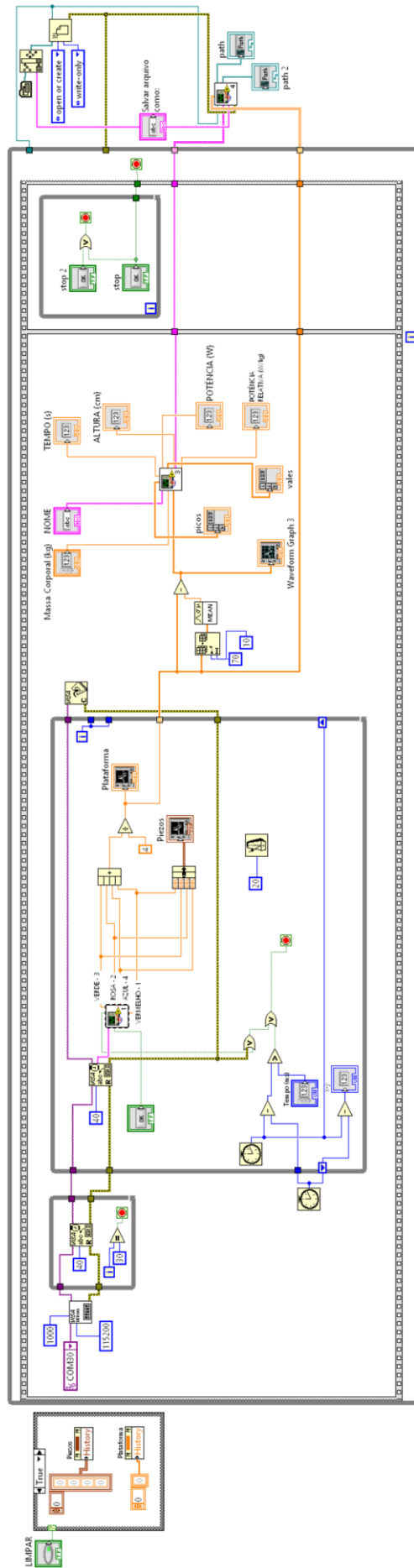
VIEIRA, Mário Elias Marinho; GONÇALVES, Victor Camargo. **MEDIDOR DE POTÊNCIA FISIOLÓGICA PARA CICLISTAS: DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.** 2015. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Eletrônica, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

VIEIRA, Mario Elias Marinho; GONÇALVES, Victor Camargo; STEVAN JR., Sergio Luiz. **A importância de equipamentos tecnológicos em esportes de alto rendimento. Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais.** Ponta Grossa, ago. 2015.

WEBSTER, John G. **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook.** CRC Press LLC, 1999.

WEINECK J. **Treinamento Ideal; instruções técnicas sobre o desempenho fisiológico, incluindo considerações específicas de treinamento infantil e juvenil.** Ed. Manole, Ed.9, Barueri-SP, 2003.

APÊNDICE A – VI desenvolvida no software LabVIEW™.



APÊNDICE B – Tabela contendo todos os valores coletados para validação do tempo de voo, estando destacados os valores com erro percentual máximo e mínimo.

Coleta	Tempo Plat. (s)	Tempo GoPro (s)	Erro (%)
1	0,539717	0,541	0,237%
2	0,534082	0,537	0,543%
3	0,532363	0,537	0,864%
4	0,519720	0,520	0,054%
5	0,534063	0,533	0,199%
6	0,535538	0,537	0,272%
7	0,534022	0,529	0,949%
8	0,531486	0,529	0,470%
9	0,512556	0,520	1,432%
10	0,573118	0,575	0,327%
11	0,554815	0,558	0,571%
12	0,535770	0,533	0,520%
13	0,481489	0,483	0,313%
14	0,583537	0,579	0,784%
15	0,518174	0,520	0,351%
16	0,492308	0,495	0,544%
17	0,559075	0,550	1,650%
18	0,532582	0,529	0,677%
19	0,496274	0,504	1,533%
20	0,576584	0,570	1,155%
21	0,576338	0,575	0,233%
22	0,555630	0,558	0,425%
23	0,578406	0,575	0,592%
24	0,553758	0,550	0,683%
25	0,537741	0,541	0,602%
26	0,574558	0,579	0,767%
27	0,577861	0,575	0,498%
28	0,532413	0,533	0,110%
29	0,398147	0,400	0,463%
30	0,444347	0,441	0,759%
31	0,421377	0,420	0,328%
32	0,422938	0,425	0,485%
33	0,398101	0,400	0,475%
34	0,419804	0,412	1,894%
35	0,424774	0,425	0,053%
36	0,402733	0,408	1,291%
37	0,394539	0,395	0,117%
38	0,380559	0,387	1,664%
39	0,375856	0,379	0,830%
40	0,449493	0,441	1,926%
41	0,414162	0,420	1,390%
42	0,418543	0,420	0,347%
43	0,419165	0,420	0,199%
44	0,405748	0,408	0,552%
45	0,417208	0,416	0,290%

46	0,412189	0,416	0,916%
47	0,390279	0,387	0,847%
48	0,398416	0,395	0,865%
49	0,384179	0,387	0,729%
50	0,469767	0,467	0,593%
51	0,411544	0,417	1,308%
52	0,497154	0,500	0,569%
53	0,498325	0,500	0,335%
54	0,501768	0,500	0,354%
55	0,545252	0,550	0,863%
56	0,475893	0,483	1,471%
57	0,479574	0,483	0,709%
58	0,444583	0,450	1,204%
59	0,492605	0,500	1,479%
60	0,520235	0,517	0,626%
61	0,480963	0,483	0,422%
62	0,503010	0,500	0,602%
