



UnB

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

CAMPUS DARCY RIBEIRO

FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM EDUCAÇÃO FÍSICA

VICTOR OLIVEIRA CORRIERI DE MACEDO

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM APLICATIVO PARA ESTIMAR A
ALTURA DO SALTO VERTICAL POR GRAVAÇÕES DE ÁUDIO

Brasília

2023

VICTOR OLIVEIRA CORRIERI DE MACEDO

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM APLICATIVO PARA ESTIMAR A
ALTURA DO SALTO VERTICAL POR GRAVAÇÕES DE ÁUDIO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Educação Física, da Universidade de Brasília, para a obtenção do título de Mestre em Educação Física na área de concentração Atividade Física e Esporte.

Orientador: Prof. Dr. Amilton Vieira

Coorientador: Prof. Dr. Roberto de Souza
Baptista

Brasília

2023

Victor Oliveira Corrieri de Macedo

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM APLICATIVO PARA ESTIMAR A
ALTURA DO SALTO VERTICAL POR GRAVAÇÕES DE ÁUDIO

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora
composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Amilton Vieira
Universidade de Brasília - UnB

Prof. Dr. Cláudia Ochoa
Universidade de Brasília - UnB

Prof. Dr. Juliano Dal Pupo
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de mestre em Educação Física.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Amilton Vieira
Orientador
Brasília, 2023

AGRADECIMENTOS

Confesso que foi um grande desafio escrever essa parte. Pensei no começo em fazer algo genérico e direto, pois me parece um esforço perdido, não teria memória nem espaço suficiente para agradecer todo mundo que de alguma forma contribuiu nessa jornada. Qualquer tentativa me parecia ser fadada a superficialidade ou a frustração inevitável de esquecer alguém importante. Nesses pouco mais de dois anos tive inúmeras interações interessantes, altos e baixos, acertos e erros, foram tantos eventos importantes que é quase impossível atribuir em retrospectiva a contribuição exata de cada um deles para chegar aqui. Mas entendi que mesmo imperfeito, essa é uma parte importante, pois ainda que ninguém leia, é uma forma de refletir e registrar um pouco sobre todo esse processo. Então, com uma pequena ajuda de modelos de linguagem, mas sem perder a essência da mensagem, encaro esse desafio.

Tenho que começar agradecendo meus pais, Leandro e Flávia. Tive uma educação impecável, muito melhor do que poderia imaginar. Sem nunca me obrigar a nada, me deram todo o suporte que precisei e me incentivaram a tomar minhas próprias decisões, seguir o caminho que fazia sentido para mim, e por isso, sou eternamente grato. Vocês são pessoas muito diferentes, mas igualmente incríveis, cada um do seu jeito, aprendo todo dia com vocês e espero um dia chegar próximo da pessoa que são. Quero também agradecer a meus irmãos que, talvez sem perceber, me incentivam todos os dias a ser um bom exemplo e me esforçar para ser a melhor pessoa possível. Agradeço à minha família que sempre me apoiou e ajudou em tudo que precisei, em especial ao meu primo Diogo (um dos meus ídolos desde a infância) e minha tia Carla, que me acolheram por um período crucial desta jornada.

Estendo minha gratidão aos meus amigos, tive a sorte de conhecer, me aproximar ou reaproximar de várias pessoas nesse período, todos vocês contribuíram de alguma forma para minha formação e para a elaboração deste trabalho. Seria impossível mencionar todos vocês, então vou me ater aos que tiveram contribuição mais direta nesse processo. Aos meus amigos Carlos e Erick pelas todas as longas conversas e discussões enriquecedoras, ao Ricardo pelos inúmeros conselhos valiosos, ao Guilherme por toda parceria e pelo trabalho incrível das fotos do Jumbo 2, vocês são grandes referências para mim. Também aos amigos dos vários grupos de esporte que participei, o esporte teve um papel fundamental nesse processo e na minha vida e a companhia de vocês fez esse caminho ser muito mais prazeroso. Um agradecimento especial também à minha psicóloga pelo suporte contínuo nesse processo.

Queria destacar meus colegas de laboratório, que compartilharam comigo e me ajudaram nos desafios do dia a dia da pesquisa, especialmente o Alexandre, Carlos, Lucas, Rafael e Sávio. Também aos meus amigos de faculdade, que me desafiaram e apoiaram em toda formação, mas em especial ao Gabriel e o Ian, que foram fundamentais neste processo. Aos colegas de trabalho do Health Data Lab no SIDIA, meu sincero agradecimento por todo suporte nos momentos finais do mestrado, aprendi muito esses últimos meses e não teria chegado aqui sem vocês, e em especial aos meus colegas de apartamento Augusto e João, pelo apoio nas longas noites finalizando esse trabalho e a Amandia por me emprestar o iPad para testar o Jumbo 2!

Queria agradecer também a todos os professores que participaram da minha formação, mas em especial aos professores Cristiano Miosso, Lauro Vianna, Leonardo Lamas e Jake do Carmo, vocês abriram minha mente e, muito além do conteúdo passado com excelência, deram aula de humildade e me ensinaram a ter gosto por aprender e por ensinar, muito obrigado. Por fim, não poderia deixar de expressar minha gratidão a meus orientadores, Amilton Vieira e Roberto Baptista. A orientação, o suporte e o conhecimento que vocês compartilharam foram imprescindíveis para a realização deste trabalho e muito mais do que poderia esperar de uma orientação.

Esta jornada de aprendizado e construção não teria sido possível sem a contribuição de todos vocês, de todos os autores de livros que li, podcasts que ouvi, vídeos que assisti. De todos os infinitos caminhos que essa jornada poderia ter tomado, fico feliz de ter acontecido assim. Portanto, agradeço sinceramente a cada um de vocês.

Este estudo foi financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) e pela Fundação de Apoio a Pesquisa (FUNAPE).

RESUMO

A avaliação do salto vertical é fundamental na área esportiva e de condicionamento físico, pois permite avaliar parâmetros como a potência dos membros inferiores, os efeitos do treinamento e a fadiga muscular. Aplicativos móveis podem medir com acurácia e confiabilidade a altura do salto a partir de vídeos capturados em câmera lenta, porém esses aplicativos requerem a identificação manual dos momentos de decolagem e aterrissagem, que pode ser demorada e suscetível ao erro humano. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um novo método para estimar a altura do salto automaticamente a partir do som produzido, usando técnicas de processamento de áudio. Foi investigada a validade concorrente do método de áudio (A) em comparação com estimativas de altura do salto pela plataforma de força, aplicando os métodos de tempo de voo (FT) e impulso-momentum (J), considerado o "padrão-ouro". Cinquenta participantes (26 ± 9 anos) saltaram sobre uma plataforma de força (método critério) enquanto um celular gravava o som do salto. Para a coleta e processamento dos sinais da plataforma de força, uma interface customizada foi desenvolvida. A validade foi determinada por análise de regressão, coeficiente de correlação de Pearson (r) e erro padrão da estimativa (SEE). Foram encontradas correlações quase perfeitas entre o áudio e FT ($r = 0.99$, $SEE = 1,4$ cm) e J ($r = 0.96$, $SEE = 2,2$ cm). Os resultados mostram que a altura do salto pode ser medida com acurácia e rapidez a partir da gravação de áudio em um aplicativo móvel automatizado. Esse método foi implementado em um aplicativo móvel (Jumpo 2), disponibilizado gratuitamente nas plataformas Android e IOS.

Palavras-chave: aplicativos móveis; teste de esforço; aptidão física funcional.

ABSTRACT

Vertical jump assessment is crucial in the field of sports and physical conditioning, as it allows the evaluation of parameters such as lower limb power, training effects, and muscle fatigue. Mobile apps can accurately and reliably measure jump height from slow-motion captured videos. However, these apps require a manual identification of the take-off and landing frames, which can be time-consuming and susceptible to human error. This study aimed to develop a novel method for automatically estimating jump height from the sound produced, using audio processing techniques. The concurrent validity of the audio method (A) was investigated compared to jump height estimates from a force platform, applying the flight time (FT) and impulse-momentum (J) methods, considered the "gold standard". Fifty participants (26 ± 9 years) jumped onto a force platform (criterion method) while a mobile phone recorded the jump sound. A custom interface was developed for collecting and processing force platform signals. Validity was determined by regression analysis, Pearson correlation coefficient (r), and standard error of estimate (SEE). Near-perfect correlations were found between the audio and FT ($r = 0.99$, $SEE = 1.4$ cm) and J ($r = 0.96$, $SEE = 2.2$ cm) methods. The results show that jump height can be measured accurately and quickly from an audio recording using an automated mobile app. This method was implemented in a mobile app (Jumbo 2), made freely available on Android and IOS platforms.

Keywords: mobile applications; exercise test; functional physical fitness

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Atributo de Decolagem
AD_AF	Atributo de Decolagem dos componentes de alta frequência
AD_BF	Atributo de Decolagem dos componentes de baixa frequência
App	Aplicativo móvel
cm	Centímetro
CM	Centro de Massa
dB	Decíbel
DP	Desvio Padrão
DPP	Desvio Padrão da Pesagem
EPE	Erro Padrão da Estimativa
fps	Frames Quadros por segundo
FRS	Força de Reação com o Solo
FRSv	Força de Reação com o Solo Vertical
HSD	Diferença Honestamente Significativa
Hz	Hertz
IC	Intervalo de Confiança
J	Impulso
kg	Quilograma
kHz	Quilo-Hertz
m	Metro
ms	Milisse segundos
N	Newton
s	Segundo
t	Tempo
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
SCM	Salto Com Contramovimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivo	11
1.3	Hipótese	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	Teste do Salto Vertical.....	13
2.2	Análise da Curva Força-Tempo.....	14
2.3	Análise de Espectrograma	17
2.4	<i>Spectral Gating</i>	18
3	MÉTODOS.....	21
3.1	Amostra.....	21
3.2	Desenho do estudo e procedimentos.....	21
3.3	Método critério	22
3.4	Processamento de áudio.....	25
3.5	Análise estatística	28
4	RESULTADOS	30
5	DISCUSSÃO	33
6	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS	37
	APÊNDICE I – TCLE.....	42
	APÊNDICE II – Interface.....	44
	APÊNDICE III – Jumo 2.....	47

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento do desempenho físico é fundamental em cenários de saúde e esportes, sendo o teste do salto vertical uma das avaliações mais diretas, rápidas e informativas disponíveis. O salto vertical é amplamente adotado na ciência do esporte, educação física e reabilitação (BAPTISTA; ZYMBAL; JANZ, 2022; KIBELE, 1998; LEE; VELTHOFF; WELK, 2022) e pode ser realizado por crianças, adolescentes e idosos, sejam eles atletas, fisicamente ativos ou sedentários (DRISS et al., 2001; HAGUENAUER; LEGRENEUR; MONTEIL, 2005; KONS et al., 2018; LAURSON et al., 2022; SINGH et al., 2014). O desempenho do salto tem sido frequentemente associado ao desempenho esportivo e/ou usado para monitorar a fadiga, a prontidão e os efeitos dos programas de treinamento (CLAUDINO et al., 2017; COUTTS et al., 2007; FRANCESCHI et al., 2020; LOTURCO et al., 2015).

Plataformas de força e sistemas de captura de movimento são considerados o “padrão ouro” para a medição da altura do salto vertical (MOIR, 2008; WADE; LICHTWARK; FARRIS, 2020). Sistemas de captura de movimento, além de custosos, demandam, em geral, ambientes controlados, conhecimento dos *softwares* de aquisição/calibração das câmeras, e rotinas customizadas para o cálculo da altura do salto a partir da trajetória dos marcadores (CHIU; SALEM, 2010). Embora as plataformas de força ofereçam opções portáteis, o custo elevado, aliado à necessidade de aquisição de *softwares* especializados ou de conhecimento técnico para processar os dados de força de reação do solo (CHAVDA et al., 2018; KOZINC; PLEŠA, 2022), tornam a utilização dessa tecnologia impraticável em larga escala, criando uma demanda por soluções alternativas mais simples e de menor custo. Com esse objetivo, diversos equipamentos foram propostos, cada um proporcionando uma relação diferente entre praticidade, acurácia e custo.

Tapetes de contato e sistema optoeletrônicos são equipamento válidos para avaliar o salto de contramovimento (SCM) pelo método do tempo de voo (GLATTHORN et al., 2011; LOTURCO et al., 2017; STANTON et al., 2019). Além de serem fáceis de transportar, também permitem uma alta taxa de amostragem (1 kHz), com preço, em geral, menor do que o das plataformas de força. Unidades inerciais, compostas por acelerômetros, giroscópios e magnetômetros, são frequentemente utilizadas na análise de movimento e podem ser incorporadas em dispositivos vestíveis (*wearables*) (ADESIDA; PAPI; MCGREGOR, 2019). Apesar dos celulares modernos possuírem esse tipo de sensor, o uso dessa tecnologia para a

análise do salto vertical, até o momento, se baseou em sensores externos (e.g. Push Band 2.0®, Vert®). A vantagem desta abordagem é flexibilizar o ambiente de uso, já que as unidades inerciais podem ser presas ao braço ou ao tronco e monitoram apenas o movimento do corpo, sem limitar, necessariamente, o tipo de solo onde o movimento deve ser realizado. Porém, como reportado por (LAKE et al., 2018) para o Push Band 2.0, as medidas obtidas durante o salto vertical por sistemas inerciais devem ser vistas com cautela, pois apresentam baixa concordância com as medidas obtidas na plataforma de força.

Entretanto, equipamentos com *hardware* próprio, como os citados anteriormente, são menos acessíveis, devido à dificuldade logística e preços elevados, além de requisitarem eventuais manutenções. Com a vasta maioria das pessoas já possuindo um *smartphone*, aplicativos móveis (Apps) como o My Jump 2® e o Jumbo 2 são soluções atrativas. Ambos aplicativos usam vídeos para a análise do salto vertical, em que o usuário informa os quadros em que ocorreram a decolagem e a aterrissagem do movimento. O sistema calcula o tempo de voo a partir da taxa de quadros por segundo (fps) com que o vídeo foi gravado. O tempo de voo permite estimar a altura do salto por meio de equações da física newtoniana para um corpo sujeito apenas a aceleração da gravidade. Esse método foi validado com vídeos gravados em câmera lenta (240 Hz) para os aplicativos My Jump e Jumbo 2, quando comparado com a plataforma de força (BALSALOBRE-FERNÁNDEZ; GLAISTER; LOCKEY, 2015; VIEIRA et al., 2023). Apesar do baixo custo e da validade da medida, esse método introduz erros intra e inter-avaliadores, principalmente na escolha errada dos quadros, e pode ser considerado demorado para aqueles que medem mais de um indivíduo em sequência.

Pueo, Lopez, Jimenez-Olmedo (2019) propuseram um sistema de identificação da altura do salto vertical usando sinais de áudios coletados pelo microfone de um *smartphone*. Embora o som gerado seja um subproduto secundário do salto e possa ser mínimo em alguns casos, é possível, no contexto de uma avaliação de salto, intensificar esse som de forma proposital, sem afetar o teste. Esta estratégia contrasta com a medição de saltos realizados durante a prática esportiva, onde a manipulação intencional do som pode não ser praticável ou apropriada. Assim, no estudo citado, os participantes saltaram sob uma superfície rígida e usaram uma fita adesiva na ponta da sola do tênis. A fita tinha pouca aderência para não atrapalhar o salto, mas produzia um som distinguível que facilitava a detecção do instante da decolagem por meio do algoritmo proposto. Esse sistema, comparado com um tapete de contato

já validado, mostrou uma correlação quase perfeita ($r = 0.996$) e tem a vantagem de possibilitar maior resolução temporal na detecção, com a taxa de 48 kHz, comum para sinais de áudio. Todavia, até o conhecimento do autor, essa solução ainda não foi disponibilizada como um aplicativo de *smartphone*.

1.1 Justificativa

O salto vertical é um teste simples e eficiente, com grande relevância para a avaliação do desempenho humano. Com a popularidade e o fácil acesso aos *smartphones*, aplicativos para estes dispositivos tendem a serem amplamente utilizados por profissionais e entusiastas do exercício. Dessa forma, Apps para a análise do salto vertical possibilitam maior alcance para população, produzindo informações relevantes e de fácil utilização pelos usuários. Porém, os aplicativos disponíveis atualmente necessitam de gravações em câmera lenta para fornecer uma medida válida, uma funcionalidade que não está disponível em todos os celulares, e requerem muita interação com o usuário, deixando-os suscetíveis a erro humano. Além disso, um processo semiautomático de marcação dos quadros do vídeo deixa a análise mais lenta e trabalhosa, dificultando a avaliação de múltiplos saltos e atrasando o feedback para o usuário.

A solução proposta por Pueo, Lopez, Jimenez-Olmedo (2019) se mostrou promissora comparada com o tapete de contato, mas impôs a restrição da fita adesiva na sola do pé para tornar o som da decolagem evidente. Um avanço necessário é comparar um método baseado em áudio com a plataforma de força, usando tanto o tempo de voo quanto o método mais acurado para medir a altura do salto vertical com base na relação impulso-momentum. Ainda, o novo sistema desenvolvido pode ser incorporado no aplicativo Jumpo 2, desenvolvido pelo autor (APÊNDICE III – Jumpo 2), disponível gratuitamente para a comunidade.

1.2 Objetivo

No contexto apresentado, esta dissertação de mestrado tem como objetivo a investigação de técnicas de processamento de áudio para o desenvolvimento de um aplicativo automático de estimação da altura do salto. Tem-se o trabalho de Pueo, Lopez, Jimenez-Olmedo (2019) como ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema que será validado tanto em ambiente fechado como aberto. Além disso, será avaliado se o uso da fita adesiva realmente melhora a identificação do momento de decolagem. A melhor solução encontrada será então embarcada no App Jumpo 2, disponibilizado gratuitamente nas plataformas Android e IOS.

Espera-se com este trabalho proporcionar formas válidas e mais simples de avaliar o salto vertical, que também sejam acessíveis fisicamente e financeiramente para a maior parte população. Além disso, a proposta de um aplicativo tem o potencial inovador de permitir a avaliação em tempo real da altura do salto pelo celular, fornecendo um *feedback* imediato para os avaliadores e os avaliados.

1.3 Hipótese

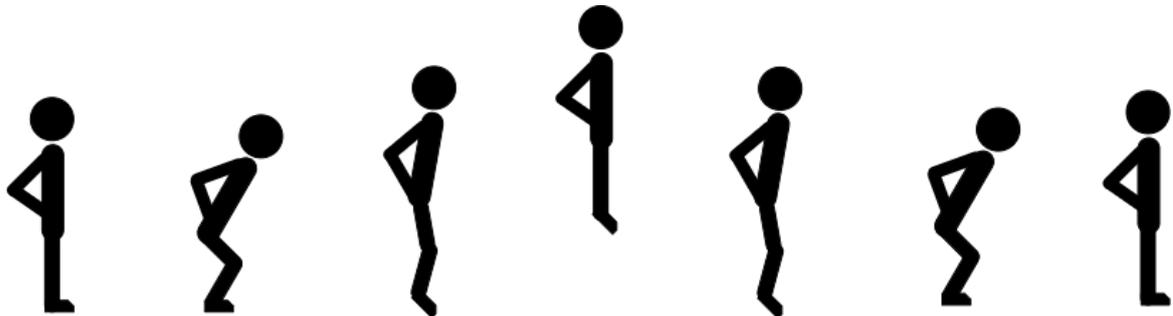
A hipótese deste estudo é de que será possível criar um App para avaliar o salto vertical por meio de gravações de áudio e que essa solução terá validade próxima ou melhor que as outras aplicações baseadas em vídeo. Além disso, espera-se que o uso da fita adesiva no pé e a realização do teste no ambiente fechado será a condição de menor erro do sistema quando comparado com a plataforma de força.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teste do Salto Vertical

O teste de salto vertical é amplamente reconhecido na literatura científica e na prática esportiva como um meio válido e confiável para mensurar o desempenho dos membros inferiores, particularmente no que diz respeito à força explosiva e à potência muscular (BOULLOSA et al., 2018; LOTURCO et al., 2016; MERRIGAN et al., 2021; WARR et al., 2020). Dentre os diversos tipos de saltos verticais, o salto de contramovimento (SCM) destaca-se por sua utilidade e facilidade de implementação, fornecendo uma avaliação valiosa a respeito do status neuromuscular e da capacidade de utilização do ciclo alongamento-encurtamento (CLAUDINO et al., 2017; FLORÍA et al., 2016; MERRIGAN et al., 2021). O SCM envolve um movimento de flexão do joelho (contramovimento) seguido por uma extensão rápida em um movimento contínuo, em geral, sem envolver o movimento dos braços (Figura 1).

Figura 1: Ilustração de um salto de contramovimento (SCM).



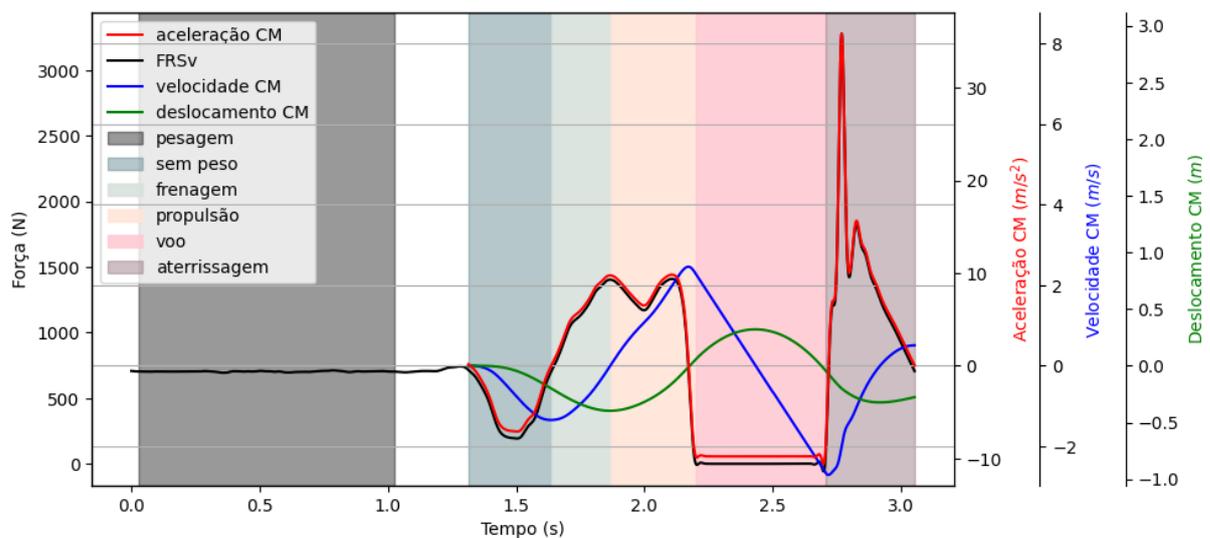
Fonte: elaboração própria.

Diversas variáveis mecânicas podem ser extraídas da avaliação do SCM, as quais podem ser associadas com habilidades esportivas (LOTURCO et al., 2019; SUCHOMEL et al., 2018). Contudo, a variável mais reportada em estudos é a altura do salto devido a sua alta confiabilidade (CARROLL et al., 2019; CLAUDINO et al., 2017). Tipicamente, a avaliação do SCM é realizada em tapetes de contato ou plataformas de força, sendo as plataformas de força mais recomendadas por permitir a avaliação da altura pela relação impulso-momentum e a obtenção de outras variáveis derivadas das forças de reação com o solo (FRS) (LINTHORNE, 2001).

2.2 Análise da Curva Força-Tempo

A curva força-tempo, obtida a partir de uma plataforma de força, oferece uma avaliação detalhada da mecânica do SCM (CORMIE; MCBRIDE; MCCAULLEY, 2009; GATHERCOLE et al., 2015; MCMAHON et al., 2017; MCMAHON; REJ; COMFORT, 2017). Plataformas de força registram a força atuando sobre elas (*i.e.*, FRS), em geral, em três eixos. Porém, considerando a verticalidade do salto SCM, apenas um eixo é comumente avaliado. A partir da determinação da massa corporal do saltador e então aplicando a 2ª lei de Newton, torna-se possível inferir a aceleração, velocidade e deslocamento do centro de massa (CM) durante o salto, a partir da FRS vertical (FRS_v) (LINTHORNE, 2001). Nesse caso, a própria plataforma de força pode servir como uma balança de precisão para medir a massa do saltador logo antes do salto, em uma fase inicial de pesagem.

Figura 2: Fases de um salto de contramovimento (SCM) representada pela força vertical de reação com o solo (FRS_v) e os sinais de aceleração, velocidade e deslocamento do centro de massa (CM) em função do tempo.



Fonte: elaboração própria.

Com o intuito de entender melhor a dinâmica do SCM, pode-se dividir o movimento em cinco fases: sem-peso, frenagem, propulsão, voo e aterrissagem (MCMAHON et al., 2018a). Conforme ilustrado no gráfico da Figura 2, pode-se caracterizar cada uma das fases a partir de uma análise de grandezas como sua duração, força média, máxima, impulso ou o padrão da curva (e.g., unimodal, bimodal) (GATHERCOLE et al., 2015; LAKE; MCMAHON, 2018; MERRIGAN et al., 2021; WARR et al., 2020). Treinadores e pesquisadores podem estudar e manipular essas métricas para compreender sua contribuição para o desempenho do salto (e.g.,

altura do salto) e auxiliar na prescrição do treinamento, conforme as demandas de cada esporte (e.g., maior deslocamento, menor duração do movimento, maior estabilidade na aterrissagem etc.). No entanto, a acurácia dessas medidas está diretamente relacionada com a acurácia da identificação do momento de início e fim de cada fase. Essa análise pode ser realizada por *softwares* comerciais especializados em SCM, porém, considerando os custos associados, pesquisadores costumam usar rotinas próprias de processamento (CHAVDA et al., 2018). O APÊNDICE II – Interface apresenta o programa de aquisição e processamento desenvolvido em Python, para plataformas de força AMTI Accupower, usada neste trabalho.

A variável de interesse neste estudo é a altura do salto, que pode ser definida como a diferença na posição vertical do CM no ápice do salto para a posição parada em pé ou para posição no instante de decolagem (VANRENTERGHEM; DE CLERCQ; VAN CLEVEN, 2001; WADE; LICHTWARK; FARRIS, 2020). Neste trabalho, será adotada a segunda definição, desconsiderado a elevação do CM devido a flexão plantar. Existem quatro métodos principais para determinar a altura do salto vertical (h) pela plataforma de força: tempo de voo (FT), impulso-momentum (J), relação trabalho-energia (W) e variação da posição do CM no sinal de deslocamento (I) (CHIU; DÆHLIN, 2020; LINTHORNE, 2001). Os três primeiros métodos calculam a altura do salto a partir da velocidade no instante da decolagem, de acordo com o princípio da conservação da energia mecânica (LINTHORNE, 2001):

$$\frac{1}{2}mv_d^2 + mgh_d = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgh_f$$

onde m é a massa do saltador, h_d e v_d são a posição e velocidade do CM no instante da decolagem, enquanto h_f e v_f são a posição e velocidade do CM no ápice do salto, respectivamente. Considerando que v_f é zero e manipulando a equação, pode-se estabelecer a relação entre o deslocamento do CM ou altura do salto h e v_d como:

$$h = \frac{v_d^2}{2g}$$

O método FT se baseia na física clássica, considerando o lançamento vertical de um corpo rígido sendo afetado apenas pela força da gravidade, definido como:

$$v_d = \frac{gt}{2}$$

onde h é a altura do salto, g é a aceleração da gravidade e t é o tempo de voo. Consequentemente, pode-se representar a altura do salto pelo método FT (h_{FT}) como:

$$h_{FT} = \frac{gt^2}{8}$$

Já o método J se baseia no teorema do impulso-momentum, o qual assume que a integral da força pelo tempo (impulso) produz uma variação de momento Δp . Aplicando essa relação no período de contato com o solo, ou seja, do início movimento até o momento de decolagem, e considerando que o momento p_i no início do movimento é zero (velocidade zero), tem-se que:

$$\int_{t_i}^{t_d} (f(t) - mg) dt = mv_d$$

onde $f(t)$ é o sinal de força-tempo e a integral está sendo avaliada do instante de início do movimento t_i até o instante de decolagem t_d . Dessa forma, a altura do salto pelo método J pode ser calculada como:

$$h_J = \frac{\left(\int_{t_i}^{t_d} \left(\frac{f(t)}{m} - g \right) dt \right)^2}{2g}$$

Semelhante ao método anterior, o método W considera que a integral da força pelo deslocamento (trabalho) produz uma variação de energia cinética no corpo. Assim, o trabalho resultante do movimento, ou seja, trabalho feito na direção do movimento (pela força aplicada pelo saltador) menos o trabalho realizado pela ação da gravidade, deve ser igual a variação de energia cinética. Considerando o mesmo período de contato com o solo e sabendo que a energia cinética no início do movimento é zero, tem-se que:

$$\int_{y_i}^{y_d} (f(y) - mg) dy = \frac{1}{2} mv_d^2$$

onde y representa o deslocamento e $f(y)$ o sinal de força-deslocamento. Manipulando a equação acima e substituindo na relação encontrada entre v_d e h , é possível definir a altura do salto pelo método W (h_W) como:

$$h_W = \frac{\int_{y_i}^y \left(\frac{f(y)}{m} - g \right) dy}{g}$$

Por fim, o método I é realizado por meio da dupla integração do sinal de aceleração do CM, obtido dividindo o sinal de força $f(t)$ pela massa do saltador (m) e subtraindo a ação da gravidade, tem-se que o deslocamento do CM pelo tempo $y(t)$ pode ser definido como:

$$y(t) = \iint \left(\frac{f(t)}{m} - g \right) dt dt$$

A integral dupla que define o sinal de deslocamento pode ser computada entre o início do movimento e o instante de aterrissagem. O valor máximo de $y(t)$, subtraído da posição no momento da decolagem (desconsiderando o deslocamento por flexão plantar), representa a altura do salto:

$$h_I = \max[y(t)] - y(t_d)$$

onde \max é uma função que calcula o valor máximo de um sinal.

Dentre os quatro métodos descritos, FT é o mais simples de encontrar, já que requer apenas uma boa identificação do momento sem carga na plataforma de força (FRS ~ 0 N). Porém, esse método tende a superestimar a altura do salto, pois a altura do CM no momento de aterrissagem pode ser menor do que na decolagem (LINTHORNE, 2001; WADE; LICHTWARK; FARRIS, 2020). Ambos os métodos W e I estão suscetíveis aos erros inerentes a dupla integração de um sinal com ruído, e, portanto, devem ser analisados com cautela. Já o método J, apesar de depender de uma integração numérica e boa identificação do início do movimento, pode ser considerado o método mais acurado e “padrão ouro” para a avaliação da altura pela plataforma de força (LINTHORNE, 2001).

2.3 Análise de Espectrograma

O processamento de sinais de áudio frequentemente ocorre com técnicas que se baseiam em análise espectral. Isto é, avalia-se a informação contida no sinal por meio de seus componentes em frequência. No caso de sinais digitais, a literatura dispõe de diferentes formulações da Transformada de Fourier que possibilitam estudar um sinal discreto a partir de

sua decomposição em componentes senoidais. Estas ferramentas matemáticas produzem diferentes representações de um mesmo sinal, enfatizando informações de modo a favorecer a identificação de características e padrões desejados (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999). Ressalta-se que essas operações de transformação preservam o conteúdo do sinal, mas mudam o domínio em que o ele é representado: tempo ou frequência.

Comumente, sinais de áudio são não-estacionários, ou seja, as suas características espectrais tendem variar ao longo do tempo, de acordo com conteúdo que é gravado. Entretanto, ao observar um sinal digital no domínio da frequência por meio de sua transformada de Fourier, tem-se uma visão global de como sua energia está distribuída entre as frequências, sem que seja possível localizar temporalmente possíveis eventos de interesse (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999). No caso de sinais de áudios captados durante a execução de um SCM, há informações relevantes tanto no domínio da frequência (padrão espectral do som produzido na decolagem e aterrissagem) quanto no domínio do tempo (localização temporal dos momentos de interesse). Portanto, algoritmos que avaliam áudio para extração de características de um SCM podem se aproveitar das representações dos sinais em ambos os domínios

O espectrograma é uma representação que permite observar a evolução dos componentes espectrais de um sinal ao longo do tempo. Ele pode ser obtido calculando a transformada de Fourier de segmentos do sinal, cujo tamanho é escolhido de forma que tenham comportamento próximo ao estacionário. Tipicamente, os espectrogramas são representados como imagens, em que uma de suas dimensões corresponde ao eixo de frequências, e a outra ao eixo de tempo. O valor de cada pixel dessa imagem é atribuído de acordo com a magnitude da transformada de Fourier para o par tempo/frequência correspondente. A Figura 3 apresenta espectrogramas extraídos de uma gravação de áudio de um SCM. O algoritmo que será proposto nesta dissertação avalia o espectrograma de um sinal de áudio para identificar os momentos de decolagem e aterrissagem e, então, estimar a altura do SCM gravado.

2.4 Spectral Gating

A redução de ruído é um aspecto significativo do processamento de sinais de áudio, abrangendo uma variedade de técnicas projetadas para minimizar sons indesejados, como ruído ambiente ou artefatos de gravação. Existem várias estratégias para aplicar a redução de ruído que dependem do conhecimento sobre as características do ruído e do sinal. Filtros fixos podem ser usados quando se tem conhecimento prévio tanto do sinal quanto do ruído esperado,

enquanto filtros adaptativos são usados quando é necessário alterar os parâmetros do filtro para uma determinada situação, requerendo pouca ou nenhuma informação sobre as características do sinal ou ruído (WIDROW et al., 1975).

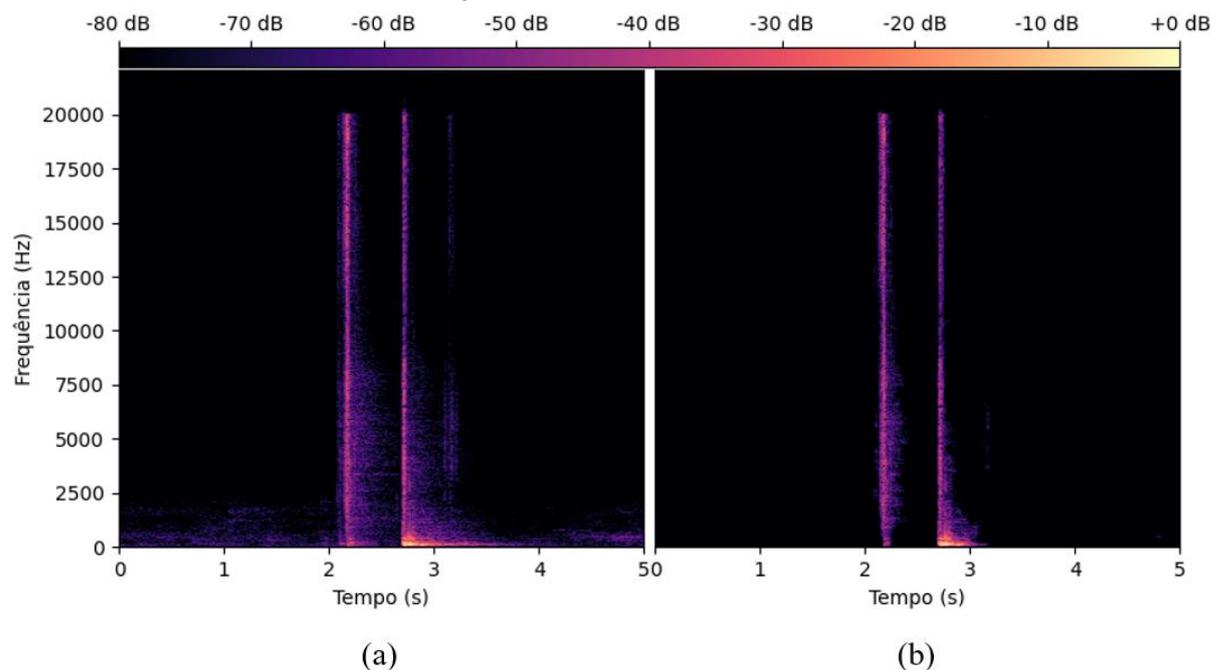
Uma redução de ruído adaptativa pode ser estacionária, caso se adapte apenas uma vez para um sinal, ou não estacionária, se for constantemente ajustada com base em um fluxo de entrada. Essa escolha também precisa levar em conta se a aplicação é projetada para ser executada em tempo real ou *offline*. Além disso, técnicas podem funcionar no domínio do tempo, como *noise gates*, onde o sinal é cancelado se não atingir uma determinada amplitude, ou no domínio da frequência, como filtros de rejeição de banda que filtram frequências indesejadas específicas. Existem também técnicas mais robustas como o filtro Wiener que tentam modelar estatisticamente as propriedades do ruído e do sinal, sob o contexto de estimação ótima. Porém, esse tipo de filtro opera sob a suposição de que o sinal e o ruído são de segunda ordem estacionários (média e variância são invariantes no tempo, ou seja, não mudam ao longo do tempo), e que o sinal e o ruído são não correlacionados (WIDROW et al., 1975).

Outro método simples, mas eficaz, é o *spectral gating*, que pode ser usado em várias aplicações em que as características de frequência do ruído são suficientemente diferentes do sinal, mas podem mudar dependendo do ambiente (SAINBURG; THIELK; GENTNER, 2020). O *spectral gating* funciona de maneira semelhante aos *noise gates*, mas no domínio da frequência. Ao invés de definir *gates* ou limiares para a amplitude do sinal no tempo, calcula-se esses limiares para várias faixas de frequência do sinal. E esses limiares podem ser ajustados a partir de uma amostra de ruído, o que é eficaz se as características do ruído em todo o sinal não variarem em relação à amostra de ruído. Para uma abordagem estacionária *offline*, este método pode receber uma amostra inicial de ruído, calcular os limiares de frequência com base nas características de frequência encontradas na amostra e aplicar os limiares para filtrar a gravação de áudio no domínio da frequência.

Para o contexto deste estudo, o cancelamento do ruído do áudio do salto pode ser enquadrado como uma abordagem adaptativa estacionária *offline*. Dada a curta duração de um salto desde a preparação até a aterrissagem (~3s), é razoável supor que o ruído de fundo não varie drasticamente ao longo do salto. Ou pelo menos, se variar (ou seja, se ocorrer um som incomum no momento do salto), o usuário deverá ser capaz de perceber e optar por refazer o salto. Portanto, *spectral gating* parece uma técnica promissora para esta tarefa, já que a amostra

de ruído pode ser adquirida durante a preparação para o salto (~1s), onde o sinal relativo ao salto deve ser nulo e o áudio é representativo do ruído de fundo esperado ao longo do salto. O efeito dessa abordagem no espectrograma da gravação do salto vertical da Figura 3a, pode ser observado no espectrograma filtrado da Figura 3b, onde as linhas verticais dos momentos de decolagem e aterrissagem foram enfatizadas e o ruído ambiente, amostrado no início do sinal, foi reduzido. Neste trabalho, foi usando uma biblioteca Python de redução de ruído por *spectral gating* de código aberto (SAINBURG, 2019).

Figura 3: Espectrogramas de uma gravação de áudio de um salto vertical. (a) Espectrograma original obtido diretamente pela gravação do salto. (b) Espectrograma da gravação do salto filtrado aplicando a técnica de redução de ruído *spectral gating*.



Fonte: elaboração própria.

3 MÉTODOS

3.1 Amostra

Cinquenta participantes (12 mulheres) foram recrutados (26 ± 9 anos, 174 ± 8 cm, 74 ± 12 kg). Embora 10 participantes fossem suficientes, considerando a correlação de 0,9 encontrada na validação de testes pilotos (HOPKINS, 2020), expandimos a amostra para permitir uma análise exploratória mais detalhada dos dados de áudio do salto. O estudo cumpriu com a Declaração de Helsinki e foi aprovado pelo Comitê de Ética do Centro Universitário UDF (número de aprovação 2.878.364). Todos os participantes concordaram com o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) (APÊNDICE I – TCLE).

3.2 Desenho do estudo e procedimentos

Este é um estudo de validade concorrente, conduzido em um ambiente fechado e em outro aberto. O teste em ambiente fechado ocorreu em uma sala fechada, sem cadeiras ou mesas e com espelhos nas paredes e janelas de vidro, usada para aulas de dança, com dimensões 10 x 20 x 3,3 m e baixo ruído de ambiente. O teste em ambiente aberto ocorreu em um pátio aberto, onde o ruído ambiente era menos controlado (e.g., carros distantes, pessoas conversando, passos, pássaros, vento). Ainda assim, todos os testes foram realizados durante períodos silenciosos da manhã (6 às 8h) ou da tarde (18 às 20h), para minimizar possíveis ruídos externos.

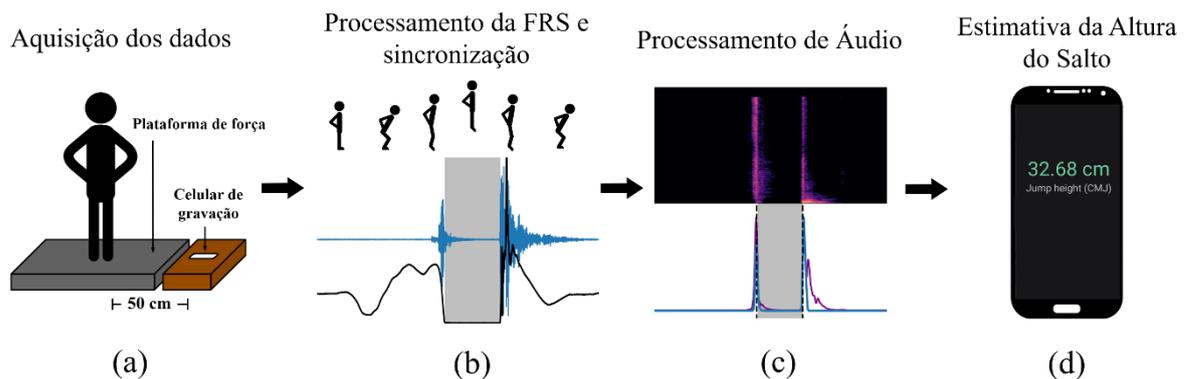
Os participantes executaram oito saltos SCM por ambiente e foram instruídos a colocar as mãos nos quadris e, a partir de uma posição ereta, realizar um movimento para baixo seguido pelo salto em um movimento contínuo. Para os primeiros quatro saltos, os participantes usaram a fita adesiva em formato de laço (~5 cm), colocada na sola do pé direito, na região da cabeça do metatarso. Se o laço da fita não aderisse adequadamente à sola do pé, a fita era enrolada ao redor do pé, na mesma região. Todos os saltos foram realizados descalços. Após completar o quarto salto, o participante foi instruído a remover a fita adesiva do pé para executar os quatro últimos saltos. Pedia-se aos participantes que permanecessem em silêncio durante os procedimentos de teste em ambos os ambientes.

A altura do salto foi medida simultaneamente pela plataforma de força, usando os métodos do tempo de voo (FT) e do impulso-momentum (J), e pelo celular usando o método de processamento áudio (A). Antes de cada salto, os participantes permaneciam imóveis enquanto

o instrutor monitorava os dados de força-tempo e permitia que o participante iniciasse cada salto apenas após a estabilização do sinal, para garantir uma fase de pesagem adequada.

Os dados de áudio foram gravados usando um *smartphone* Samsung S10 Lite, posicionado a 50 cm de distância, no mesmo nível vertical e com o microfone direcionado para a sola do pé direito do participante. A taxa de amostragem da gravação foi de 44,1 kHz. Para o teste de critério, foi utilizada uma plataforma de força portátil AccuPower (AMTI, Watertown, MA, EUA), amostrada a 1 kHz. No começo de cada coleta, foi realizada uma batida com um bastão na plataforma de força, para gerar um pico no sinal de força e no sinal de áudio. Esses picos possibilitaram uma sincronização aproximada dos sinais, utilizada para propósitos de visualização e análise exploratória dos dados. Após a coleta, outra rotina identificou os picos de sincronização e segmentou/sincronizou cada gravação de áudio e força do salto. Todos os 800 saltos (50 participantes x 8 saltos x 2 ambientes) segmentados foram inspecionados visualmente para seus padrões de sinal de áudio e força usando a interface de aquisição (APÊNDICE II – Interface) para identificar e corrigir quaisquer erros de segmentação. Uma visão geral do desenho do estudo é mostrada na Figura 4.

Figura 4: Visão geral do desenho do estudo. (a) Aquisição dos dados de força e áudio durante o protocolo. (b) sincronização dos sinais de força e áudio, e processamento da curva força tempo para obter referência da altura do salto. (c) Processamento de áudio baseado na redução de ruído e análise de espectrograma. (d) Altura do salto estimada pelos momentos de decolagem e aterrissagem no som, implementado no aplicativo Jumpo 2.



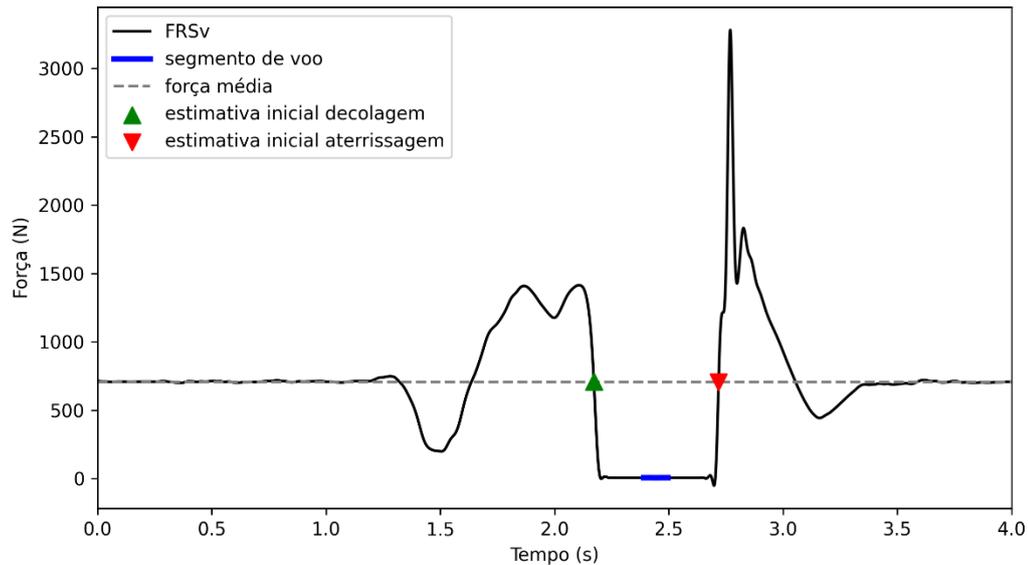
Fonte: elaboração própria.

3.3 Método critério

O sinal da plataforma de força foi adquirido usando uma interface Python própria (APÊNDICE I – TCLE) para receber e visualizar os dados em tempo real, seguindo os manuais de instruções da AMTI para protocolos de comunicação e procedimentos de calibração. Como

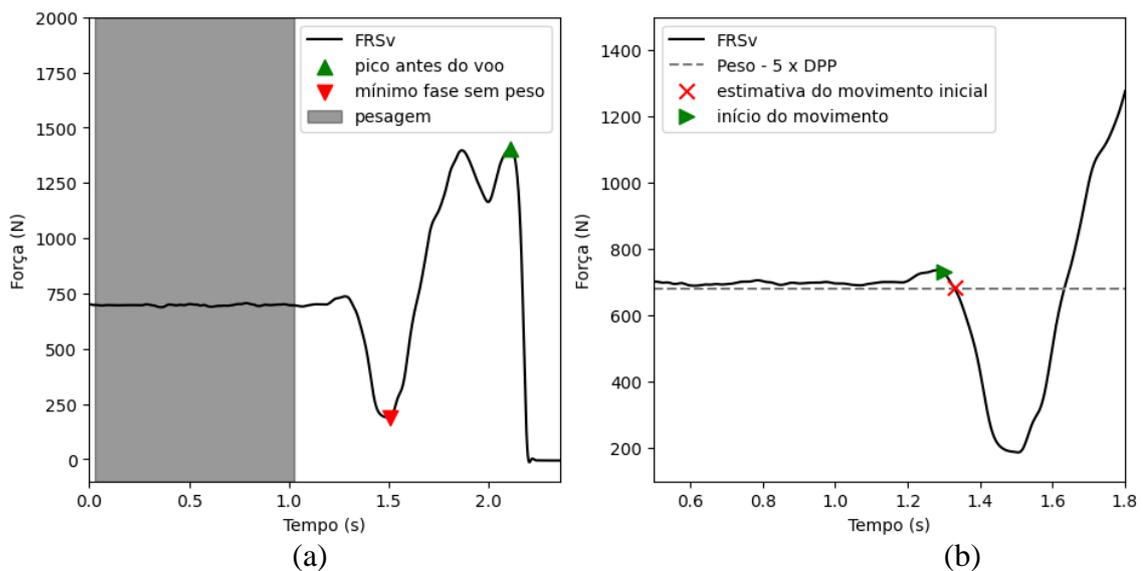
critério, a altura do salto foi medida a partir da força de reação do solo vertical (FRSv), que segue o padrão de sinal da Figura 2. A rotina de processamento foi realizada com base em recomendações da literatura (MCMAHON et al., 2018b).

Figura 5: Correção de *offset* de um sinal de força de reação com o solo vertical (FRSv) em um salto de contramovimento (SCM), a partir de um segmento de voo.



Fonte: elaboração própria. Estimativas iniciais do início e fim da fase de voo são encontradas a partir do mínimo do sinal e buscando os cruzamentos com a média. A fase de voo é amostrada da parcela central de 20% da duração do intervalo. O valor médio desse segmento é usado para corrigir um possível *offset* da plataforma.

Figura 6: Identificação da fase de pesagem e do início do movimento em um sinal de força de reação com o solo vertical (FRSv) em um salto de contramovimento (SCM).

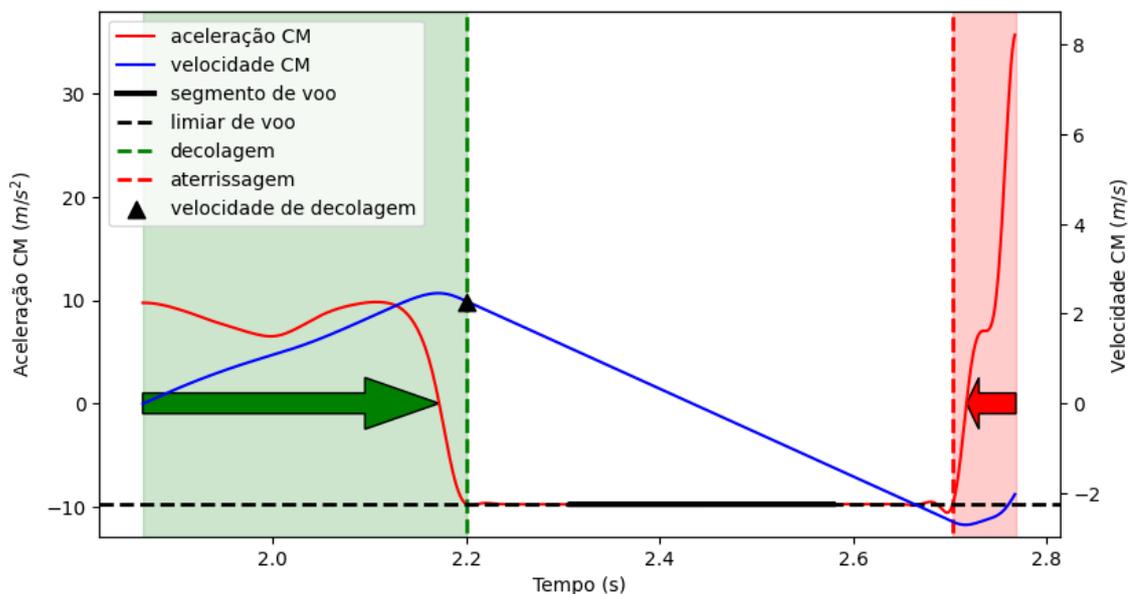


Fonte: elaboração própria. (a) fase de pesagem encontrada pelo trecho de 1s com menor desvio padrão antes do mínimo da fase sem peso, encontrada como o mínimo do sinal antes do pico que precede o segmento de voo. (b)

início do movimento encontrado como o momento antes do mínimo da fase sem peso em que o sinal excede o limiar do peso menos 5 x DPP, subtraído de 30 ms para identificar o início do movimento.

A FRSv foi filtrada usando um filtro passa-baixa Butterworth de 4ª ordem com frequência de corte em 30 Hz (SAMOZINO et al., 2008; STREET et al., 2001; VIEIRA et al., 2023). O *offset* foi ajustado subtraindo a média de um segmento de força na fase de voo, o qual foi identificado assumindo que o mínimo do sinal se encontra na fase de voo e buscando os instantes à esquerda e à direita do mínimo, onde a força excedeu seu valor médio (Figura 5). A partir da estimativa inicial do momento de voo, assume-se que o primeiro pico do sinal da FRSv antes do voo se encontra na fase de frenagem ou fase propulsiva, e que o mínimo do sinal até este momento deve estar na fase sem peso. Do começo do sinal de FRSv até o mínimo da fase sem peso, o algoritmo busca a janela de 1 s com menor desvio padrão para calcular o peso do participante (força média da janela) e o desvio padrão da pesagem (DPP) Figura 6a. O início do movimento do SCM é então definido como o primeiro instante antes do mínimo da fase sem peso em que a FRSv é maior que peso do participante menos 5 vezes o DPP, subtraído em sequência de 30 ms (PÉREZ-CASTILLA; ROJAS; GARCÍA-RAMOS, 2022) (Figura 6b).

Figura 7: Identificação dos momentos de decolagem e aterrissagem em um sinal de força de reação com o solo vertical (FRSv) em um salto com contramovimento (SCM).

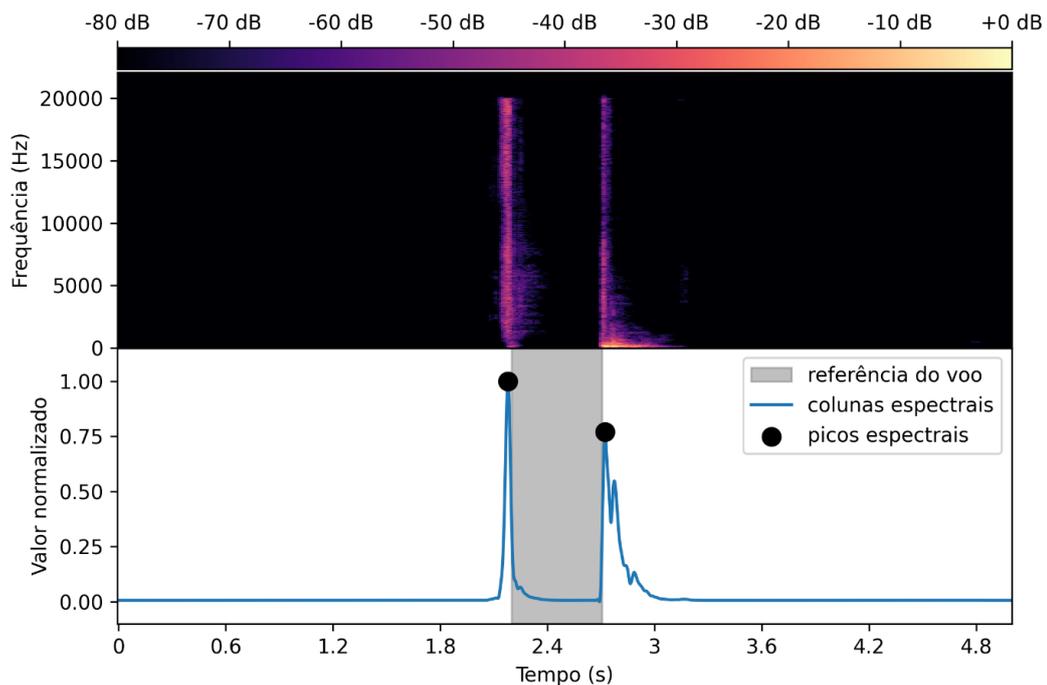


Fonte: elaboração própria. Momentos de decolagem e aterrissagem encontrados partindo dos picos do sinal de aceleração a esquerda e direita do segmento de voo (limites do gráfico), buscando o momento em que o sinal cruza o limiar de voo (média da aceleração no segmento de voo mais 5 x DP) na direção das setas, para evitar falsos positivos pelo ondas de transição causados pelo filtro. Identificação da velocidade no momento de decolagem.

A partir do início do movimento, a aceleração do centro de massa (CM) é obtida dividindo o sinal da FRSv pela massa do participante em kg (peso em N dividido pela constante gravitacional g , considerada como $9,7838 \text{ m/s}^2$, corrigindo pela latitude de onde foi medido). A velocidade do CM foi calculada integrando numericamente o sinal de aceleração usando o método do trapézio. Em seguida, os momentos de decolagem e aterrissagem foram encontrados como os primeiros momentos, respectivamente, antes e depois do segmento de voo em que o sinal da aceleração atinge 5 vezes o DP do segmento (Figura 7). A velocidade no instante da decolagem (v_d) foi usada para calcular a altura do salto seguindo o método J (h_J).

Por fim, o tempo de voo (t) foi definido como o tempo em segundos entre os momentos de decolagem e aterrissagem que foi usado para estimar a altura do salto pelo método FT (h_{FT}).

Figura 8: Representação do atributo das colunas espectrais a partir do espectrograma de uma gravação de áudio de um salto com contramovimento (SCM).



Fonte: elaboração própria. A parte superior da figura apresenta o espectrograma da gravação de áudio, enquanto na parte inferior estão representados o atributo das colunas espectrais e os picos espectrais definidos como regiões prováveis dos momentos do salto. A região cinza representa a referência do momento de voo identificado pelo sinal de FRSv, sincronizado com o sinal de áudio.

3.4 Processamento de áudio

O método proposto analisa o espectrograma do áudio em busca dos padrões que indicam os eventos de decolagem e aterrissagem. O estralo produzido quando o pé perde o contato com o chão ou quando a fita adesiva se desprende gera uma linha vertical, devido a sua

característica de espalhamento em várias frequências no espectrograma (Figura 3). Este padrão ocorre durante a decolagem e a aterrissagem, sendo a principal diferença entre ambos o fato de que os eventos de aterrissagem tendem a ter uma propagação subsequente de energia em baixas frequências (<1000 Hz), resultante do impacto da ponta do pé seguida do impacto do calcanhar no chão.

A partir da análise exploratória dos dados de áudio e inspirado no trabalho de Pueo, Lopez, Jimenez-Olmedo (2019), o algoritmo desenvolvido nesta pesquisa consiste nos seguintes passos:

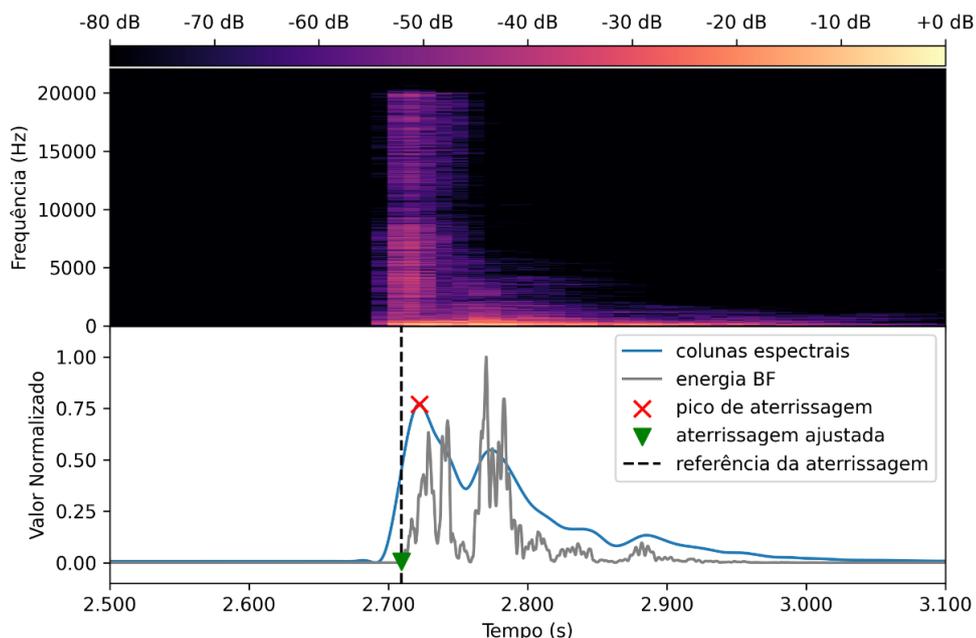
1. **Redução do ruído ambiente:** é coletada uma amostra dos 0,5 s no começo de cada gravação e aplicada a técnica de *spectral gating* (SAINBURG; THIELK; GENTNER, 2020) (**Error! Reference source not found.**).
2. **Elencar possíveis picos de aterrissagem e decolagem:** calcula-se um atributo do sinal denominado “colunas espectrais”, definida como a soma dos elementos de uma mesma coluna do espectrograma. Em seguida, aplica-se um algoritmo de detecção de pico para localizar regiões potenciais de decolagem e aterrissagem (**Error! Reference source not found.**).
3. **Encontrar pico de aterrissagem:** o pico com a maior energia no intervalo dos 0,3 s subsequentes em frequências baixas (<500 Hz) é classificado como o pico de aterrissagem.
4. **Ajuste do instante de aterrissagem:** calcula-se a derivada da energia do sinal de áudio em baixas frequências (< 3 kHz) (PUEO; LOPEZ; JIMENEZ-OLMEDO, 2019) nos 0,1 s que o precedem o pico de aterrissagem. Então, o primeiro momento que excede um desvio padrão da média do intervalo, é definido como o instante de aterrissagem (Figura 9).
5. **Localizar região provável da decolagem:** procura-se a decolagem na janela entre 0,2 e 0,8 s antes da aterrissagem, permitindo a detecção de saltos de 5 a 80 cm.
6. **Encontrar f_{max} na região de decolagem:** a maior frequência encontrada na região de decolagem com valor maior que -70 dB é definida como f_{max} e usada para normalização.
7. **Cálculo do atributo que enfatiza a decolagem (AD):** o atributo AD é computado pela multiplicação de dois atributos. O primeiro (AD_AF) é a soma dos elementos de uma mesma coluna na região de altas frequências ($> f_{max}/2$) e o segundo

(AD_BF) é a soma dos elementos de uma mesma coluna na região de baixas frequências ($< f_{max}/2$). Isso evita falsos positivos por ruídos concentrados em alguma faixa específica. Por fim, AD é interpolado usando uma interpolação *spline* cúbica e normalizado entre 0 e 1 (Figura 10).

8. **Detecção do instante de decolagem:** para evitar artefatos de estralo por ajustes do pé antes da decolagem (no caso com a fita), itera-se em AD começando do final e voltando até que o sinal atinja um valor de 0,1. O instante de decolagem é então definido como o valor máximo encontrado na janela de 50 ms que precede esse momento (Figura 10).
9. **Cálculo da altura do salto:** o tempo de voo (t) é definido e então usado para estimar a altura do salto pelo método de áudio ($h_A = gt^2/8$).

O algoritmo descrito está disponível para ser testado e pode ser encontrado no repositório github.com/victormacedo10/jump_audio. A análise do som do salto foi embarcada no aplicativo Jumo 2 (APÊNDICE III – Jumo 2) que pode ser baixado gratuitamente nas lojas Google Play e Apple Store.

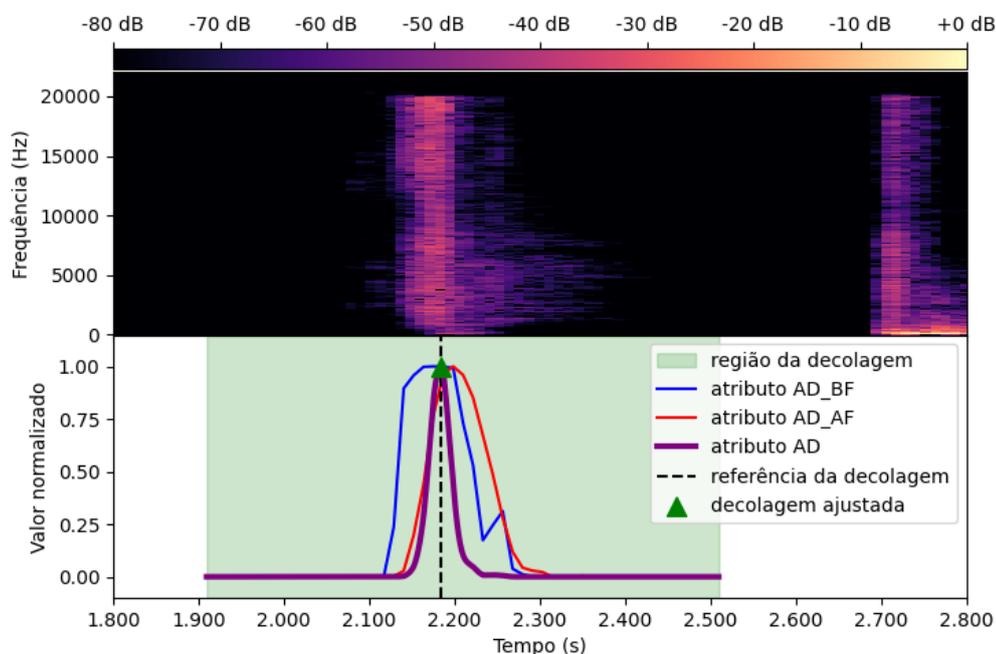
Figura 9: Ajuste da estimativa do instante de aterrissagem a partir da energia do sinal de áudio em baixas frequências, antecedendo o pico de aterrissagem.



Fonte: elaboração própria. A parte superior da figura apresenta o espectrograma da gravação de áudio enquanto na parte inferior estão representadas a energia do sinal em baixas frequências BF, o pico de aterrissagem encontrado anteriormente e o instante estimado para a aterrissagem. O triângulo verde representa o momento

estimado para a aterrissagem e linha pontilhada representa a referência do momento de aterrissagem identificado pelo sinal de FRSv, sincronizado com o sinal de áudio.

Figura 10: Cálculo do atributo AD dentro da região provável de decolagem e estimação do instante de decolagem.



Fonte: elaboração própria. A parte superior da figura apresenta o espectrograma da gravação de áudio e na inferior estão representados os atributos de alta frequência (AD_AF), baixa frequência (AD_BF) e combinado (AD). A janela verde representa o intervalo provável da decolagem, estimado a partir do momento de aterrissagem encontrado anteriormente. O triângulo verde representa o momento estimado para a decolagem e linha preta pontilhada representa a referência do momento de decolagem identificado pelo sinal de FRSv, sincronizado com o sinal de áudio.

3.5 Análise estatística

A normalidade dos dados foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov e das análises de assimetria e curtose. Foi realizada uma ANOVA de medidas repetidas de três vias com o teste de Tukey (HSD) como post hoc. Os tamanhos de efeito de Cohen d foram calculados e interpretados como triviais ($<0,2$), pequenos ($<0,5$), moderados ($<0,8$) e grandes ($>0,8$) (COHEN, 1988).

A validade concorrente foi investigada através da Regressão por Mínimos Quadrados Ordinários, avaliando a relação entre os métodos (A, FT e J) (HOPKINS, 2004; HOPKINS; BATTERHAM, 2015), o erro padrão da estimativa (EPE), e a uniformidade do erro, calculando a inclinação linear entre resíduos e alturas de salto estimadas (HOPKINS et al., 2009; TAFFÉ et al., 2022). As magnitudes das correlações de validade foram interpretadas como excelentes ($>0,995$), muito boas (0,995-0,950), boas (0,949-0,850), pobres (0,849-0,700), muito pobres

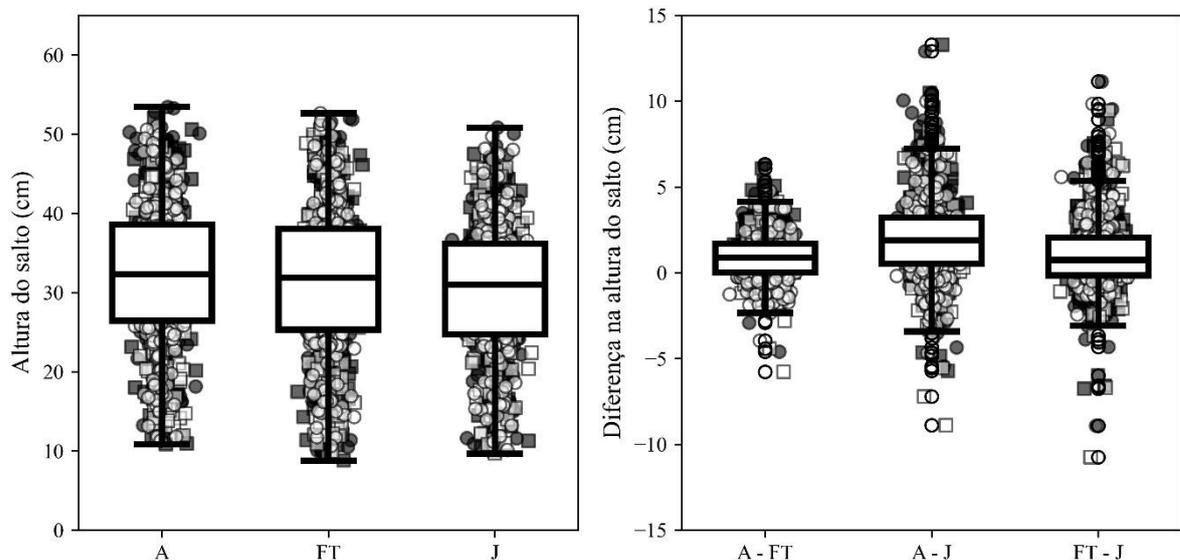
(0,699-0,450) e impraticáveis (<0,450). O EPE foi padronizado para interpretação como trivial (<0,1), pequeno (0,1-0,3), moderado (0,3-0,6), grande (0,6-1,0), muito grande (1,0-2,0) e impraticável (>2,0) (W. Hopkins, 2015).

Todos os cálculos foram realizados usando o programa SPSS (versão 26; IBM, Chicago, IL, EUA), juntamente com rotinas em Python usando o pacote Scipy (VIRTANEN et al., 2020).

4 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta as médias e desvios padrões dos valores encontrados para a altura do salto pelos métodos (A; FT; J) e a diferença entre os métodos (A vs. FT; A vs. J; FT vs. J) em cada ambiente (fechado; aberto) e condição (com fita; sem fita). Nota-se que o menor erro foi encontrado na condição sem fita em ambiente aberto, quando comparado A com FT e A com J. De acordo com o resultado da ANOVA, não houve interação de três vias, $F(1,52; 301,71) = 0,55$, $p = 0,58$, mas foi encontrado uma interação de duas vias entre condição*método, $F(1,68; 333,35) = 58,57$, $p < 0,001$. Análises posteriores não revelaram diferença entre saltar com fita ($31,5 \pm 9,2$ cm) e sem fita ($31,1 \pm 8,7$ cm), mas um efeito principal para os métodos foi observado, $F(2, 2394) = 10,289$, $p < 0,001$. As análises *post-hoc* mostraram altura de salto similar entre A ($32,3 \pm 9,1$ cm) e FT ($31,3 \pm 9,3$ cm), $p = 0,099$, enquanto A e FT foram maiores ($p < 0,04$) do que J ($30,2 \pm 8,3$ cm) (Figura 11).

Figura 11: Gráficos de caixa e bigode comparando as médias e diferenças na altura do salto obtida pelos métodos de áudio (A), tempo de voo (FT) e impulso-momentum (J).

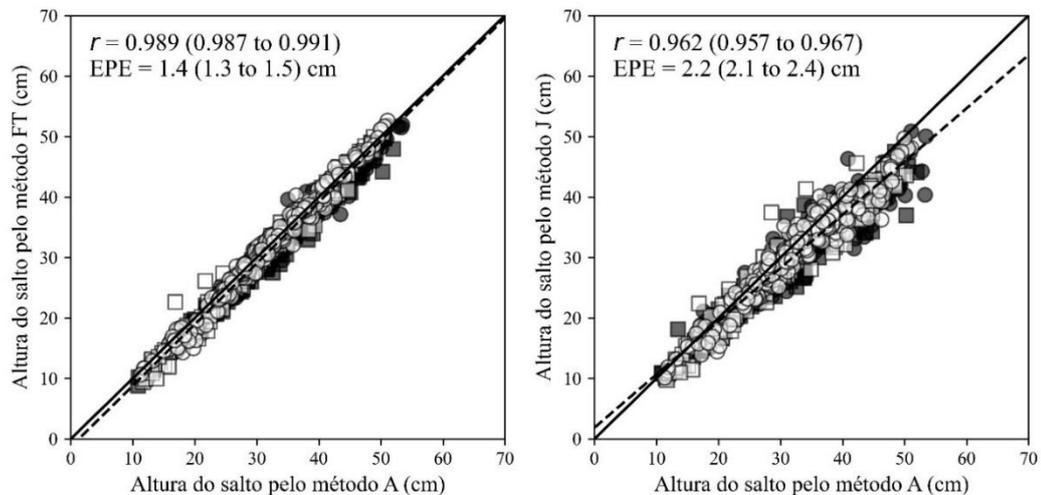


Fonte: elaboração própria. Os pontos dispersos incluem ambiente fechado (quadrados) e aberto (círculos) com (preto) e sem fita (branco). O teste de Tukey HSD mostrou uma altura de salto semelhante entre A e FT ($p = 0,099$), enquanto A e FT foram maiores ($p < 0,04$) que J.

Considerando que nenhuma diferença significativa foi encontrada entre as condições ou ambientes, a análise de regressão foi realizada com os todos os dados comparando com cada método critério. Foram encontradas correlações de validade "muito boas" entre A e FT e entre A e J (Figura 12). A inclinação (erro aleatório) entre A e FT foi de 1.013 (IC 95%, 1.002 a

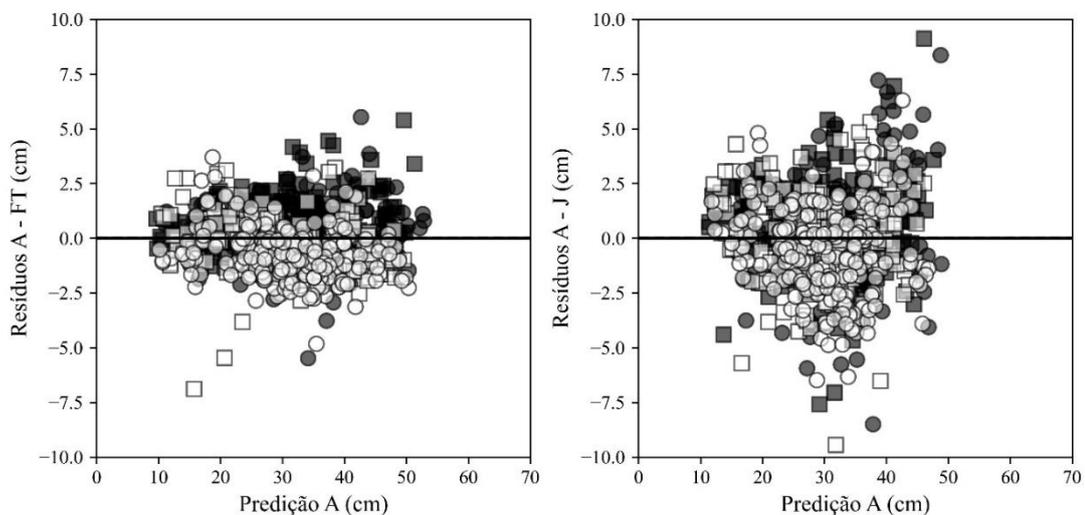
1.023), e o intercepto y (erro sistemático) foi de -1.323 (IC 95%, -0.972 a -1.647). A comparação com J exibiu uma inclinação de 0.880 (IC 95%, 0.863 a 0.897) com um intercepto y de 1.858 (IC 95%, 1.279 a 2.437). Pela análise de resíduos, não foi observada evidência de heterocedasticidade (ou seja, não uniformidade do erro) entre A e FT e entre A e J ($p = 1.00$, inclinação < 0.001) (Figura 13).

Figura 12: Análise de regressão comparando as estimativas de altura do salto entre o sistema proposto por áudio A e os métodos critério da plataforma de força FT e J.



Fonte: elaboração própria. Os pontos dispersos incluem ambiente fechado (quadrados) e aberto (círculos) com (preto) e sem fita (branco). Correlação da validade (r) e o erro padrão da estimativa (EPS) são apresentados como média e 95% IC.

Figura 13: Análise de resíduos comparando as estimativas de altura do salto entre o sistema proposto por áudio A e os métodos critério da plataforma de força FT e J.



Fonte: elaboração própria. Os pontos dispersos incluem ambiente fechado (quadrados) e aberto (círculos) com (preto) e sem fita (branco).

Tabela 1: Médias \pm desvios padrões para comparações da altura do salto entre o método de áudio (A), plataforma de força aplicando o método do tempo de voo (FT) e impulso-momentum (J).

Condições	Ambientes	A (cm)	FT (cm)	J (cm)	Δ (95% IC)		
					A vs. FT (cm)	A vs. J (cm)	FT vs. J (cm)
Com fita	Fechado	32.7 \pm 9.5	31.2 \pm 9.5	30.3 \pm 8.5	1.5 (1.4 - 1.7)	2.4 (2.1 - 2.8)	0.9 (0.6 - 1.2)
	Aberto	32.9 \pm 9.3	31.5 \pm 9.4	30.5 \pm 8.4	1.3 (1.2 - 1.5)	2.4 (2.0 - 2.7)	1.0 (0.7 - 1.3)
Sem fita	Fechado	31.6 \pm 8.8	31.1 \pm 9.2	29.9 \pm 8.2	0.6 (0.4 - 0.8)	1.8 (1.4 - 2.1)	1.2 (0.9 - 1.5)
	Aberto	31.8 \pm 8.5	31.6 \pm 9.0	30.3 \pm 8.0	0.2 (0.0 - 0.4)	1.5 (1.2 - 1.8)	1.3 (1.0 - 1.6)

Fonte: elaboração própria. Δ (95% IC): diferença média, incluindo intervalo de confiança de 95%.

5 DISCUSSÃO

O presente estudo investigou a validade concorrente de um aplicativo para dispositivos móveis baseado no som do salto vertical para medir a altura do salto em um ambiente fechado e outro aberto, e usando uma fita adesiva que, supostamente, melhoraria a detecção do momento de decolagem. O método baseado em áudio (A) foi comparado contra a plataforma de força utilizando tanto o tempo de voo (FT) quanto a relação impulso-momentum (J), considerado o método mais válido para estimar a altura do salto (LINTHORNE, 2001; WADE; LICHTWARK; FARRIS, 2020). Foi identificada uma correlação de validade “muito boa” ($r = 0.989$ e 0.962) com “pequenos” erros (1,4 e 2,2 cm) comparando A contra FT e J, respectivamente. Contrário à hipótese inicial, nenhuma diferença foi encontrada entre o ambiente fechado e aberto, ou entre utilizar ou não a fita adesiva.

Esses resultados sugerem que o algoritmo implementado é suficientemente robusto para reduzir o ruído de fundo no ambiente aberto e não requer uma fita adesiva para aumentar o som da decolagem no salto. No entanto, vale ressaltar que o ambiente aberto escolhido (pátio da universidade) era apenas parcialmente aberto, pois havia paredes nas proximidades. Portanto, ele não é acusticamente representativo de outros possíveis ambientes abertos, onde o sistema pode se comportar de maneira diferente devido a diferentes características de reverberação (por exemplo, campos de futebol). No entanto, para gravações coletadas perto dos pés do saltador (50 cm), é provável que o ambiente não afete o padrão geral de áudio buscado pelo algoritmo (PUEO; LOPEZ; JIMENEZ-OLMEDO, 2019).

Foi observado que os métodos A e FT superestimaram a altura do salto entre 1 e 2 cm em comparação com J. Isso era esperado, conforme reportado em estudos anteriores (KOZINC; PLEŠA, 2022; MOIR, 2008; WADE; LICHTWARK; FARRIS, 2020). Métodos baseados no tempo de voo podem superestimar a altura do salto dado que os indivíduos tendem a aterrissar mais agachados do que ao decolar. Além disso, um aumento não significativo ($p = 0,099$) de 1 cm na altura do salto foi observado ao comparar A com FT. Tal erro é atribuível aos participantes estarem descalços, com a fita adesiva presa à cabeça do metatarso, fazendo com que a fita estralasse antes no instante de decolagem. De fato, ao realizar análises sem a condição da fita, a diferença entre A e FT se aproximou de zero em ambos os ambientes. Vale ressaltar que para aumentar a viabilidade prática do protocolo, o comprimento da fita adesiva foi controlado apenas visualmente, o que possivelmente também introduziu um erro aleatório.

Os resultados obtidos no presente estudo são comparáveis aos observados nos aplicativos que utilizam vídeos gravados em câmera lenta com identificação manual dos quadros, como Jumbo 2 ($r = 0,989$) e MyJump 2 ($r = 0,984$) (VIEIRA et al., 2023). Contudo, a solução de áudio apresenta vantagens, como a menor suscetibilidade a erros introduzidos pelo avaliador, fornecimento de *feedback* instantâneo e acessibilidade para usuários de dispositivos móveis que não possuem câmera lenta. Ainda assim, o Jumbo 2, desenvolvido neste trabalho, conta com os dois modos de uso (automático por som e manual pelo vídeo), deixando a critério do usuário a escolha do método mais adequado para o contexto da avaliação.

Os resultados também são semelhantes aos observados anteriormente por Pueo, Lopez e Jimenez-Olmedo (2019), que encontrou um $r = 0,996$ e $EPE = 0,8$ cm usando a fita adesiva, tendo o tapete de contato como referência, comparável apenas com o método FT por também se basear em tempo de voo. Este estudo deu um passo adiante, comparando o método FT do dispositivo “padrão ouro” (plataforma de força), além do método J, com maior validade para medir a altura do salto vertical. Este trabalho usou como base a análise em frequência proposta por Pueo, porém, implementações iniciais desse método produziram alguns falsos positivos nos dados coletados, possivelmente devido à ausência de calçado e o posicionamento da fita adesiva abaixo dos dedos. A análise de espectrograma proposta buscou aumentar a robustez do método, identificando um padrão mais específico dos instantes do salto, que se mostrou válido com ou sem o uso da fita adesiva. Apesar da descrição detalhada do método de Pueo, Lopez e Jimenez-Olmedo (2019), como nenhuma aplicação ou algoritmo foram disponibilizados, não foi possível fazer uma comparação justa com o algoritmo proposto neste estudo.

Este estudo demonstra que o método baseado em áudio pode medir automaticamente e com precisão a altura do salto de participantes saltando descalços sobre uma superfície rígida, como uma plataforma de força. Portanto, o método proposto torna a medição da altura do salto mais acessível do que os sistemas anteriores disponíveis para dispositivos móveis. Embora os resultados atuais se beneficiem de uma grande amostra de 800 saltos, apresentando uma variedade de técnicas de salto, mais pesquisas são necessárias para verificar a robustez do sistema em condições fora do laboratório. O sistema não foi testado para participantes usando calçados macios e saltando em terreno de “baixo ruído”. Como regra geral, recomenda-se verificar se a decolagem produz um som distinguível no ambiente escolhido; caso contrário, o uso de fita adesiva será necessário. Ao usar a fita, é necessário evitar ajustes dos pés antes de saltar para prevenir a uma falsa identificação do momento de decolagem. Com o objetivo de

permitir que o método de áudio seja testado em outras superfícies e com participantes usando calçados, estudos futuros devem utilizar outros sistemas, que não plataformas de força, como método de referência, como por exemplo sistemas optoeletrônicos.

6 CONCLUSÃO

O aplicativo Jumbo 2 desenvolvido neste trabalho e disponível gratuitamente, se mostrou válido para medir a altura do salto a partir de gravações de áudio em condições de baixo ruído. O uso da fita se mostrou opcional e recomendado apenas em casos em que o salto não produz um som distinguível na decolagem para o ambiente escolhido, já que o uso da fita pode aumentar o erro aleatório e gerar um erro sistemático. Ao usar a fita, é importante padronizar seu tamanho e evitar ajustes do pé durante a gravação. A escolha do ambiente não se mostrou relevante nos cenários avaliados neste estudo, porém é esperado que ambientes com maior ruído possam afetar o desempenho do aplicativo.

No geral, os resultados atuais sugerem que o teste prático do salto vertical pode ser realizado rapidamente por um processo automatizado de gravação dos sons do salto, contornando a demorada identificação manual de quadros. Este aplicativo pode ser usado por treinadores e atletas para monitorar o desempenho do salto vertical.

REFERÊNCIAS

- ADESIDA, Y.; PAPI, E.; MCGREGOR, A. H. Exploring the Role of Wearable Technology in Sport Kinematics and Kinetics: A Systematic Review. **Sensors**, v. 19, n. 7, p. 1597, jan. 2019.
- BALSALOBRE-FERNÁNDEZ, C.; GLAISTER, M.; LOCKEY, R. A. The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. **Journal of Sports Sciences**, v. 33, n. 15, p. 1574–1579, 14 set. 2015.
- BAPTISTA, F.; ZYMBAL, V.; JANZ, K. F. Predictive Validity of Handgrip Strength, Vertical Jump Power, and Plank Time in the Identification of Pediatric Sarcopenia. **Measurement in Physical Education and Exercise Science**, v. 26, n. 4, p. 361–370, 2 out. 2022.
- BOULLOSA, D. A. et al. The influence of training background on different rate of force calculations during countermovement jump. **Kinesiology**, v. 50, n. April, p. 1–7, 2018.
- CARROLL, K. M. et al. Intrasession and Intersession Reliability of Countermovement Jump Testing in Division-I Volleyball Athletes. **Journal of strength and conditioning research**, v. 33, n. 11, p. 2932–2935, 2019.
- CHAVDA, S. et al. Force-Time Characteristics of the Countermovement Jump: Analyzing the Curve in Excel. **Strength & Conditioning Journal**, v. 40, n. 2, p. 67, abr. 2018.
- CHIU, L. Z. F.; DÆHLIN, T. E. Comparing Numerical Methods to Estimate Vertical Jump Height Using a Force Platform. **Measurement in Physical Education and Exercise Science**, v. 24, n. 1, p. 25–32, 2 jan. 2020.
- CHIU, L. Z. F.; SALEM, G. J. Pelvic Kinematic Method for Determining Vertical Jump Height. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 26, n. 4, p. 508–511, 1 nov. 2010.
- CLAUDINO, J. G. et al. The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 20, n. 4, p. 397–402, 2017.
- COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2. ed. New York: Routledge, 1988.
- CORMIE, P.; MCBRIDE, J. M.; MCCAULLEY, G. O. POWER-TIME, FORCE-TIME, AND VELOCITY-TIME CURVE ANALYSIS OF THE COUNTERMOVEMENT JUMP: IMPACT OF TRAINING. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 23, n. 1, p. 177–186, 2009.
- COUTTS, A. et al. Changes in selected biochemical, muscular strength, power, and endurance measures during deliberate overreaching and tapering in rugby league players. **International Journal of Sports Medicine**, v. 28, n. 2, p. 116–124, fev. 2007.
- DRISS, T. et al. Effects of external loading on power output in a squat jump on a force platform: A comparison between strength and power athletes and sedentary individuals. **Journal of Sports Sciences**, v. 19, n. 2, p. 99–105, 1 jan. 2001.

FLORÍA, P. et al. Kinetic and kinematic analysis for assessing the differences in countermovement jump performance in rugby players. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 30, n. 9, p. 2533–2539, 2016.

FRANCESCHI, A. et al. Training Load, Neuromuscular Readiness, and Perceptual Fatigue Profile in Youth Elite Long-Jump Athletes. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 15, n. 7, p. 1034–1038, 12 mar. 2020.

GATHERCOLE, R. et al. Alternative Countermovement-Jump Analysis to Quantify Acute Neuromuscular Fatigue Pilot study investigating the effects of a short-term low FODMAP diet in healthy runners with persistent exercise-associated GI symptoms View project. **Int J Sports Physiol Perform**, v. 10, p. 84–92, 2015.

GLATTHORN, J. F. et al. Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 25, n. 2, p. 556–560, fev. 2011.

HAGUENAUER, M.; LEGRENEUR, P.; MONTEIL, K. M. Vertical Jumping Reorganization with Aging: A Kinematic Comparison between Young and Elderly Men. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 21, n. 3, p. 236–246, 1 ago. 2005.

HOPKINS, W. **Bias in Bland-Altman but not Regression Validity Analyses**. 2004. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Bias-in-Bland-Altman-but-not-Regression-Validity-Hopkins/bfce27727f5613f6b44824db12aa88ab640d390a>>. Acesso em: 8 jun. 2023

HOPKINS, W. et al. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. **Medicine+ Science in Sports+ Exercise**, v. 41, n. 1, p. 3, 2009.

HOPKINS, W.; BATTERHAM, A. **Spreadsheets for Analysis of Validity and Reliability**. 2015. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Spreadsheets-for-Analysis-of-Validity-and-Hopkins-Batterham/06def6d07be6b8d13090ab060705eda6a18493c3>>. Acesso em: 8 jun. 2023

HOPKINS, W. G. Sample-size Estimation for Various Inferential Methods. **Sportscience**, v. 24, 2020.

KIBELE, A. Possibilities and Limitations in the Biomechanical Analysis of Countermovement Jumps: A Methodological Study. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 14, p. 105–117, 1 fev. 1998.

KONS, R. L. et al. Is Vertical Jump Height an Indicator of Athletes' Power Output in Different Sport Modalities? **The Journal of Strength & Conditioning Research**, v. 32, n. 3, p. 708, mar. 2018.

KOZINC, Ž.; PLEŠA, J. Discrepancy Among Different Methods for Vertical Jump Height Determination and Its Implications for Field-Based Testing: A Narrative Review. **Measurement in Physical Education and Exercise Science**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 28 dez. 2022.

LAKE, J. P.; MCMAHON, J. J. Within-Subject Consistency of Unimodal and Bimodal Force Application during the Countermovement Jump. **Sports**, v. 6, n. 4, p. 143, dez. 2018.

LAURSON, K. R. et al. Long Jump, Vertical Jump, and Vertical Jump Power Reference Curves for 10-18 Year Olds. **Measurement in Physical Education and Exercise Science**, v. 26, n. 4, p. 306–314, 2 out. 2022.

LEE, J. A.; VELTHOFF, J.; WELK, G. J. Field Evaluation of Handgrip and Vertical Jump Assessments in Physical Education. **Measurement in Physical Education and Exercise Science**, v. 26, n. 4, p. 352–360, 2 out. 2022.

LINTHORNE, N. P. Analysis of standing vertical jumps using a force platform. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 11, p. 1198–1204, 2001.

LOTURCO, I. et al. Vertical and Horizontal Jump Tests Are Strongly Associated With Competitive Performance in 100-m Dash Events. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 29, n. 7, p. 1966–1971, jul. 2015.

LOTURCO, I. et al. Mechanical differences between barbell and body optimum power loads in the jump squat exercise. **Journal of Human Kinetics**, v. 54, n. 1, p. 153–162, 2016.

LOTURCO, I. et al. Validity and Usability of a New System for Measuring and Monitoring Variations in Vertical Jump Performance. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 31, n. 9, p. 2579–2585, set. 2017.

LOTURCO, I. et al. Power output in traditional and ballistic bench press in elite athletes: Influence of training background. **Journal of Sports Sciences**, v. 37, n. 3, p. 277–284, 2019.

MCMAHON, J. et al. Understanding the Key Phases of the Countermovement Jump Force-Time Curve. **Strength and conditioning journal**, v. 40, 17 jan. 2018a.

MCMAHON, J. J. et al. Countermovement Jump Phase Characteristics of Senior and Academy Rugby League Players. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 12, n. 6, p. 803–811, 2017.

MCMAHON, J. J. et al. Understanding the key phases of the countermovement jump force-time curve. **Strength and Conditioning Journal**, v. 40, n. 4, p. 96–106, 2018b.

MCMAHON, J.; REJ, S.; COMFORT, P. Sex Differences in Countermovement Jump Phase Characteristics. **Sports**, v. 5, n. 1, p. 8, 2017.

MERRIGAN, J. J. et al. Identifying Reliable and Relatable Force–Time Metrics in Athletes—Considerations for the Isometric Mid-Thigh Pull and Countermovement Jump. **Sports**, v. 9, n. 1, p. 1–13, 2021.

MOIR, G. L. Three Different Methods of Calculating Vertical Jump Height from Force Platform Data in Men and Women. **Measurement in Physical Education and Exercise Science**, v. 12, n. 4, p. 207–218, 14 out. 2008.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time Signal Processing**. [s.l.] Prentice Hall, 1999.

PÉREZ-CASTILLA, A.; ROJAS, F. J.; GARCÍA-RAMOS, A. Reliability and magnitude of loaded countermovement jump performance variables: a technical examination of the jump threshold initiation. **Sports Biomechanics**, v. 21, n. 5, p. 622–636, maio 2022.

PUEO, B.; LOPEZ, J. J.; JIMENEZ-OLMEDO, J. M. Audio-Based System for Automatic Measurement of Jump Height in Sports Science. **Sensors**, v. 19, n. 11, p. 2543, jan. 2019.

SAINBURG, T. **timsainb/noisereduce: v1.0**. Zenodo, , jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.3243139>>

SAINBURG, T.; THIELK, M.; GENTNER, T. Q. Finding, visualizing, and quantifying latent structure across diverse animal vocal repertoires. **PLOS Computational Biology**, v. 16, n. 10, p. e1008228, 15 out. 2020.

SAMOZINO, P. et al. A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. **Journal of biomechanics**, v. 41, p. 2940–5, 1 out. 2008.

SINGH, H. et al. Jump test performance and sarcopenia status in men and women, 55 to 75 years of age. **Journal of Geriatric Physical Therapy (2001)**, v. 37, n. 2, p. 76–82, 2014.

STANTON, R. et al. Validity of a contact mat and accelerometric system to assess countermovement jump from flight time. **Measurement in Physical Education and Exercise Science**, v. 23, n. 1, p. 39–46, 2 jan. 2019.

STREET, G. et al. Sources of Error in Determining Countermovement Jump Height with the Impulse Method. **Journal of Applied Biomechanics**, v. 17, p. 43–54, 1 fev. 2001.

SUCHOMEL, T. J. et al. The Importance of Muscular Strength: Training Considerations. **Sports Medicine**, v. 48, n. 4, p. 765–785, 2018.

TAFFÉ, P. et al. The Bland-Altman method should not be used when one of the two measurement methods has negligible measurement errors. **PLOS ONE**, v. 17, n. 12, p. e0278915, 12 dez. 2022.

VANRENTERGHEM, J.; DE CLERCQ, D.; VAN CLEVEN, P. Necessary precautions in measuring correct vertical jumping height by means of force plate measurements. **Ergonomics**, v. 44, n. 8, p. 814–818, 20 jun. 2001.

VIEIRA, A. et al. Evidence of validity and reliability of Jumbo 2 and MyJump 2 for estimating vertical jump variables. **PeerJ**, v. 11, p. e14558, 2023.

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, p. 261–272, mar. 2020.

WADE, L.; LICHTWARK, G. A.; FARRIS, D. J. Comparisons of laboratory-based methods to calculate jump height and improvements to the field-based flight-time method. **Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports**, v. 30, n. 1, p. 31–37, 2020.

WARR, D. M. et al. Reliability of measurements during countermovement jump assessments: Analysis of performance across subphases. **Cogent Social Sciences**, v. 6, n. 1, 2020.

WIDROW, B. et al. Adaptive noise cancelling: Principles and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 63, n. 12, p. 1692–1716, dez. 1975.

APÊNDICE I – TCLE

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido - TCLE

Convidamos a participar voluntariamente do projeto de pesquisa “Estimativa Automática da Altura do Salto Vertical a partir de Sinais de Áudio e Vídeo” sob a responsabilidade do pesquisador Victor Oliveira Corrieri de Macedo.

Qual é o objetivo do estudo?

Esta etapa do projeto de pesquisa tem como objetivo a investigação de técnicas de processamento de áudio para o desenvolvimento de um sistema automático de estimação da altura do salto vertical usando o som produzido pelo salto. Espera-se com este trabalho proporcionar uma forma mais simples e válida de avaliar o salto vertical, que também seja acessível fisicamente e financeiramente para a maior parte população. Além disso, a proposta tem o potencial inovador de permitir a avaliação em tempo real da altura do salto pelo celular, fornecendo um feedback imediato para os avaliadores e os avaliados.

Você receberá todos os esclarecimentos necessários antes e no decorrer da pesquisa e lhe asseguramos que seu nome não aparecerá, sendo mantido o mais rigoroso sigilo pela omissão total de quaisquer informações que permitam identificá-lo.

O que será solicitado?

A sua participação se dará por meio de duas visitas, uma no pátio da Faculdade de Educação Física e outra na sala 18 (sala de espelhos) do Centro Olímpico. Em cada dia, serão realizados um total de 8 saltos vertical de contramovimento descalço, sendo os quatro primeiros com o uso de uma fita adesiva na sola do pé. Durante os saltos, é necessário fazer silêncio, portanto, todos os comandos dados serão gestuais. Isso será explicado novamente no dia da coleta. Os saltos serão realizados em cima de uma plataforma de força e um celular será colocado ao lado, aproximadamente 50 cm de distância, para coletar o som produzido pelo salto. Caso algum barulho inesperado interfira no momento do salto, será necessário repeti-lo. A duração total aproximada das visitas é de 5 minutos.

Quais são os riscos?

Embora seja raro, existem riscos decorrentes da sua participação nesta pesquisa. Os potenciais riscos decorrentes de sua participação na pesquisa incluem dor provocada pelo impacto ao aterrissar o salto e uma possível dor muscular nos dias subsequentes ao salto. Para

amenizar a dor provocada pelo impacto ao aterrissar do salto, você será instruído a apoiar primeiramente a ponta dos dedos dos pés para em seguida apoiar o calcanhar na plataforma, desta forma o impacto provocado pelo salto será reduzido.

Quais são os benefícios?

Se o aceitar participar, contribuirá para o desenvolvimento e validação de um sistema automático de identificação da altura do salto vertical, o qual será futuramente disponibilizado em aplicativo móvel nas plataformas Android e IOS. Além disso, caso deseje, será fornecido um relatório do seu desempenho no teste por meio dos dados da plataforma de força.

Você pode se recusar a responder (ou participar de qualquer procedimento) qualquer questão que lhe traga constrangimento, podendo desistir de participar da pesquisa em qualquer momento sem nenhum prejuízo. Sua participação é voluntária, isto é, não há pagamento por sua colaboração.

Caso haja algum dano direto ou indireto decorrente de sua participação na pesquisa, você deverá buscar ser indenizado, obedecendo-se as disposições legais vigentes no Brasil.

Os resultados da pesquisa serão divulgados na Universidade de Brasília podendo ser publicados posteriormente. Os dados e materiais serão utilizados somente para esta pesquisa e ficarão sob a guarda do pesquisador por um período de cinco anos, após isso serão destruídos.

Se tiver qualquer dúvida em relação à pesquisa, por favor telefone para: Victor Oliveira Corrieri de Macedo, na Faculdade de Educação Física no telefone (61 984421305). Se preferir, envie um e-mail: victorocmacedo10@gmail.com, ou poderá entrar em contato com o Comitê de Ética em Pesquisa do UDF Centro Universitário – CEP/UDF, SEP/SUL EQ 704/904 Conj. A CEP: 70390-045 telefone (61) 3704-8851.

Consentimento Pós-Informação

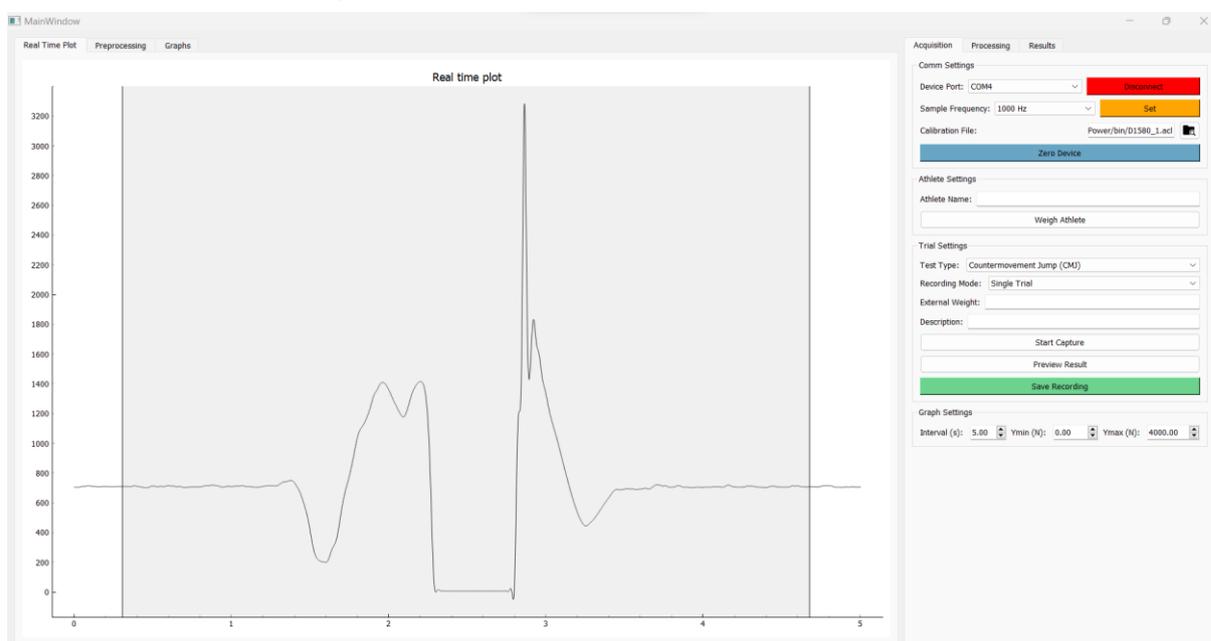
Afirmo ter sido informado sobre o que o pesquisador quer fazer e porque precisa da minha colaboração, e entendi a explicação. Por isso, eu concordo em participar do projeto, sabendo que não vou ganhar nada e que posso sair quando quiser.

APÊNDICE II – INTERFACE

Interface de Aquisição e Processamento para Plataforma de Força em Python

Uma interface foi desenvolvida em Python, usando a ferramenta PyQt5, para fazer a aquisição dos sinais de força de uma plataforma modelo AMTI AccuPower (AMTI, Watertown, MA, EUA). A plataforma utiliza uma comunicação serial, com o protocolo descrito nos manuais do produto. A curva de calibração da plataforma já havia sido obtida durante a compra, e seus parâmetros de calibração foram inseridos como um arquivo externo indicado no programa. Para permitir a coleta e visualização dos dados da plataforma em tempo real, o programa de coleta foi otimizado e dividido em *threads*. Além das funções de conectar, iniciar e finalizar a coleta, foram implementadas funções para ajustar a taxa de amostragem, zerar a plataforma e pesar o atleta, assim como a opção de salvar um trecho predefinido do sinal (Figura 14).

Figura 14: Interface de aquisição para coletas de saltos verticais em uma plataforma de força AMTI, desenvolvido em Python.

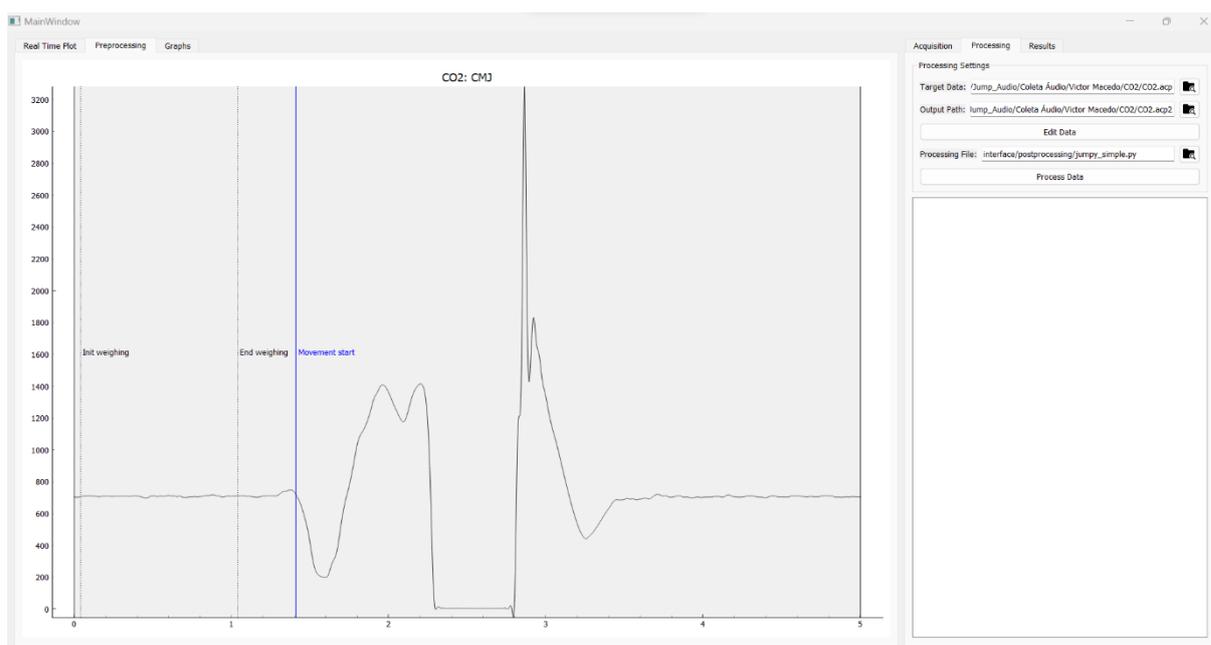


Fonte: elaboração própria.

Uma vez coletado, o programa permite o cálculo preliminar das variáveis do teste definido. Foram implementadas funções para testes de saltos com contramovimento (SCM), saltos agachados, saltos em queda, saltos com sobrecarga, saltos unilaterais e testes de força

isométrica. Os resultados processados são apresentados graficamente e em tabela, permitindo comparar a variação percentual entre as medidas. Ademais, caso a segmentação das fases não esteja coerente, na aba de pré-processamento é possível realizar um ajuste manual da fase de pesagem e do início do movimento (Figura 15).

Figura 15: Interface de pré-processamento de saltos verticais gravados na plataforma de força, para conferência e ajuste manual da fase de pesagem e do início do movimento.



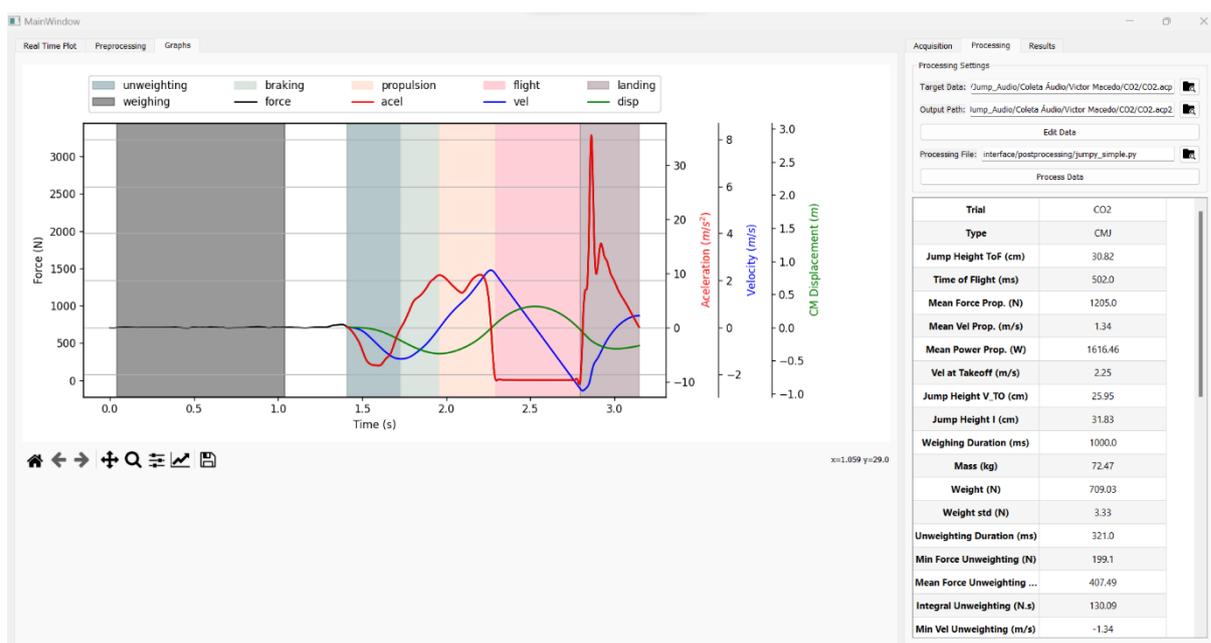
Fonte: elaboração própria.

Além do processamento e visualização das métricas de um salto, uma função adicional permite o processamento de múltiplos arquivos. Nesse caso, a pasta dos arquivos é informada e o programa busca recursivamente todos os arquivos com extensão “.acp” para processar. O resultado desse processamento é fornecido em uma tabela Excel para cada tipo de salto, onde cada linha representa o resultado de um arquivo processado e as colunas apresentam a identificação dos arquivos, bem como as métricas calculadas. Adicionalmente, uma imagem com as fases segmentadas (Figura 2) é gerada para cada arquivo de salto e no mesmo diretório.

Como descrito na seção de fundamentação teórica, a base do cálculo das métricas do salto está na identificação adequada dos momentos de transição entre as fases. O processamento foi realizado de forma modularizada, onde o usuário pode criar rotinas e indicar o caminho na interface, contanto que cumpra com os padrões de entrada e saída definidos no modelo de função de processamento. Os momentos identificados e métricas calculadas podem ser

combinadas para calcular diferentes métricas de acordo com a demanda do estudo. Uma vez definida e indicada a rotina a ser usada, a interface permite abrir um arquivo de força já coletado e aplicar o processamento, avaliando o resultado por meio de valores escalares na tabela e pela apresentação gráfica das fases (Figura 16).

Figura 16: Interface de processamento de saltos verticais gravados na plataforma de força, permitindo a análise gráfica das fases segmentadas e fornecendo as métricas biomecânicas de interesse na tabela, de acordo com uma rotina independente de processamento.



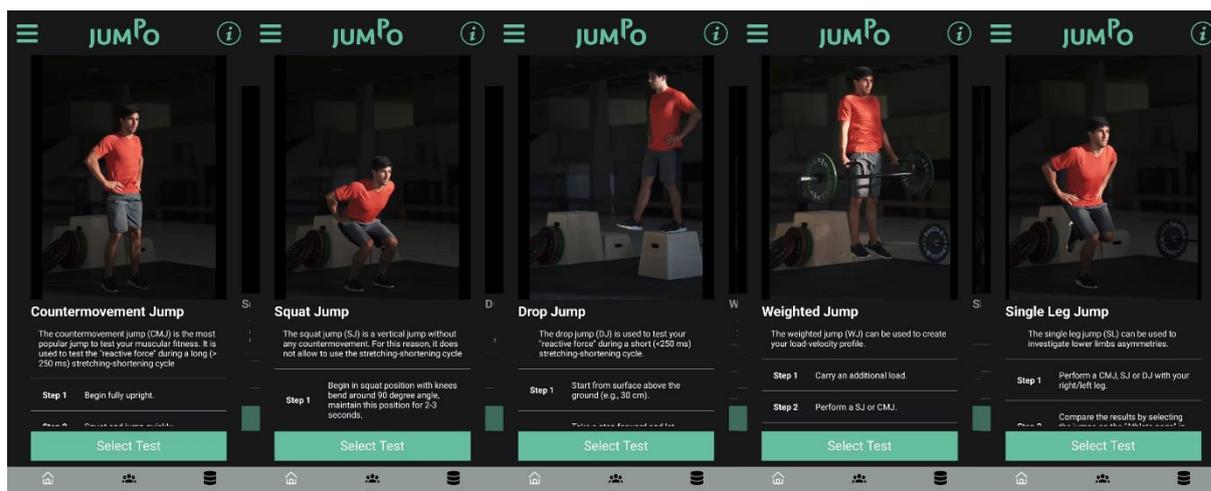
Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE III – JUMPO 2

Aplicativo de avaliação de saltos verticais - Jumbo 2

O aplicativo Jumbo 2 foi desenvolvido em colaboração com os alunos de engenharia de software Hugo Sobral e Micaella Gouveia e com o aluno de engenharia eletrônica Bismark Cotrim, da Universidade de Brasília - UnB, em projetos de extensão sob a supervisão dos professores Dr. Amilton Vieira e Dr. Roberto Baptista. O aplicativo foi desenvolvido usando a ferramenta híbrida React Native, em Javascript. A escolha da ferramenta se deu para agilizar o processo de desenvolvimento e distribuição do aplicativo nas plataformas Android e IOS, depois de um estudo de viabilidade que concluiu que a ferramenta supriria as demandas do projeto.

Figura 17: Tipos de testes de saltos verticais disponíveis no aplicativo Jumbo 2.

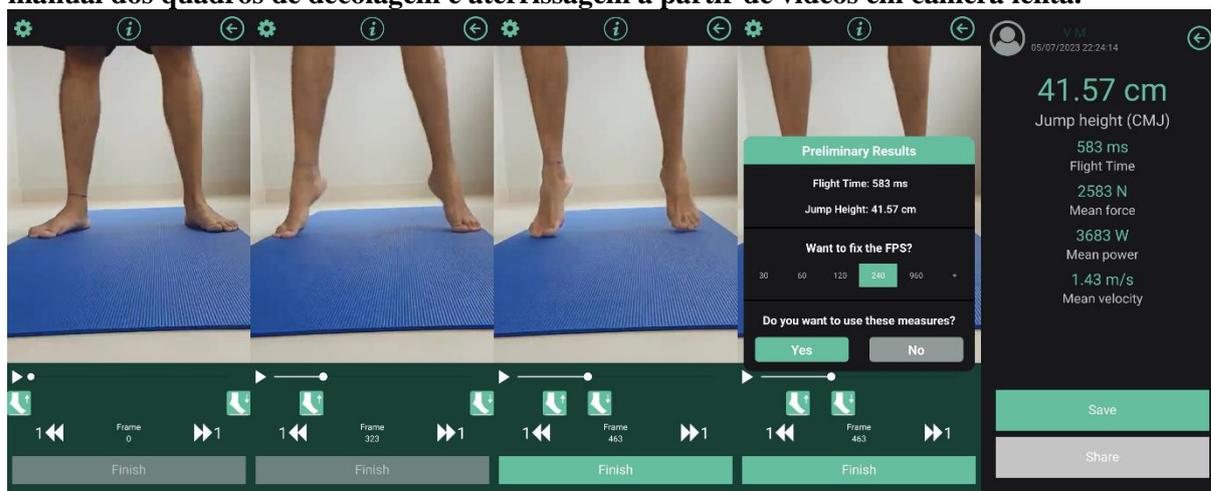


Fonte: elaboração própria. Da esquerda para a direita: teste do salto de contramovimento (*Countermovement Jump*), salto de agachamento (*Squat Jump*), salto em queda (*Drop Jump*), salto com sobrecarga (*Weighted Jump*) e salto unilateral (*Single Leg Jump*).

A versão inicial do aplicativo partiu das funcionalidades básicas de avaliação do salto pela marcação manual dos quadros de decolagem e aterrissagem, direcionadas para saltos com contramovimento (SCM), saltos agachados, saltos em queda, saltos com sobrecarga e saltos unilaterais (Figura 17). Para usar essas funções, basta gravar um vídeo em câmera lenta pelo aplicativo padrão do seu celular, escolher o tipo do salto desejado na página inicial de testes e fornecer as informações necessárias para cada tipo de salto. Em seguida, criar o perfil do atleta no aplicativo, fornecer suas medidas antropométricas e escolher a opção da galeria para carregar o vídeo gravado do salto. É recomendado dar um *zoom* no pé do atleta para facilitar a

identificação dos quadros de aterrissagem e decolagem na interface de manipulação de vídeo. Uma vez encontrados, uma prévia do valor é apresentada para conferir sua coerência, fornecendo a opção de mudar a taxa de aquisição de quadros (fps) do vídeo, caso esteja incorreta. Por fim, o resultado da avaliação é fornecido, contendo a altura do salto, tempo de voo, força média, velocidade média e potência média (SAMOZINO et al., 2008) (Figura 18).

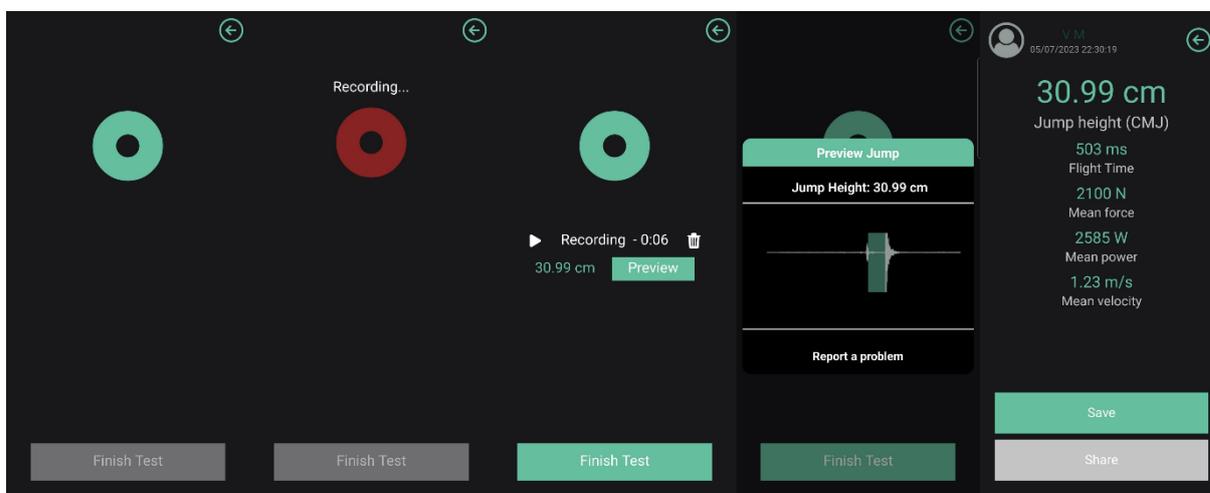
Figura 18: Procedimento de avaliação do salto de contramovimento no Jumpo 2, por indicação manual dos quadros de decolagem e aterrissagem a partir de vídeos em câmera lenta.



Fonte: elaboração própria.

A funcionalidade de áudio foi acrescentada ao aplicativo. Neste caso, foi configurado um servidor desenvolvido em Python usando a ferramenta Flask e configurado na plataforma Amazon AWS. Ao selecionar o salto e o atleta, uma opção de áudio aparece ao lado da opção da galeria. Para executar o registro dos sons do salto, basta posicionar o celular ao lado do pé do saltador, apertar o botão circular central de gravação, realizar o salto e apertar o botão novamente para parar a gravação. Em seguida, basta apertar o botão “Process” para enviar a gravação para o servidor e, dentro de alguns segundos, receber o resultado preliminar do teste. Caso o resultado esteja coerente, avaliado pela altura do salto esperada e pela imagem com o sinal de áudio e o momento de voo identificado, o usuário pode prosseguir com salto e receber os resultados da avaliação (Figura 19). Nesse caso, é possível realizar várias gravações em sequência e o aplicativo irá processar e fornecer o valor médio entre os saltos. Também é possível deletar um salto incoerente para não ser incluído no cálculo da média.

Figura 19: Procedimento de avaliação do salto de contramovimento no Jumbo 2, por gravações de áudio usando o algoritmo de análise de espectrograma proposto.



Fonte: elaboração própria.

Além das funções básicas de avaliação do salto, o aplicativo também permite salvar os saltos localmente e analisar todos os saltos realizados por um atleta na página do atleta. Nesta tela, é possível ter uma visão geral (sumário) dos saltos, com médias, DP, máximos e mínimos, uma visão gráfica com a média dos saltos, e as funções mais específicas de análise de fadiga pré e pós treino e do teste de assimetria, no caso de saltos unilaterais.