



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Análise do Salto Vertical com
Contramovimento Utilizando Sensores
Inerciais**

Rafael Barbosa

Marina Garcia

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

Brasília

2022

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Análise do Salto Vertical com
Contramovimento Utilizando Sensores
Inerciais**

Rafael Barbosa

Marina Garcia

Trabalho de Graduação submetido como re-
quisito parcial para obtenção do grau de Enge-
nheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Baptista

Brasília

2022

B238a Barbosa, Rafael
 Análise do Salto Vertical com Contramovimento Utilizando
 Sensores Inerciais / Rafael Barbosa; Marina Garcia; orientador
 Roberto Baptista. -- Brasília, 2022.
 50 p.

 Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automa-
 ção -- Universidade de Brasília, 2022.

 1. Salto vertical. 2. Sensores inerciais. 3. Processamento de
 sinais. I. Garcia, Marina. II. Barbosa, Rafael. III. Baptista, Roberto,
 orient.

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Análise do Salto Vertical com Contramovimento
Utilizando Sensores Inerciais**

Rafael Barbosa
Marina Garcia

Trabalho de Graduação submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Trabalho aprovado. Brasília, 20 de setembro de 2022:

Prof. Dr. Roberto Baptista, UnB/FGA
Orientador

Prof. Dra. Claudia Ochoa, UnB/FGA
Examinador interno

Prof. Dr. Amilton Vieira, Unb/FEF
Examinador interno

Brasília
2022

Resumo

Este trabalho tem como foco a análise do salto vertical com contramovimento (CMJ) utilizando sensores inerciais (IMUs), sendo investigadas diferentes técnicas para estimar a altura do salto. São investigadas três metodologias para a medida da altura do salto: o cálculo da altura pelo tempo de voo, o cálculo da altura pela velocidade de propulsão e a estimativa da altura pelo deslocamento obtido a partir da dupla integração numérica do sinal de aceleração. Os resultados obtidos foram comparados com os do sistema de MOCAP (Vicon), que é o padrão ouro na estimativa de trajetórias do movimento humano, e com os da plataforma de força que é o método mais utilizado para a estimativa da altura da altura do salto por meio do tempo de voo. Foi constatado que é possível realizar a estimativa da altura do salto por meio de sensores inerciais com as metodologias implementadas. Pelo método da dupla integração, obtivemos um erro de 8.111% em relação ao MOCAP. Por meio da medida de velocidade de propulsão foi obtido um erro de 6.079%, também em relação ao Vicon e para o método de tempo de voo foi obtido um erro de 5.871% comparando-se com a plataforma de força. Finalmente, constatou-se, também, que os equipamentos considerados o padrão ouro na análise da altura do CMJ apresentam variações e inconsistências, principalmente devido a diferenças apresentadas nos saltos realizados.

Palavras-chave: Salto vertical. Sensores inerciais. Processamento de sinais.

Abstract

This work focuses on the analysis of the countermovement jump (CMJ) using inertial measurement units (IMUs), being investigated by different techniques to estimate the jump height. Three methodologies are proposed to measure the jump height: the calculation of the height using the time of flight, using the take-off velocity, and the estimation of the height by analyzing the displacement obtained from the double integration of the acceleration signal. The results obtained were compared with those of the MOCAP system (Vicon), which is the gold standard in estimating human movement trajectories, and of a force platform, which is the most used equipment for estimating the jump height using the flight time technique. It was found that it is possible to estimate the jump height through inertial sensors with the implemented methodologies. Using the double integration method, we obtained an error of 8,111% compared to the MOCAP. Through the take-off velocity method, an error of 6,079% was achieved, also concerning the Vicon results. For the flight time method, an error of 5,871% was obtained compared to the force platform. Finally, it was also stated that the equipment taken as gold standard in the analysis of the CMJ presents variations and inconsistencies, mainly due to differences presented in the jumps performed.

Keywords: Vertical Jump. Inertial Measurement Units. Signal Processing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sensor inercial 3-Space Sensor da YostLabs.	15
Figura 2 – Modelos do acelerômetro e giroscópio presentes nos sensores inerciais.	17
Figura 3 – Movimento balístico. Pode ser dividido nas etapas de subida (etapa 1) e descida (etapa 2).	18
Figura 4 – Gráfico da aceleração e velocidade com a representação das fases do CMJ. Em que A é a fase de Pré-movimento, B é a fase de Contra-movimento, C é a fase de Esticar, D é a fase de Propulsão, E é a fase de Voo e F a fase de Aterrissagem.	19
Figura 5 – <i>Frames</i> das fases do CMJ. Em que A é a fase de Pré-movimento, B é a fase de Contra-movimento, C é a fase de Esticar, D é a fase de Propulsão, E é a fase de Voo e F a fase de Aterrissagem.	20
Figura 6 – Sinal senoidal decomposto no espectro de frequências de magnitude.	20
Figura 7 – Resposta em frequência do filtro Butterworth.	21
Figura 8 – Exemplo de remoção de erros de Deriva.	22
Figura 11 – Eixos de referência global e local das IMU's.	27
Figura 12 – <i>Setup</i> de coleta: pode-se observar nesta imagem 3 das 8 câmeras infravermelho em funcionamento, a plataforma de força e os marcadores posicionados para a coleta <i>Lower Body</i>	28
Figura 13 – Localização dos marcadores utilizados no sistema de captura de movimento Vicon.	29
Figura 14 – Posicionamento dos marcadores e IMU para a coleta de dados.	29
Figura 15 – Remoção da tendência proveniente das integrações do sinal da plataforma de força.	31
Figura 16 – Fluxograma dos processos realizados para cada um dos métodos de estimativa da altura do salto: FT, TOV e DI.	32
Figura 17 – Remoção de ruídos do sinal de aceleração no eixo vertical proveniente da IMU.	32
Figura 18 – Aplicação do <i>spline</i> cúbico de 150Hz na aceleração.	33
Figura 19 – Obtenção do tempo de voo por <i>threshold</i> na aceleração, os pontos definidos como início e chegada do salto estão destacados em verde e vermelho. Estes pontos não estão exatamente sobre a reta do <i>threshold</i> pois o sinal é discreto, mas são estes os pontos mais próximos à reta.	33
Figura 20 – Aplicação do filtro passa altas para a remoção da deriva na velocidade.	34
Figura 21 – Aplicação do filtro passa altas para a remoção da deriva na posição.	35
Figura 22 – Gráfico dos tempos de voo obtidos pelos três equipamentos. Este gráfico é de apenas um indivíduo que apresentou um dos melhores resultados.	37

Figura 23 – Correlação entre o IMU e a plataforma de força. $\rho = 0.982$	38
Figura 24 – Correlação entre o Vicon e a plataforma de força. $\rho = 0.993$	38
Figura 25 – Bland-Altman comparando o resultado da IMU com o da plataforma de força para o método FT.	39
Figura 26 – Bland-Altman comparando o resultado do Vicon com o da plataforma de força para o método FT.	39
Figura 27 – Sinal de velocidade obtido utilizando as tecnologias Vicon, plataforma de força e IMU. Este gráfico é de apenas um indivíduo que apresentou um dos melhores resultados.	39
Figura 28 – Correlação entre IMU e Vicon. $\rho = 0.953$	40
Figura 29 – Correlação entre plataforma de força e Vicon. $\rho = 0.974$	40
Figura 30 – Bland-Altman comparando o resultado da IMU com o do Vicon para o método TOV.	41
Figura 31 – Bland-Altman comparando o resultado da plataforma de força com o do Vicon para o método TOV.	41
Figura 32 – Deslocamento obtida utilizando as tecnologias Vicon, plataforma de força e IMU. Este gráfico é de apenas um indivíduo que apresentou um dos melhores resultados.	41
Figura 33 – Correlação entre IMU e Vicon. $\rho = 0.904$	42
Figura 34 – Correlação entre plataforma de força e Vicon. $\rho = 0.942$	42
Figura 35 – Bland-Altman comparando o resultado da IMU com o do Vicon para o método DI.	42
Figura 36 – Bland-Altman comparando o resultado da plataforma de força com o do Vicon para o método DI.	42
Figura 37 – Instantes de decolagem e aterrissagem do salto vertical. Observa-se que as inclinações são diferentes na chegada e saída, aumentando de forma não natural o tempo de voo do indivíduo.	43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Trabalhos que compararam os equipamentos IMU, Vicon e Plataforma de Força e os métodos FT, TOV e DI.	26
Tabela 2 – Médias, MAE e MAPE das medidas da altura para a IMU e para o Vicon em relação à Plataforma de Força.	38
Tabela 3 – Médias, MAE e MAPE das medidas da altura para a IMU e Plataforma de Força me relação ao Vicon.	40
Tabela 4 – Médias, MAE e MAPE das medidas de altura para a IMU e Plataforma de Força em relação ao Vicon.	41
Tabela 5 – Comparação da altura média obtida pelos três equipamentos, utilizando os três métodos	43

Lista de abreviaturas e siglas

CMJ	Counter Movement Jump	14
DI	Double Integration	16
FT	Flight Time	16
IMU	Inertial Measurement Unit.....	13
MAE	Mean Absolute Error	23
MAPE	Mean Absolute Percentage Error	23
MOCAP	Motion Capture	13
SD	Standard Deviation	38
TOV	Take off Velocity.....	16
MEMS	Microelectromechanical systems	16

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TÉCNICA	15
2.1	Sensores Inerciais - IMU's	15
2.1.1	A física dos sensores inerciais	16
2.2	Cinemática do CMJ	16
2.2.1	O movimento balístico	16
2.2.2	Estimativa da altura do salto pelo método FT	17
2.2.3	Estimativa da altura do salto pelo método TOV	18
2.2.4	Estimativa da altura do salto pelo método DI	18
2.3	Fases do CMJ	18
2.4	Análise Espectral	20
2.4.1	A transformada de Fourier	20
2.4.2	Filtro Butterworth	21
2.5	Interpolação por Splines	22
2.5.1	Cubic-Splines	22
2.6	Remoção de erros de Deriva - Detrending	22
2.7	Validação dos resultados	23
2.7.1	Coefficiente de Pearson	23
2.7.2	O erro médio absoluto	24
2.7.3	Análise de Bland-Altman	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Levantamento de estudos sobre o CMJ - métodos e equipamentos mais utilizados	26
3.2	Coleta de Dados	26
3.2.1	Sujeitos	26
3.2.2	Sensores Utilizados	27
3.2.2.1	IMUs	27
3.2.2.2	Vicon	28
3.2.2.3	Plataformas de Força	29
3.2.2.4	Processamento Inicial dos Dados de Força e Trajetórias do Vicon	30
3.3	Processamento dos Dados da IMU	31
3.3.1	Filtragem e Reamostragem	31
3.3.2	Estimativa da altura pelo método FT	31

3.3.3	Estimativa da altura pelo método TOV	34
3.3.3.1	Obtenção da Velocidade	34
3.3.3.2	Correção da Deriva	34
3.3.4	Estimativa da altura pelo método DI	34
3.3.4.1	Sinal de Deslocamento	35
3.3.4.2	Correção da Deriva	35
3.4	Procedimentos de Análise	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Estimativa da altura do salto pelo método FT	37
4.2	Estimativa da altura do salto pelo método TOV	39
4.3	Estimativa da altura do salto pelo método DI	40
4.4	Comparação das metodologias e equipamentos	43
5	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS	47

1 Introdução

A análise do movimento humano é baseada na detecção, rastreamento e reconhecimento de pessoas. É um campo de estudos que reúne conceitos de robótica, biomecânica e visão computacional, áreas que vêm crescendo de forma exponencial nos últimos anos. Como consequência, a análise do movimento humano vêm se desenvolvendo cada vez mais e sendo bastante utilizada na solução de problemas nas áreas esportivas, tanto no esporte de alto rendimento quanto para atletas amadores, e também na reabilitação, em pacientes que sofreram lesões ou com deficiências motoras (HELLSTEN et al., 2021; COLYER et al., 2018).

Dentre os movimentos estudados, o salto vertical é especialmente relevante devido à sua simplicidade e usabilidade. A análise deste movimento permite a obtenção de diversas métricas, como tempo de voo, velocidade de saída e ângulo das articulações. A partir dessas medidas é possível ainda estimar outros valores importantes como altura do salto e potência muscular dos membros inferiores. Portanto, o monitoramento do salto vertical tem grande utilidade no acompanhamento de desempenho esportivo, fadiga e na evolução de treinamentos (LOTURCO et al., 2017; MCMAHON et al., 2018; SANTOS et al., 2022; MCGINNIS et al., 2016; TOFT NIELSEN et al., 2019).

No estudo do salto vertical, pode ser feita uma análise do movimento completo onde é feita a separação cada etapa e a influência destas etapas no desempenho dos atletas ou, de forma mais simplificada, pode-se considerar apenas da altura do salto. Geralmente esta estimativa é realizada a partir do tempo de voo e assumindo aceleração constante do centro de massa do indivíduo. Para a obtenção de tais métricas, pode-se utilizar: sistemas de captura de movimento (MOCAPs), plataformas de força, tapetes de contato, sensores inerciais, câmeras RGB simples. A técnica escolhida depende do grau de precisão exigido, da portabilidade e do investimento disponível (CONCEIÇÃO et al., 2022).

Os sistemas de MOCAPs, como Vicon e Qualisys, são compostos por um conjunto de câmeras e marcadores, sendo capazes de reconstruir em 3 dimensões o movimento estudado com precisão milimétrica. Sistemas assim possibilitam quantificar o deslocamento do centro de massa ou de pontos específicos, assim como sua velocidade e aceleração (MCGINNIS et al., 2016). No entanto, estes sistemas chegam a custar centenas de milhares de dólares, tem uso geralmente limitado aos laboratório e exigem um pós processamento quando ocorre oclusão de marcadores, situação comum na análise de exercícios físicos (ADESIDA; PAPI; MCGREGOR, 2019; MCGINNIS et al., 2016).

Como mencionado, o salto vertical é o exercício mais utilizado nas academias para medir o desempenho de membros inferiores, e os equipamentos mais utilizados são as plataformas de força e os tapetes de contato. As plataformas de força medem, por meio de

sensores, a força contrária do movimento com uma taxa de amostragem de cerca de 1000 Hz. A utilização destas plataformas permite obter diretamente a força exercida sobre a plataforma durante a execução do movimento. E a partir dessa medida, é possível estimar outras variáveis como tempo de voo (instantes em que o indivíduo não exerce força na plataforma), velocidade e potência (MCMAHON et al., 2018). As desvantagens das plataformas de força estão em seu custo elevado, baixa portabilidade e complexidade na instalação. Como alternativa são utilizados tapetes de contato, que medem a altura do salto basicamente calculando os instantes de decolagem e chegada através de um cronômetro que se inicia e para pelo contato do sujeito no tapete. Estes também possuem uma taxa de amostragem de mais de 1000 Hz. A portabilidade dos tapetes é bem mais alta, no entanto, medem apenas o tempo de voo e seu custo ainda é elevado, não sendo acessíveis ao grande público.(WHITMER et al., 2015)

As unidades de medição inerciais (IMUs) são sensores de posição e orientação de baixo custo e grande portabilidade (a maior parte dos *smartphones* e dispositivos *wearables* contém IMUs). Estes sensores podem ser fixados em pontos estratégicos do corpo dos indivíduos com o intuito de se obter ângulos de flexão e aceleração para a análise do movimento. Através destes sensores é possível obter estimativas de métricas como tempo de voo, velocidade de saída e conseqüentemente altura do salto (MCGINNIS et al., 2016). Suas limitações incluem sensibilidade a interferência de ruídos eletromagnéticos, além de estarem sujeitos a erros de posicionamento e aos desafios no processamento dos dados.(ADESIDA; PAPI; MCGREGOR, 2019)

A análise de movimento por meio de câmeras RGB é muito acessível, tendo em vista a ampla presença de dispositivos móveis com boa qualidade de câmera e processamento. A identificação do movimento neste caso é feita com o uso de redes neurais como BlazePose e Movenet de forma automática e, de forma semiautomática, por softwares como o Kinovea (PUEO; PENICHET-TOMAS; JIMENEZ-OLMEDO, 2020). São identificados pontos e ângulos de interesse no corpo humano, como a posição do centro de massa e ou a flexão do joelhos e tornozelos. Esses pontos podem ser utilizados para calcular os instantes de partida e chegada no salto vertical, por exemplo. Uma das limitações nesse método é que a medida é feita de forma indireta, isto é, são medidos pixels e não distâncias, assim torna-se um desafio realizar a constituição três dimensões da pose humana (WANG, X.; WANG, F.; CHEN, 2017). Portanto os algoritmos usados na identificação dos instantes chave do movimento normalmente não são generalizados para gravações com distâncias variáveis. Por este motivo, para a utilização do vídeo para a análise de movimento, as capturas são muitas vezes realizadas com a limitação de um único plano (sagital).

1.1 Objetivos

Pela importância da análise do salto vertical, e das dificuldades que limitam o uso das metodologias consideradas padrão ouro, este trabalho traz como proposta a validação das IMUs como instrumento para a análise do salto vertical com contramovimento (CMJ). Esses sensores são compostos normalmente por acelerômetros, giroscópios e magnetômetros, e são acoplados ao corpo do usuário para obter os dados. Ademais, a metodologia possui um custo financeiro mais baixo e não demanda solo ou local específico, flexibilizando o ambiente para realização das análises. Nesse contexto, a utilização de unidades inerciais neste trabalho tem como principal objetivo tornar a análise do salto vertical mais portátil e acessível. Os resultados obtidos neste trabalho podem favorecer a implementação e realização deste tipo de análise através do uso de *smartphones*.

Com as IMUs é possível obter métricas como aceleração e orientação espacial absoluta de um objeto em tempo real. Neste trabalho, a análise por meio destes sensores inerciais é focada no sinal de aceleração no eixo vertical (corrigida pela orientação, como é explicado de forma mais detalhada na seção 3.2.2.1). Por meio do sinal de aceleração da IMU é possível realizar integrações numéricas do sinal e obter sinais de velocidade e posição, tornando possível a utilização destes sinais para obter diversas métricas, sendo a mais utilizada e o foco deste trabalho a altura máxima do salto. Por sua vez, a altura do salto pode ser obtida pelo tempo de voo (FT) e pela velocidade de propulsão (TOV), considerando um movimento balístico ou com a comparação entre o ponto de máximo e inicial com o sinal da posição pelo método da dupla integração numérica (DI).

No trabalho de [McGinnis et al. \(2016\)](#) é feita a estimativa da altura do salto por meio da dupla integração (DI) da aceleração do sinal da IMU (para a obtenção da posição) e realizada a comparação com o sinal de posição obtido com o Vicon. No trabalho de [Moir \(2008\)](#), são utilizadas as técnicas FT e TOV com a plataforma de força para a estimativa da altura do salto e a comparação é realizada entre os métodos. No trabalho de [Toft Nielsen et al. \(2019\)](#) são utilizadas as técnicas FT, TOV e DI nas IMUs e nas plataformas de força, porém no Vicon é usado apenas o sinal de posição na comparação. Desse modo, um diferencial deste trabalho é que são analisados tempo de voo, velocidade de propulsão e sinal de posição para as três tecnologias e é proposta uma análise da confiabilidade das medidas em relação aos respectivos equipamentos consideradas padrão ouro. Além disso, também é realizada uma análise comparando os métodos.

2 Fundamentação Teórica e Técnica

Neste capítulo, serão apresentados os princípios de funcionamento dos sensores inerciais, cinemática e fases do salto vertical e como é feita a análise espectral, filtragem e *detrending* de sinais.

2.1 Sensores Inerciais - IMU's

Os sensores inerciais ou unidades de medição inerciais são dispositivos eletrônicos capazes de perceber os efeitos de forças que geram mudanças no estado inercial de um sistema. Para a análise de movimento, estes dispositivos, são tipicamente utilizados sem fios e acoplados ao corpo dos indivíduos (*wearables*). Portanto, os sensores inerciais tornam possível a realização da análise dos movimentos desejados em ambientes com poucas restrições. Na figura 1 é possível observar o sensor utilizado neste projeto.



Figura 1 – Sensor inercial 3-Space Sensor da YostLabs.

Fonte: (LABS, 2022)

As IMUs são transdutores que, normalmente, utilizam uma combinação de acelerômetros, giroscópios e magnetômetros. Estes sensores são utilizados para determinar a orientação relativa em relação a uma orientação de referência absoluta em tempo real em seu próprio sistema de coordenadas local tridimensional. Este sistema de coordenadas representa uma base ortonormal normalmente alinhada com a superfície externa do sensor.

Dos sensores presentes nas IMUs, o magnetômetro é o que mais sofre interferência do meio em que está inserido, principalmente em ambientes fechados ou próximos a dispositivos

que influenciem o campo magnético (ADESIDA; PAPI; MCGREGOR, 2019). Por esse motivo, neste trabalho são utilizados apenas o acelerômetro e giroscópio presentes nas IMUs.

O acelerômetro presente nos sensores inerciais mede a aceleração em três eixos. Pode ser utilizado como um inclinômetro, fornecendo um ângulo de inclinação do sensor em relação ao vetor gravidade. Integrando os dados de aceleração é possível obter estimativas de velocidade e deslocamento, porém esse tipo de operação pode introduzir significantes erros de deriva nos resultados (MCGINNIS et al., 2016). O giroscópio é utilizado para realizar medidas de velocidade angular, também em três eixos. A partir da velocidade angular, realizando novamente uma operação de integração podemos obter as mudanças na orientação espacial do objeto, porém essa operação também suscetível a crescentes erros de deriva.

2.1.1 A física dos sensores inerciais

Acelerômetros do tipo MEMS são, de modo simplificado, uma massa suspensa por duas molas, como pode ser observado na figura 2a. A massa tem valor conhecido e quando a IMU é submetida a uma aceleração no eixo de sensibilidade há uma variação da posição neste eixo e esta alteração é proporcional à aceleração. (VECTORNAV, 2022)

Por outro lado, giroscópios podem utilizar a configuração de *tuning fork*, como é apresentado na figura 2b, onde duas massas são conectadas por uma mola. Quando uma velocidade angular é aplicada a Força de Coriolis age em cada massa na direção oposta e isso resulta em uma alteração da capacitância que é proporcional à velocidade angular, quando uma aceleração linear age sobre o sensor as massas movem na mesma direção não alterando a capacitância e resultando em uma velocidade angular nula. (VECTORNAV, 2022)

2.2 Cinemática do CMJ

Nesta seção, serão desenvolvidos conceitos básicos de como é feita a análise cinemática do CMJ e os processamentos necessários para se obter a altura máxima no movimento por tempo de voo (FT), velocidade de propulsão (TOV) e dupla integração numérica do sinal da aceleração (DI).

2.2.1 O movimento balístico

A análise da dinâmica e cinemática de corpos rígidos pode se tornar muito complexa rapidamente, no entanto no caso do salto de contra movimento pode ser considerado apenas o movimento de um ponto localizado no centro de massa do indivíduo. Desta forma o salto de contramovimento pode ser analisado como a trajetória de um projétil. Quando desconsiderada a resistência do ar, a única força que atua sobre o corpo é a força peso, transformando a trajetória em um movimento balístico. Além disso, apesar da existência de

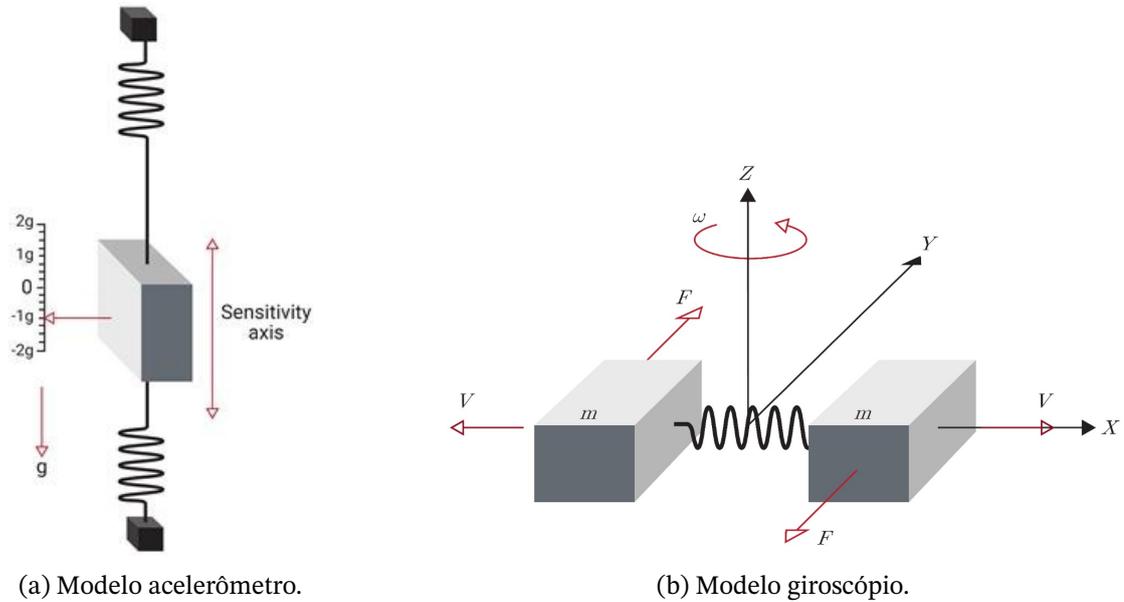


Figura 2 – Modelos do acelerômetro e giroscópio presentes nos sensores inerciais.

Fonte: (VECTORNAV, 2022)

deslocamento horizontal nos saltos, estes são independentes do movimento vertical utilizado para calcular a altura máxima atingida. Assim, a equação do movimento vertical do centro de massa é dada por 2.1 e a velocidade é dada pela equação 2.2 (HIBBELER, 2010).

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (2.1)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(y - y_0) \quad (2.2)$$

onde y é a posição vertical final, y_0 é a posição inicial, v é a velocidade final, v_0 é a velocidade inicial, a é aceleração e t é o tempo.

2.2.2 Estimativa da altura do salto pelo método FT

Para o cálculo da altura máxima pelo FT, usa-se a equação 2.1. Para isso, primeiro é importante notar que será utilizada apenas metade do movimento, logo o tempo será dividido por 2. A fim de facilitar os cálculos, será considerada a segunda etapa do movimento (apresentada na figura 3) em que a velocidade inicial (v_0) é nula. Também é importante notar que é feita a relação $y - y_0 = h$, onde h é a altura do salto, e $a = g = 9.81 m/s^2$. Com isso obtemos a altura do salto com a equação 2.3.

$$h = \frac{g \cdot (FT)^2}{8} \quad (2.3)$$

onde FT é a o tempo de voo em segundos (*Flight Time*).

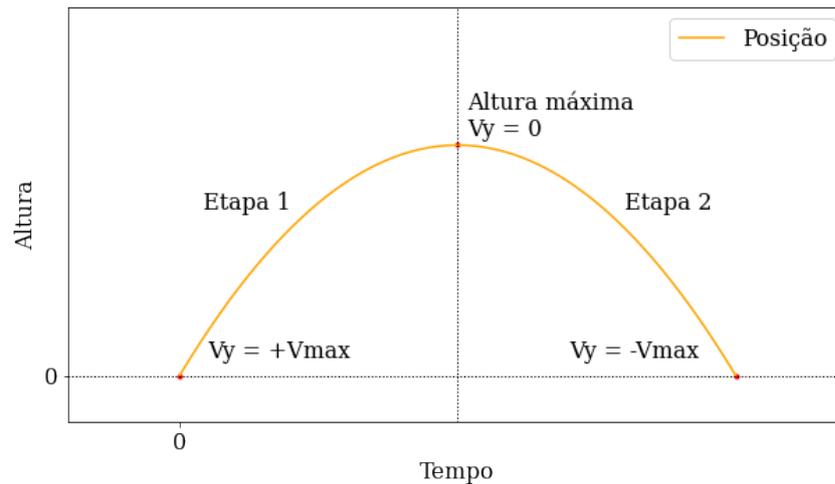


Figura 3 – Movimento balístico. Pode ser dividido nas etapas de subida (etapa 1) e descida (etapa 2).

2.2.3 Estimativa da altura do salto pelo método TOV

Para o cálculo da altura pelo TOV é utilizada a primeira etapa do movimento apresentado na figura 3. Assim a velocidade vertical final é nula, novamente é feito $y - y_0 = h$ e $a = g = 9.81m/s^2$ e é obtida a equação 2.4.

$$h = \frac{(TOV)^2}{2g} \quad (2.4)$$

onde TOV é a a velocidade de propulsão em metros por segundos (*Take off velocity*).

2.2.4 Estimativa da altura do salto pelo método DI

Por fim, para realizar o cálculo da altura do salto pelo método da dupla integração é necessário apenas obter o ponto de máximo do sinal e subtrair deste o valor da altura inicial.

2.3 Fases do CMJ

Para que seja possível realizar uma análise efetiva do CMJ precisamos primeiro ser capazes de identificar as fases do movimento. Para isso existem alguns termos e métodos diferentes. Considerando 6 principais fases, temos: fase pré-movimento, fase de contramovimento, fase de esticar, fase de propulsão, fase de voo e fase de aterrissagem (MCMANON et al., 2018).

Com os sinais de aceleração e velocidade do CMJ, é possível separar essas fases da seguinte forma (figura 4):

- a) **Fase Pré-movimento:** o sujeito em análise permanece em pé sem se movimentar, consiste na fase que precede o movimento do CMJ em si.

- b) **Fase de Contramovimento:** começa quando a aceleração atinge um valor inferior a um *threshold* previamente determinado, consiste na fase em que o sujeito inicia o movimento para baixo.
- c) **Fase de Esticar:** começa quando o sujeito volta a extender os joelhos e a velocidade começa a aumentar.
- d) **Fase de Propulsão:** inicia-se quando a velocidade (negativa durante a fase de esticar) passa pelo zero e volta a ter um valor positivo.
- e) **Fase de Voo:** é marcada pelo instante em que o sujeito deixa o chão, momento de máxima velocidade (velocidade de propulsão).
- f) **Fase de Aterrissagem:** finalmente, a última fase do movimento e se inicia quando o sujeito volta a tocar o chão após o salto e termina quando é retomada a posição estática inicial.

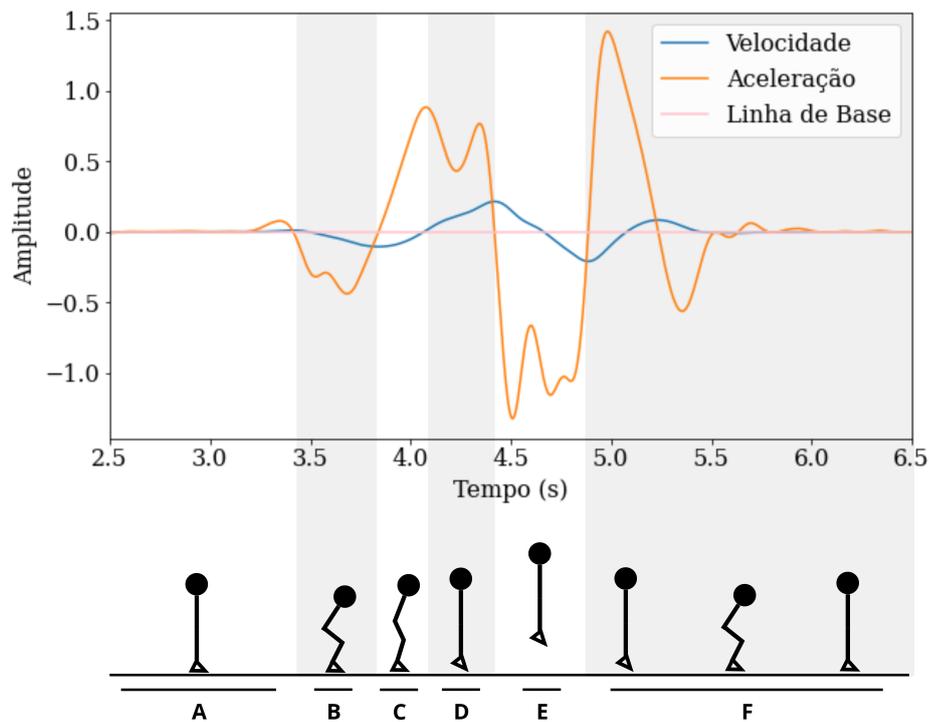


Figura 4 – Gráfico da aceleração e velocidade com a representação das fases do CMJ. Em que A é a fase de Pré-movimento, B é a fase de Contra-movimento, C é a fase de Esticar, D é a fase de Propulsão, E é a fase de Voo e F a fase de Aterrissagem.

Na figura 5 podemos observar as fases do CMJ a partir de *frames* específicos no vídeo do movimento.

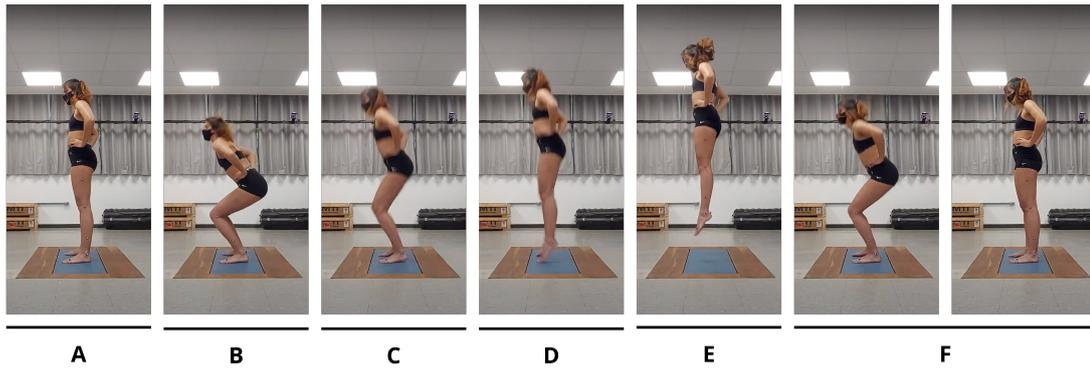


Figura 5 – *Frames* das fases do CMJ. Em que A é a fase de Pré-movimento, B é a fase de Contra-movimento, C é a fase de Esticar, D é a fase de Propulsão, E é a fase de Voo e F a fase de Aterrissagem.

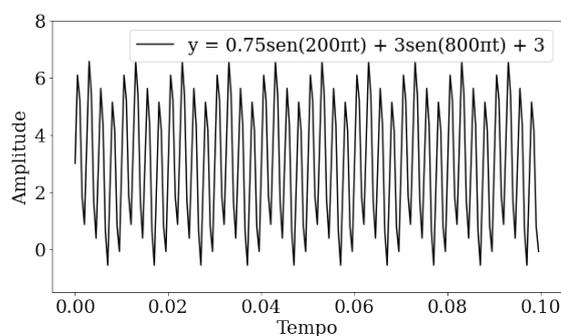
2.4 Análise Espectral

Nesta seção será mostrada como é feita a análise espectral com a utilização da transformada de Fourier e como esta pode ser empregada para o desenho de filtros para a remoção de ruídos de alta e baixa frequência.

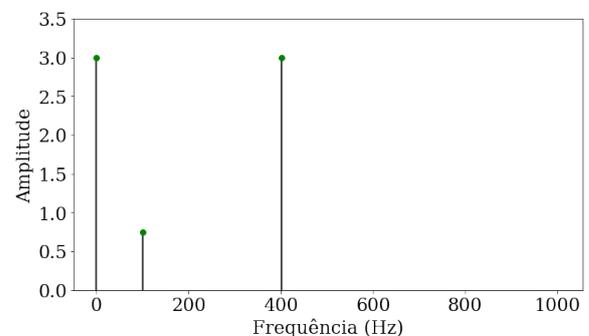
2.4.1 A transformada de Fourier

Analisar sinais no domínio da frequência traz informações que muitas vezes não são facilmente observadas no domínio do tempo. A forma mais simples de se analisar o espectro de frequências de um sinal é a utilização da transformada de Fourier (JOHN L. SEMMLOW, 2014).

A transformada de Fourier realiza integrações de um sinal temporal de modo que a função resulte em uma soma de termos senoidais. A partir dessa decomposição é possível mapear um sinal temporal em um sinal no domínio da frequência. Como é apresentado nas figuras 6a e 6b (JOHN L. SEMMLOW, 2014).



(a) Sinal senoidal.



(b) Espectro de Magnitude de Fourier.

Figura 6 – Sinal senoidal decomposto no espectro de frequências de magnitude.

A decomposição de sinais em senoides tem como base o Teorema da Série de Fourier.

O Teorema define que, não importando o quão complicado seja um sinal periódico, este pode ser decomposto em uma soma de senoides com a mesma frequência, ou de frequências múltiplas. Matematicamente, um sinal discreto $x[n]$ pode ser descrito pelos somatórios apresentados nas equações 2.5 e 2.6 (JOHN L. SEMMLOW, 2014).

$$a[m] = \sum_{k=1}^N x[n] \cos(2\pi m f_1 n T_s) \quad m = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2.5)$$

$$b[m] = \sum_{(n=1)}^N x[n] \sin(2\pi m f_1 n T_s) \quad m = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2.6)$$

onde a e b são coeficientes da série, f_1 é a frequência fundamental e T_s é o período de amostragem do sinal.

A partir de um espectro de frequências, como o apresentado na figura 6b, são identificadas as frequências de interesse do sinal analisado e frequências que se deseja remover do sinal, geralmente ruídos alta ou baixa frequência, por meio de filtros.

2.4.2 Filtro Butterworth

Os filtros eletrônicos ou digitais processam sinais de modo que sejam eliminadas ou atenuadas características indesejadas da frequência. O filtro Butterworth é desenvolvido de forma a se obter a resposta mais plana possível na banda passante com um *ripple* (ondulações) muito pequeno. Na banda rejeitada, o ganho do filtro se aproxima de zero. Na figura 7 é apresentado o comportamento do ganho de um filtro Butterworth passa-baixas, neste caso pode-se observar que as frequências acima de 10 rad/s (frequência de corte) são atenuadas. Um filtro passa-altas, por outro lado, atenua baixas frequências e deixa passar frequências altas, enquanto um passa-faixa é a combinação de um passa-altas com um passa-baixas.

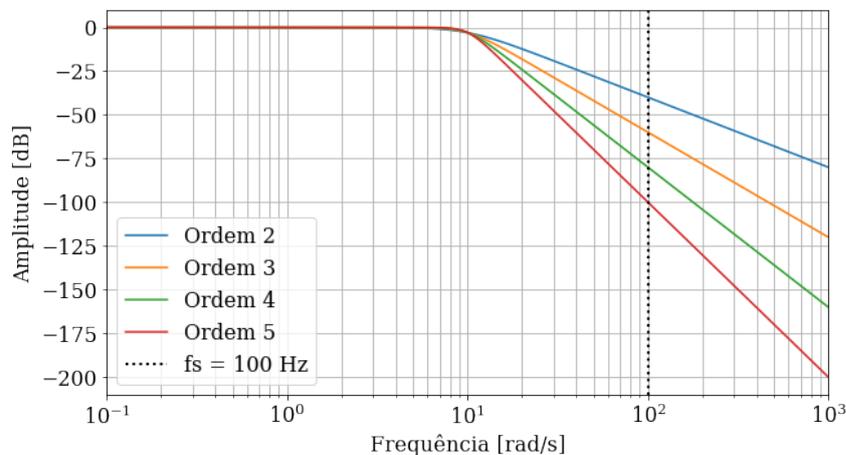


Figura 7 – Resposta em frequência do filtro Butterworth.

A equação de ganho de um filtro Butterworth é dada pela expressão 2.7.

$$G(w) = |H(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{w}{w_c}\right)^{2n}}} \quad (2.7)$$

onde G é o ganho, w é a frequência, j é o número imaginário, w_c é a frequência de corte do filtro e n é a ordem do filtro. Pela equação 2.7 e pela figura 7 é possível inferir que um filtro Butterworth de segunda ordem tem uma atenuação de -20 dB por década. Quanto maior a ordem do filtro, maior a atenuação e mais ele se aproxima de um filtro ideal. No entanto, aumentar indiscriminadamente a ordem do filtro traz complexidade ao sistema, podendo deixá-lo instável, e não necessariamente garante uma melhor resposta em frequência ao sistema (JOHN L. SEMMLOW, 2014).

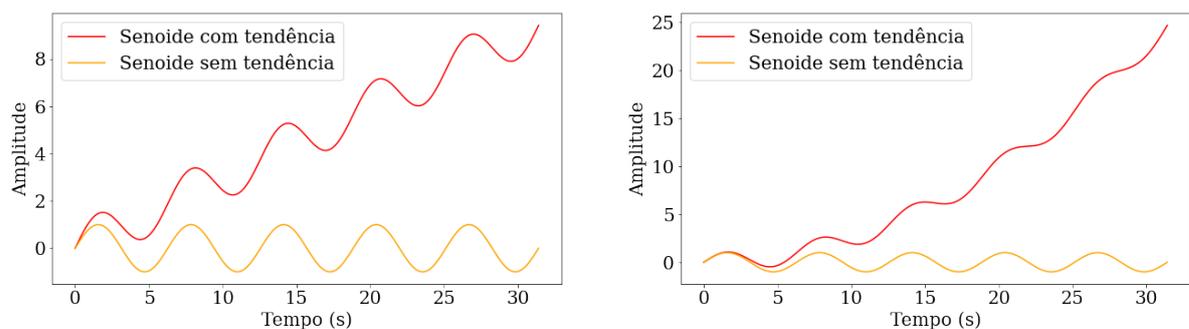
2.5 Interpolação por Splines

Nesta seção são apresentados de modo sucinto o que são *splines* e como é realizada a interpolação do sinal utilizando este método.

2.5.1 Cubic-Splines

Splines são funções polinomiais de baixa ordem. Estas funções são aplicadas a conjuntos de dados com baixa amostragem realizando uma interpolação, isto é, são utilizadas para preencher vácuos de dados (ROBERTSON, 2013). Neste trabalho, utilizamos esta técnica nos sinais obtidos pela IMU, que possui estes 'vazios' nos dados principalmente porque a comunicação entre a IMU e o *dongle* conectado ao computador é feita sem o uso de fios. Normalmente, na área de análise do movimento, o mais comum é a utilização de *splines* de terceira (*cubic-spline*) e quinta (*quintic-spline*) ordem. *Splines* cúbicos garantem a continuidade da função até sua segunda derivada.

2.6 Remoção de erros de Deriva - Detrending



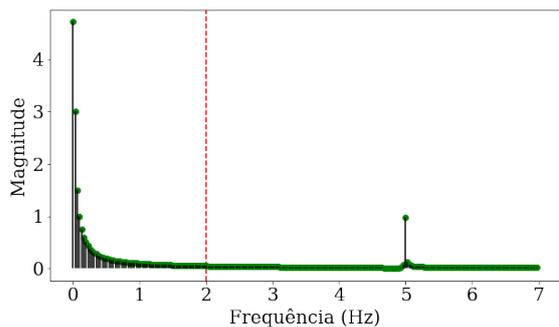
(a) Sinal senoidal com e sem tendência linear.

(b) Sinal senoidal com e sem tendência quadrática.

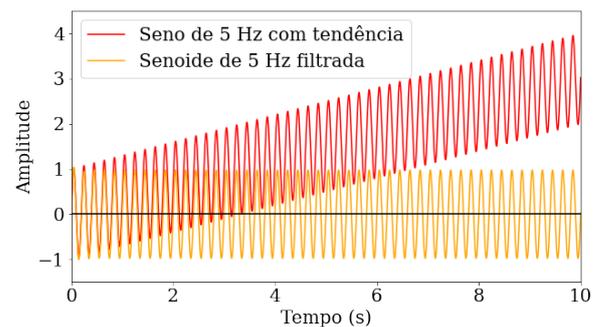
Figura 8 – Exemplo de remoção de erros de Deriva.

Detrending consiste em uma técnica de processamento que possui como objetivo remover dos dados alguma característica de tendência (*trend*) não cíclica. Normalmente, erros de deriva são adicionados em sinais de IMUs devido a natureza dos giroscópios que fazem parte destes sensores. Este comportamento pode ser observado nas figuras 8a e 8b: Na figura 8a é apresentado um sinal com uma tendência incremental linear (vermelho) e o respectivo sinal sem a mesma tendência (laranja), enquanto na figura 8b é apresentado um sinal com uma tendência incremental quadrática (vermelho) e o respectivo sinal corrigido sem tendência (laranja).

Existem diversas técnicas para realizar a remoção de tendências de um sinal, no processamento de dupla integração apresentado em McGinnis et al. (2016) são obtidas uma reta de tendência (na velocidade) e uma parábola de tendência (na posição). Essas equações são então subtraídas dos sinais analisados. É possível também considerar a tendência em um sinal com um ruído de baixa frequência e realizar a remoção da tendência com um filtro passa-altas Butterworth. Nas figuras 9a e 9b é possível observar como foi realizada essa correção neste trabalho.



(a) Espectro de Fourier de um sinal senoidal de 5 Hz com uma tendência linear incremental. Observa-se que 2 Hz é uma frequência de corte viável remove a tendência e mantém apenas o sinal de interesse.



(b) Sinal com tendência linear e sinal corrigido por filtro passa-altas. Em exemplos reais dificilmente o resultado é tão bom visto que as frequências ruidosas muitas vezes tem valores próximos ao sinal de interesse.

2.7 Validação dos resultados

2.7.1 Coeficiente de Pearson

Para identificar como se relacionam duas medidas pode-se calcular o Coeficiente de Pearson, que mede o grau de correlação entre duas variáveis e é representado por ρ . Este coeficiente assume valores entre -1 e 1, quando $\rho = 1$ significa uma correlação positiva perfeita entre os sinais, $\rho = -1$ significa uma correlação negativa perfeita e $\rho = 0$ significa que as variáveis não tem relações lineares entre si. Quanto ao grau da correlação, tanto positiva quanto negativa, de acordo com Mukaka (2012), podem ser classificadas em:

- a) 0.9 a 1.0 indica uma correlação muito forte;

- b) 0.7 a 0.9 indica uma correlação forte;
- c) 0.5 a 0.7 indica uma correlação moderada;
- d) 0.3 a 0.5 indica uma correlação fraca;
- e) 0 a 0.3 indica uma correlação desprezível.

2.7.2 O erro médio absoluto

O erro médio absoluto (MAE) é a medida do erro entre duas observações pareadas que expressam o mesmo fenômeno para um conjunto de medidas referência Y e um conjunto de medidas testadas X. O erro médio absoluto é dado pela equação 2.8 (WILLMOTT; MATSUURA, 2005).

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^N |Y_i - X_i|}{n} \quad (2.8)$$

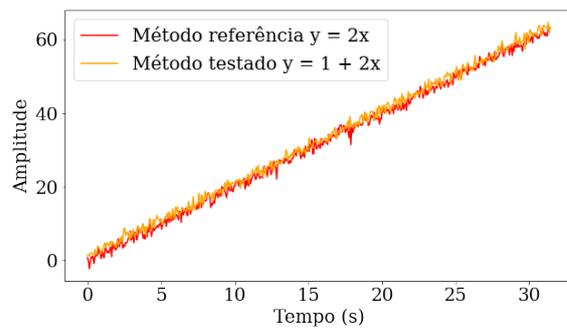
onde n é número de medidas. A partir do MAE, podemos obter também o erro médio absoluto em percentagem (MAPE).

2.7.3 Análise de Bland-Altman

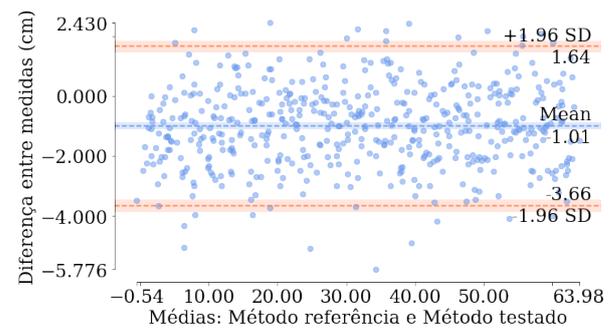
Enquanto a correlação e a regressão linear indicam apenas força, forma e direção da correlação entre duas medidas, os gráficos de Bland-Altman podem ser utilizados para realizar a detecção da presença de erros sistemáticos (viéses) entre dois métodos que realizam a mesma medição, além da detecção de possíveis *outliers*. O viés é calculado como a diferença média entre as duas medidas. Outra métrica importante é o limite de concordância, dado pela equação 2.9. Caso o limite de concordância não represente um valor relevante na comparação entre as medidas, os métodos podem ser permutados.

$$LC = M \pm 1.96 * SD \quad (2.9)$$

onde LC é o limite de concordância M é a média das diferenças e SD é o desvio padrão. Nas figuras 10a e 10b são apresentados dois sinais com funções lineares e como é possível com Bland-Altman detectar o viés de módulo um existente entre os sinais, implementados com o auxílio da biblioteca [PyCompare \(2022\)](#).



(a) Sinais lineares com erros randômicos adicionados de acordo com uma distribuição normal sendo que estes tem a mesma inclinação, mas coeficiente lineares de zero e de um.



(b) Gráfico de Bland-Altman desses sinais, é possível observar uma diferença média entre as medidas de módulo um. Por outro lado, os limites de concordância mostram os outliers.

3 Materiais e Métodos

O objetivo deste capítulo é descrever o passo a passo de como foram coletados os dados e dos processamentos realizados nos sinais para obter a altura do salto utilizando três diferentes metodologias (FT, TOV e DI), e três diferentes tecnologias (IMU, MOCAP e plataforma de força).

3.1 Levantamento de estudos sobre o CMJ - métodos e equipamentos mais utilizados

Os equipamentos utilizados neste trabalho já vem sendo amplamente discutidos no contexto do salto vertical com contramovimento. Existem diversos trabalhos que comparam métodos e equipamentos diferentes (MOIR, 2008; MCGINNIS et al., 2016; TOFT NIELSEN et al., 2019), tentando validar e analisar as situações em que melhor se aplicam cada um deles. Na tabela 1 temos alguns exemplos de comparações já realizadas na literatura.

Tabela 1 – Trabalhos que compararam os equipamentos IMU, Vicon e Plataforma de Força e os métodos FT, TOV e DI.

	IMU			Vicon			Plataforma de Força		
	FT	TOV	DI	FT	TOV	DI	FT	TOV	DI
Nielsen 2019	X	X	X			X	X	X	X
Moir 2008							X	X	
McGinnis 2016			X			X			
Este trabalho	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Observando a tabela 1 podemos perceber que ainda não temos um trabalho que compare tanto os três equipamentos, quanto os três métodos. Desta forma, este é um dos objetivos que foi implementado neste trabalho.

3.2 Coleta de Dados

3.2.1 Sujeitos

Para este estudo, foram recrutados 15 estudantes da Universidade de Basília (9 homens de 23+-2 anos, altura de 178+-7 cm e peso 70+-27 kg; 6 mulheres de 22+-1 anos, altura de 167+-9 cm e peso 60+-13 kg). Cada um dos sujeitos do estudo realizou quatro saltos, com os três primeiros utilizados nas análises. O quarto salto foi utilizado apenas quando houve alguma anomalia na coleta (amostragem das IMUs inferior a 50 Hz ou oclusões que não

puderem ser corrigidas no pós processamento do Vicon). Antes de serem realizados os testes, foi obtido um termo de consentimento assinado de todos os participantes. Foi explicado a cada um os objetivos do experimento e informado sobre como deveriam ser realizados os saltos. Dos 15 sujeitos coletados, três foram descartados por não atingirem três saltos com os requisitos mínimos de qualidade do sinal.

3.2.2 Sensores Utilizados

3.2.2.1 IMUs

As IMU's utilizadas neste trabalho são do modelo 3-Space-SensorTM da Yost Labs. Estas, além de conterem os tradicionais acelerômetros, magnetômetro giroscópio contam ainda com diversos circuitos internos podendo processar o sinal, aplicando filtros na orientação e tornando-as capazes de retornar diversos sinais diferentes. No nosso trabalho, selecionamos o filtro de Kalman para ser aplicado e utilizamos o comando que retorna a aceleração com a referência global corrigida pela orientação sem tarar (isto é, sem a necessidade de definir a posição no início do processamento como a posição em que os valores obtidos pela imu são nulos) da IMU. Assim é possível obter isoladamente o eixo da IMU que é paralelo à gravidade, o eixo de interesse na análise do salto vertical, como é descrito na figura 11.

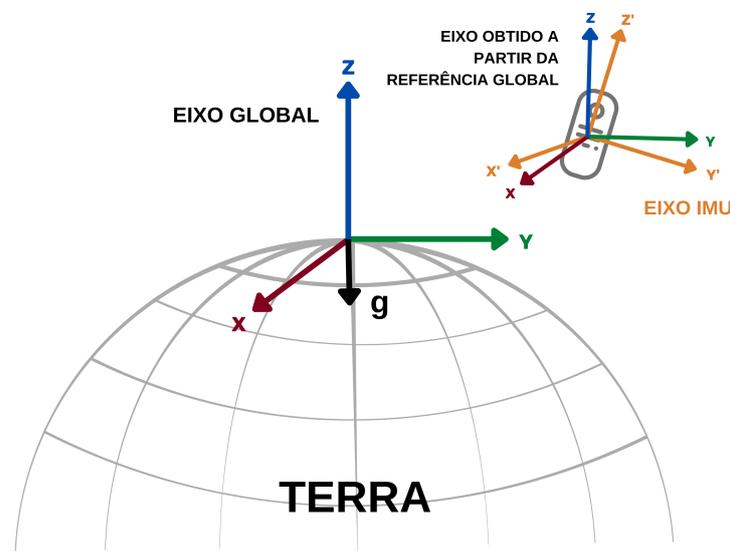


Figura 11 – Eixos de referência global e local das IMU's.

A IMU foi calibrada, antes de cada coleta, com o *Gradient Descent Wizard* utilizando o *software* da própria Yost Labs: 3-Space Suite, neste processo a IMU é colocada em 24 posições indicadas pelo programa para calibrar o acelerômetro e o magnetômetro. Foi aplicado também o comando para auto calibração do giroscópio toda vez que o *script* de coleta foi executado, para maior acurácia das medidas. Os dados foram obtidos com um *script* feito em Python que configura a IMU e ativa o modo *streaming* desta (envia continuamente os dados e

umenta a amostragem) para que os dados sejam recebidos por meio de um *dongle bluetooth (3-Space Wireless Dongle)* (ANALYSIS, 2022). A preferência por um *script* em Python em detrimento do uso do *software* proprietário na coleta tem como o intuito ter um método mais flexível de coleta de dados, tornando possível sua reutilização para aplicação em situações em que é feita análise *online* ou que sejam utilizados atuadores no sistema. Concomitante à coleta dos dados, foram criados *timestamps* no código, uma vez que a comunicação é sem fio e a amostragem não foi constante.

A IMU foi posicionada no sacro dos indivíduos, entre os marcadores *LPSI* e *RPSI*, na posição *SACR* mostrados na figura 13. A localização foi escolhida por ser uma boa representação do centro de massa dos indivíduos e muito utilizada na literatura (MCGINNIS et al., 2016; TOFT NIELSEN et al., 2019) o que facilita a comparação dos resultados obtidos com estudos anteriores. Nas figuras 14a e 14b, a IMU está posicionada como explicado acima, porém, sob as roupas para maior fixação.

3.2.2.2 Vicon

Como dito no capítulo 1, os MOCAPs são considerados o padrão ouro da captura do movimento humano. Neste trabalho, foi utilizado o Vicon com 8 câmeras infravermelho que fornecem a posição espacial de marcadores com erro de menos de 2 mm (MERRIAUX et al., 2017) e uma amostragem de 200 Hz. Na figura 12 podem ser observadas as câmeras e os marcadores.

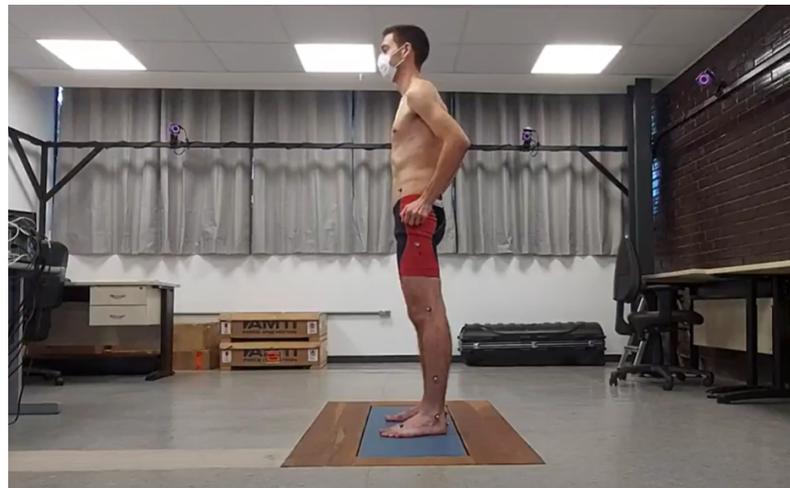


Figura 12 – *Setup* de coleta: pode-se observar nesta imagem 3 das 8 câmeras infravermelho em funcionamento, a plataforma de força e os marcadores posicionados para a coleta *Lower Body*.

Antes de cada ciclo de coleta, o equipamento foi inicializado e, como recomendado pelo fabricante, esperamos cerca de 30 minutos antes de iniciar. Em seguida foi feita a calibração do volume de coleta previamente definido com o uso da varinha de calibração ativa para garantir uma coleta mais precisa e acurada.

Para cada indivíduo foram cadastradas as medidas antropométricas: tamanho da perna, largura do joelho e largura do tornozelo. Foram posicionados os marcadores correspondentes à configuração *Plug-in Gait Lower Body Ai* que conta com 16 pontos e pode ser observada na figura 13. Antes da realização dos saltos, foi feita a calibração estática com cada um dos sujeitos. Nas figuras 14a e 14b é possível observar como ficaram posicionados os marcadores durante a coleta.

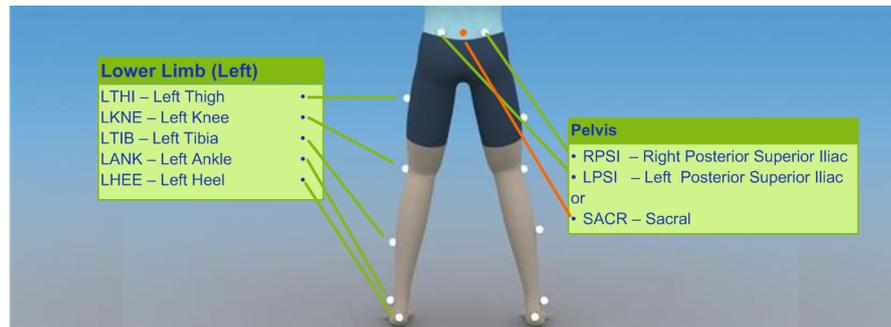


Figura 13 – Localização dos marcadores utilizados no sistema de captura de movimento Vicon.

Fonte: Documentação Vicon (VICON, 2022)



(a) Fotografia lateral.



(b) Fotografia posterior.

Figura 14 – Posicionamento dos marcadores e IMU para a coleta de dados.

3.2.2.3 Plataformas de Força

Como dito, as plataformas de força correspondem ao padrão ouro quando se trata do cálculo do tempo de voo, neste trabalho foram utilizadas plataformas AMTI BP400800 que capturam o sinal de força exercido com uma frequência de 1000 Hz.

Foram utilizadas duas plataformas de força, e os saltos realizados com um pé em cada uma da plataforma (figura 14b). O sinal final de força utilizado nos processamentos foi a soma dos componentes verticais do vetor força de cada plataforma.

3.2.2.4 Processamento Inicial dos Dados de Força e Trajetórias do Vicon

O Vicon, sistema de MOCAP utilizado, conta com um *software* para visualização e processamento dos dados: Nexus, que é uma ferramenta de análise de movimento vinculada ao Vicon. No *software*, é feita a sincronização dos dados da Plataforma de Força e do Vicon e, logo após cada salto, os processamentos iniciais das trajetórias obtidas com o sistema de captura. Para cada salto, quando ocorreu oclusão de marcadores, estes foram identificados manualmente. Para pontos perdidos com *gaps* de uma unidade foi aplicado o *Spline Fill*, para pontos com *gaps* de mais uma unidade foi aplicado o *Rigid Body Fill* quando possível e o *Pattern Fill* quando não.

Para as análises, foram utilizados os resultados de deslocamento dos pontos LPSI e RPSI, obtidos diretamente do Nexus, que podem ser observados na figura 13. Os pontos foram escolhidos por estarem próximos à IMU (localizada entre eles). Para os métodos FT e TOV de cálculo da altura do salto, foi realizada a derivada do sinal de posição. Cabe ressaltar que os resultados das derivadas realizadas no código implementado coincidiram com os apresentados gerados pelo Nexus. Optou-se por derivar o sinal no *script* criado para a otimização do processo.

Como mencionado anteriormente, os dados das plataformas de força foram obtidos também pelo Nexus, de forma sincronizada com o Vicon. Por serem duas plataformas para utilizar os dados, foram somadas as forças obtidas em cada uma delas.

Para a comparação do resultado da IMU com o da plataforma de força pelos três métodos descritos (FT, TOV e DI), foi necessário processar o sinal da plataforma, para termos também os sinais de velocidade e deslocamento. Para obter o sinal da velocidade, primeiro foi obtida a aceleração a partir do sinal de força através da fórmula 3.1 e em seguida foi integrado o sinal utilizando a Regra dos Trapézios. Para o sinal de deslocamento, integramos o sinal de velocidade obtido, novamente pela Regra dos Trapézios. Com o sinal do deslocamento porém, foi necessário utilizar um filtro passa altas de 0.01 Hz no sinal, já que a segunda integração adicionou uma tendência de deriva. Na figura 15 é possível observar o sinal com tendência e o sinal resultante após a utilização do filtro passa altas.

$$a = \frac{F}{m} \quad (3.1)$$

onde a é a aceleração, F é o módulo da força e m é a massa do indivíduo.

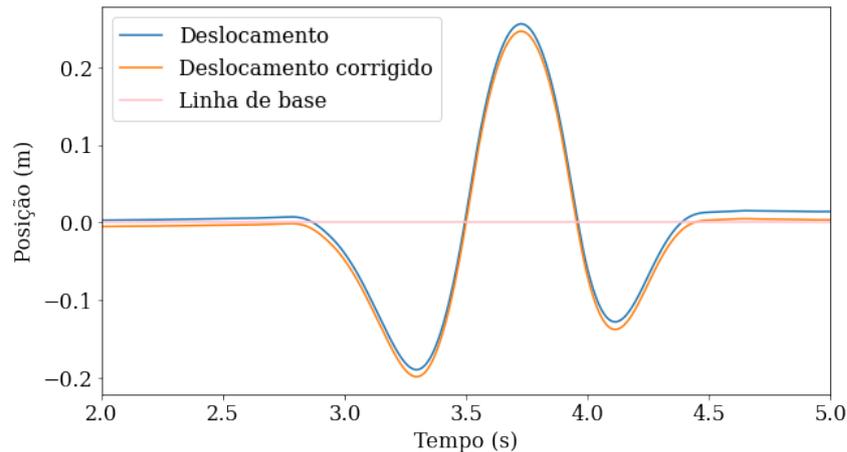


Figura 15 – Remoção da tendência proveniente das integrações do sinal da plataforma de força.

3.3 Processamento dos Dados da IMU

Para a exploração das IMUs no contexto da análise do CMJ, como já mencionado, utilizamos três métodos diferentes para a obtenção da altura do salto: FT, TOV e DI. Os processamentos realizados em cada um deles podem ser observados no fluxograma da figura 16 e serão explicados nesta seção.

3.3.1 Filtragem e Reamostragem

Para todos os métodos supracitados foi realizado um processamento inicial na aceleração obtida da IMU (figuras 17a e 17b).

No trabalho de McGinnis et al. (2016) usa-se um filtro Butterworth de 15 Hz no sinal de aceleração enquanto no trabalho de Toft Nielsen et al. (2019) usa-se uma frequência de 6.5 Hz sobre o mesmo sinal, neste trabalho foram obtidos os espectros de Fourier do sinal, como mostrado na figura 17a e a partir destes foi observado que de forma geral um frequência de corte de 6 Hz resultou no melhor sinal de aceleração. Como é exemplificado na figura 17b.

Após a filtragem, foi realizada uma reamostragem do sinal utilizando uma interpolação por *Cubic-Spline* de 150 Hz. Esta interpolação, além de aumentar a amostragem do sinal faz com que o espaçamento entre as medidas seja constante. Este processo melhorou significativamente os sinais e resultados posteriores e é mostrado nas figuras 18a e 18b.

3.3.2 Estimativa da altura pelo método FT

A partir do sinal de aceleração filtrado é possível obter a primeira métrica avaliada neste trabalho, o tempo de voo, considerado neste trabalho como um intervalo entre os picos da aceleração. Um *threshold* de -0.5 g, definido de forma empírica, foi utilizado para obter

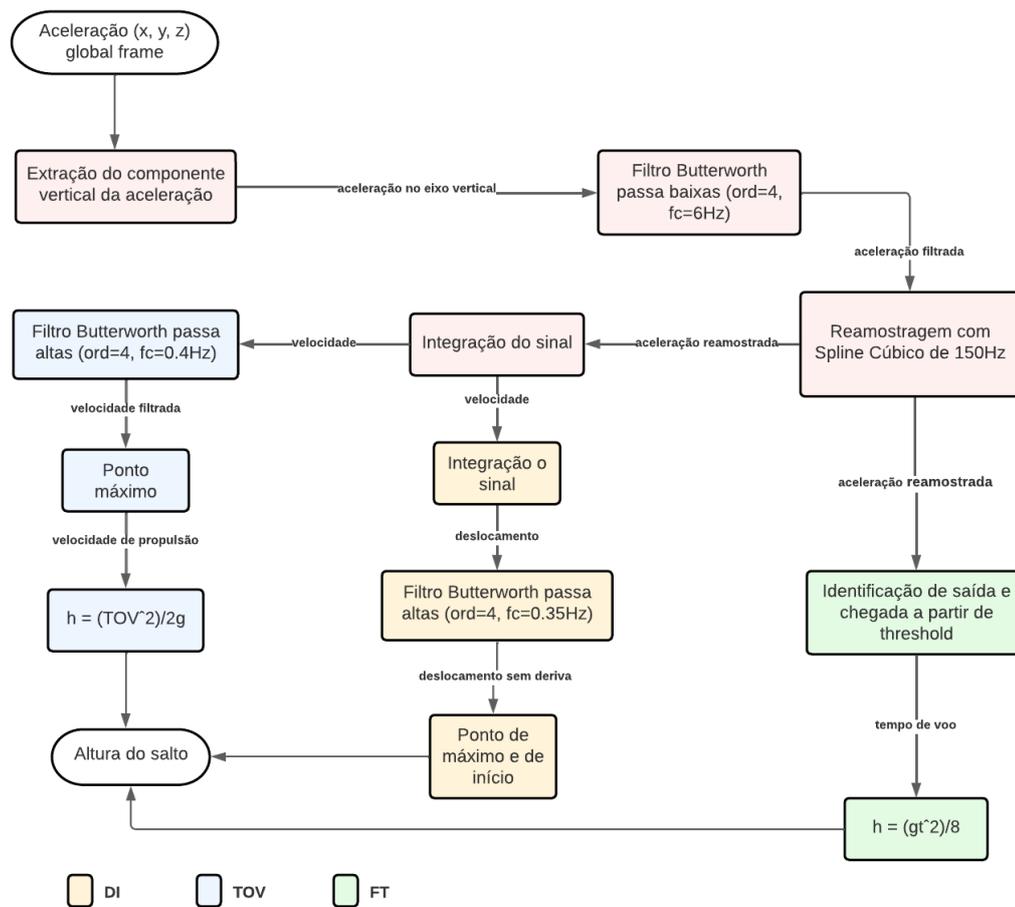
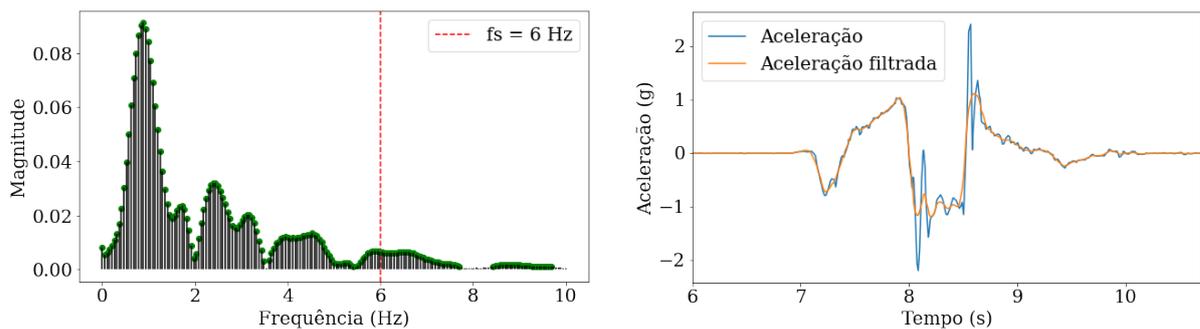


Figura 16 – Fluxograma dos processos realizados para cada um dos métodos de estimativa da altura do salto: FT, TOV e DI.



(a) Espectro de Fourier do sinal de aceleração.

(b) Resultado da aplicação do filtro.

Figura 17 – Remoção de ruídos do sinal de aceleração no eixo vertical proveniente da IMU.

esse intervalo, como mostrado na figura 19. A identificação automática desses pontos é feita com um algoritmo simples que realiza os seguintes passos:

- Encontra-se o menor valor de aceleração, que estará dentro do intervalo do tempo de voo.

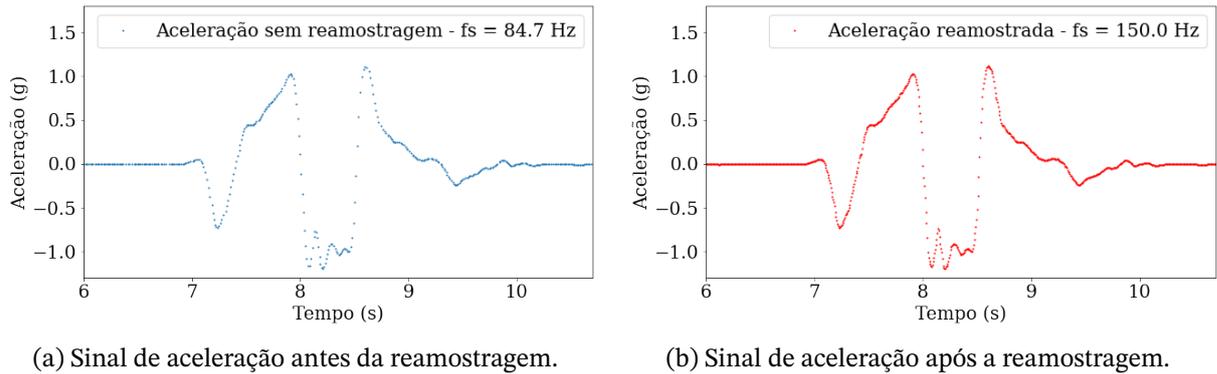


Figura 18 – Aplicação do *spline* cúbico de 150Hz na aceleração.

- b) Define-se o intervalo de interesse para encontrar o ponto de decolagem com início na primeira intersecção com o zero e o final no ponto de menor aceleração.
- c) Percorre-se o intervalo de interesse até encontrar o primeiro ponto em que a aceleração é inferior ao *threshold* e salva este ponto como instante de decolagem.
- d) Define-se o intervalo de interesse para encontrar o ponto de pouso como início no ponto de menor aceleração e final como a próxima intersecção da aceleração o zero.
- e) Percorre-se então o intervalo de interesse até encontrar o último ponto em que aceleração é inferior ao *threshold* e salva-se este ponto como instante de pouso.
- f) Com instantes de decolagem e pouso, obteve-se o tempo de voo e aplicamos a equação 2.3 para obter a altura do salto.

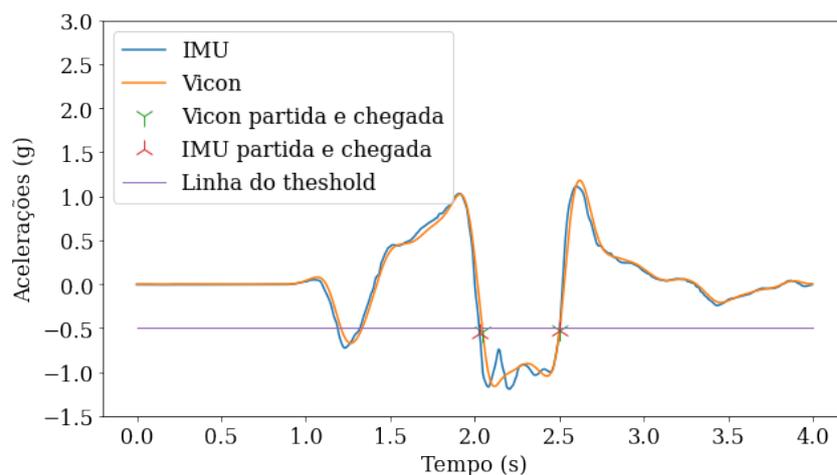


Figura 19 – Obtenção do tempo de voo por *threshold* na aceleração, os pontos definidos como início e chegada do salto estão destacados em verde e vermelho. Estes pontos não estão exatamente sobre a reta do threshold pois o sinal é discreto, mas são estes os pontos mais próximos à reta.

3.3.3 Estimativa da altura pelo método TOV

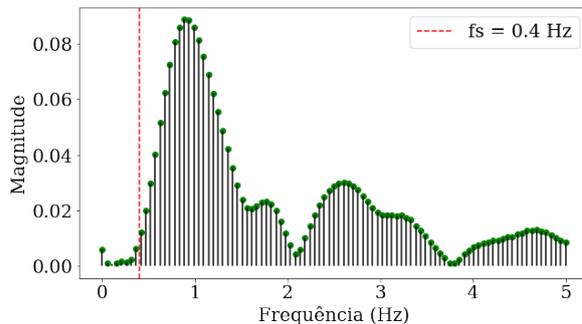
A velocidade de propulsão consiste na velocidade do sujeito no momento em que deixa o chão e inicia sua fase de voo. Para a obtenção desta medida foi realizado o fluxo de processamentos mostrado em azul no diagrama de blocos da figura 16.

3.3.3.1 Obtenção da Velocidade

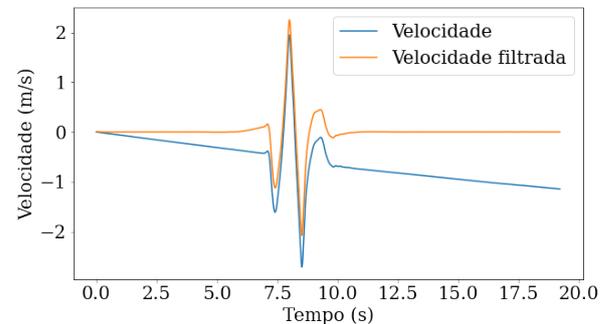
Após os processamentos iniciais da aceleração mencionados anteriormente, foi realizada a integração numérica do sinal da aceleração, utilizando a Regra dos Trapézios para obter o sinal de velocidade.

3.3.3.2 Correção da Deriva

A integração do sinal causa um aumento significativo nos erros já presentes, adicionando ao sinal um erro de tendência incremental, conhecido como deriva. Para remoção do erro presente na velocidade foi utilizado um filtro Butterworth passa altas de segunda ordem com frequência de corte de 0.4 Hz, escolhido a partir de experimentos e da análise do espectro de frequência dos sinais. O resultado do processamento pode ser observado na figura 20b.



(a) Espectro de Fourier do sinal de velocidade.



(b) Resultado da correção da velocidade.

Figura 20 – Aplicação do filtro passa altas para a remoção da deriva na velocidade.

Com o sinal de velocidade pode ser obtida a velocidade de propulsão, que corresponde à velocidade máxima durante a realização do movimento. Em seguida, aplicamos a equação 2.4 para obter da altura do salto.

3.3.4 Estimativa da altura pelo método DI

Os processamentos realizados no sinal da aceleração para obter a altura do salto pelo método DI podem ser observados em amarelo no fluxograma da figura 16 e serão explicados abaixo.

3.3.4.1 Sinal de Deslocamento

Para se obter o sinal de deslocamento a partir do sinal da aceleração, já filtrada e reamostrada, foi realizada a integração numérica duas vezes, novamente utilizando a Regra dos Trapézios.

3.3.4.2 Correção da Deriva

Assim como no método TOV, ao ser realizada a integração do sinal, são ampliados consideravelmente os erros, adicionando ao resultado uma tendência de deriva. Para o deslocamento, a correção do erro foi realizada com um filtro Butterworth passa-altas de segunda ordem e frequência de corte de 0.35 Hz, escolhido a partir da análise do espectro da frequência (figura 21a) e da realização de testes. O resultado da remoção da deriva é ilustrado no gráfico da figura 21b.

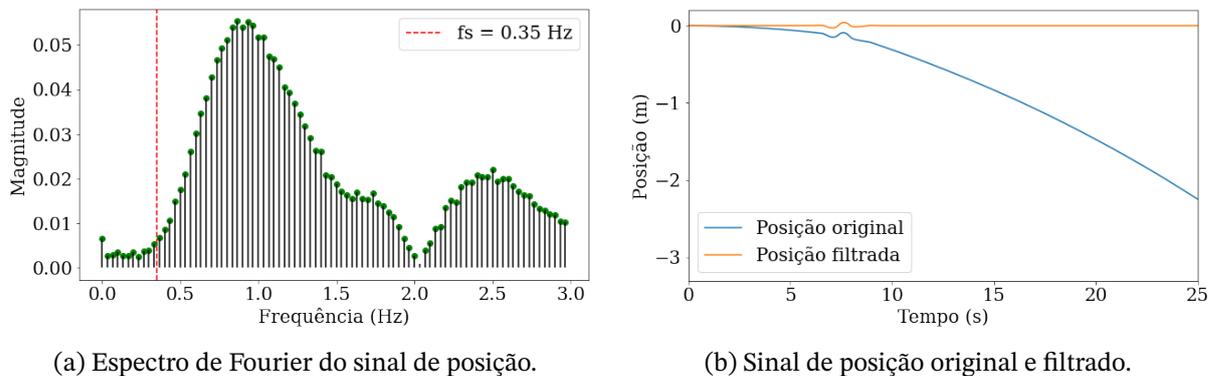


Figura 21 – Aplicação do filtro passa altas para a remoção da deriva na posição.

Finalmente, obtemos a altura do salto pelo sinal da posição de forma direta, com a subtração o pico máximo do sinal pela altura inicial.

3.4 Procedimentos de Análise

Nos métodos da velocidade de propulsão e da dupla integração, as grandezas medidas são velocidade e posição. Por este motivo, o Vicon foi utilizado como valor de referência e a IMU e a Plataforma de Força como valores testados. Por outro lado, para o tempo de voo, a plataforma de força foi utilizada como referência, enquanto Vicon e IMU foram as medidas testadas.

Os dados de cada salto foram compilados em tabelas e foram gerados gráficos, sendo para cada método gerados os seguintes relatórios a serem apresentados no capítulo 4:

- Cálculos do MAE e MAPE.
- Cálculo do coeficiente de Pearson e geração de gráficos de correlação.

c) Geração de gráficos de Bland-Altman.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados dos resultados obtidos com a IMU em comparação com os equipamentos que correspondem ao padrão ouro de cada método de obtenção da altura do salto. Além disso, serão discutidas inconsistências e diferenças em cada uma das metodologias para os equipamentos utilizados.

4.1 Estimativa da altura do salto pelo método FT

Como apresentado, o primeiro método para o cálculo da altura de salto foi a aplicação da equação de movimento balístico do centro de massa, onde a grandeza medida foi o tempo de voo. A vantagem da utilização do método com a IMU é que não são necessárias integrações do sinal do sensor, diminuindo a quantidade de processamentos realizados, os quais podem ser uma possível fonte de erros. As semelhanças entre o sinal da aceleração da IMU e da força na plataforma ficam evidentes a partir dos gráficos processados (figura 22). Observa-se que, em queda livre, a aceleração do sujeito é aproximadamente -1 g e a força exercida na plataforma é igual a 0 N .

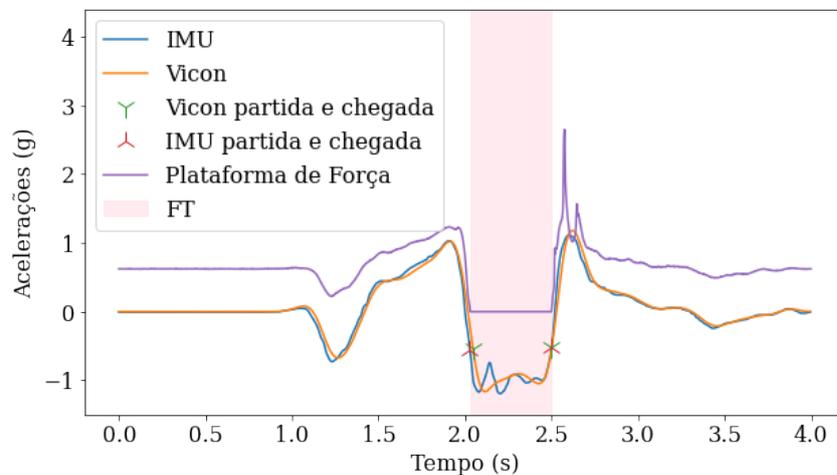


Figura 22 – Gráfico dos tempos de voo obtidos pelos três equipamentos. Este gráfico é de apenas um indivíduo que apresentou um dos melhores resultados.

O algoritmo de tempo de voo apresentado na seção 3.3.2 foi aplicado para os 12 sujeitos do estudo e os resultados estão compilados na tabela 2. Com um processamento simples do sinal de aceleração vertical corrigida da IMU, foi possível obter um MAPE inferior à 6% em relação ao padrão ouro do tempo de voo (plataforma de força). Por outro lado, a comparação do Vicon em relação à plataforma de força resultou em um MAPE de 4.158%.

É importante ressaltar que o cálculo da altura do salto eleva o erro absoluto do tempo de voo ao quadrado. Dessa forma, o valor previamente obtido comparando-se a medida direta (tempo de voo) foi de 2.423% (IMU x plataforma de força) e de 2.039% (Vicon x plataforma de força).

Tabela 2 – Médias, MAE e MAPE das medidas da altura para a IMU e para o Vicon em relação à Plataforma de Força.

Sensores Comparados	Altura Média Medida Testada (cm)	Altura Média Medida Referência (cm)	MAE (cm)	MAPE (%)
IMU x Plataforma de Força	24.865	24.490	1.240	5.871
Vicon x Plataforma de Força	23.760	24.490	1.010	4.158

Para avaliar a correlação, os sinais foram comparados com o valor de referência e utilizados no cálculo do coeficiente de Pearson (figuras 23 e 24). Os resultados apontam um alto nível de correlação entre as medidas das alturas registradas tanto com o Vicon ($\rho = 0.993$) quanto com a IMU ($\rho = 0.982$) em relação à plataforma de força.

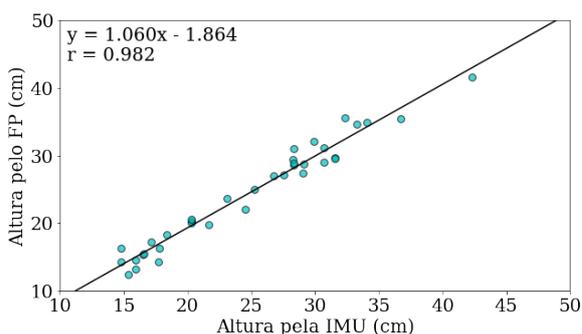


Figura 23 – Correlação entre o IMU e a plataforma de força. $\rho = 0.982$.

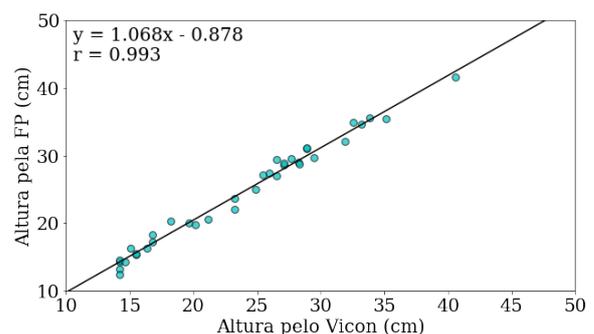


Figura 24 – Correlação entre o Vicon e a plataforma de força. $\rho = 0.993$.

Observando os gráficos de Bland-Altman das figuras 25 e 26, podemos observar um erro sistemático maior entre a plataforma de força e o Vicon, do que entre a plataforma de força e a IMU. Tal resultado é evidenciado pela diferença de viés entre as comparações: a análise plataforma de força x IMU apresenta 0.37 cm de viés, enquanto a comparação plataforma de força x Vicon resulta em 0.76 cm. Contudo, os limites de concordância obtidos na comparação da plataforma de força com o Vicon foi inferior (± 2.06 cm), enquanto para a comparação da plataforma de força com a IMU os limites foram um pouco mais elevados (± 2.99 cm). Conclui-se então que, como era esperado, Vicon fornece menor variabilidade nos dados.

Observa-se que, com a utilização da IMU e um processamento simples, foi possível calcular a altura do salto a partir do tempo de voo. Conforme supracitado, os resultados foram similares aos registrados pela plataforma de força. Apesar de funcionar automaticamente, a detecção dos instantes de decolagem e aterrissagem no algoritmo implementado é realizada a partir de *thresholds* definidos de forma empírica. Dessa forma, este procedimento pode ser

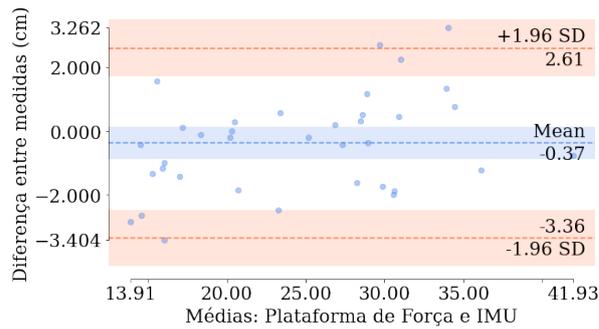


Figura 25 – Bland-Altman comparando o resultado da IMU com o da plataforma de força para o método FT.

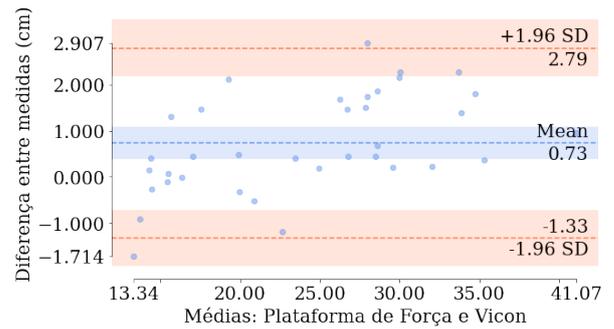


Figura 26 – Bland-Altman comparando o resultado do Vicon com o da plataforma de força para o método FT.

passível de falhas na presença de *outliers*. Ainda assim, a utilização do algoritmo tem sua validade, uma vez que a alteração dos *thresholds* para correções pode ser feita manualmente de forma simples.

4.2 Estimativa da altura do salto pelo método TOV

Para o TOV, foi utilizada a velocidade de propulsão do salto para o cálculo da altura por meio da equação 2.4. Uma das vantagens do TOV é que o método não é afetado por aterrissagens incorretas durante o movimento, as quais podem acabar gerando erros significativos na estimativa da altura pelo tempo de voo. Por este motivo, estudos recomendam que a altura do salto seja calculada pela velocidade de propulsão mesmo com o uso da plataforma de força (MOIR, 2008).

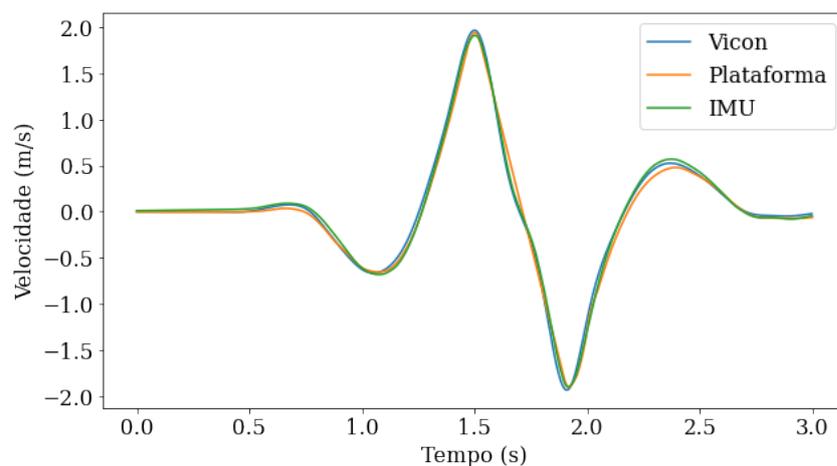


Figura 27 – Sinal de velocidade obtido utilizando as tecnologias Vicon, plataforma de força e IMU. Este gráfico é de apenas um indivíduo que apresentou um dos melhores resultados.

Na figura 27 podemos observar as velocidades obtidas através do Vicon, plataforma de força e IMU. É possível perceber a grande semelhança entre os sinais, que resultou em

um MAE de menos de 2 cm ao comparar o sistema de MOCAP com a IMU. Assim como no método FT, o cálculo realizado para a obtenção da altura do salto com o TOV eleva o erro absoluto da medida direta (velocidade de propulsão) ao quadrado. Desta forma, o erro passou de 2.466% na velocidade de propulsão para 6.079% na altura do salto. Os resultados obtidos para este método são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Médias, MAE e MAPE das medidas da altura para a IMU e Plataforma de Força em relação ao Vicon.

Sensores Comparados	Altura Média Medida Testada (cm)	Altura Média Medida Referência (cm)	MAE (cm)	MAPE (%)
IMU x Vicon	25.637	26.233	1.607	6.079
Plataforma de Força x Vicon	28.206	26.233	2.177	8.142

Para a comparação das tecnologias, foi novamente obtido o coeficiente de Pearson do sinal e a correlação entre os resultados da referência e dos resultados testados (figuras 28 e 29). Comparando-se os resultados obtidos pela IMU com o Vicon, foi observada uma alta correlação entre as medidas ($\rho = 0.953$), similar ao obtido na análise plataforma de força x Vicon ($\rho = 0.974$).

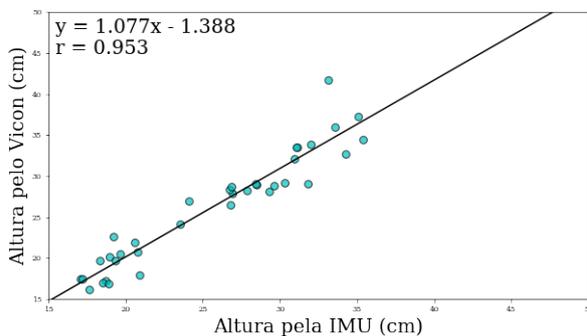


Figura 28 – Correlação entre IMU e Vicon.
 $\rho = 0.953$.

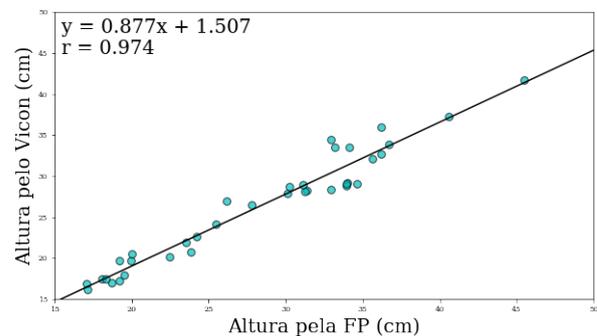


Figura 29 – Correlação entre plataforma de força e Vicon. $\rho = 0.974$.

Analisando os gráficos de Bland-Altman, a comparação da IMU com o Vicon demonstra uma média de valores próxima ao esperado, com um viés de 0.6 cm (figura 30). Por outro lado, a comparação entre os limites de concordância, assim como no caso do FT mostra que no caso da plataforma de força com o Vicon tempo menor variabilidade de ± 3.5 cm enquanto na relação IMU com Vicon temos ± 4.07 cm.

4.3 Estimativa da altura do salto pelo método DI

Obtendo a altura do CMJ através do método da DI, conseguimos comparar o resultado obtido tanto da IMU quanto da plataforma de força com o sinal mais direto obtido pelo Vicon, o de deslocamento. Na figura 32 temos um exemplo de gráfico que compara o deslocamento obtido pelos três equipamentos. Como foram realizadas duas integrações nos sinais de

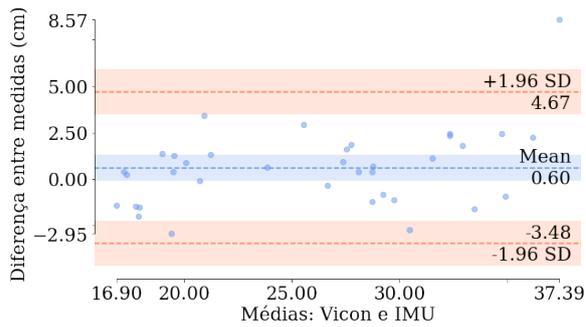


Figura 30 – Bland-Altman comparando o resultado da IMU com o do Vicon para o método TOV.

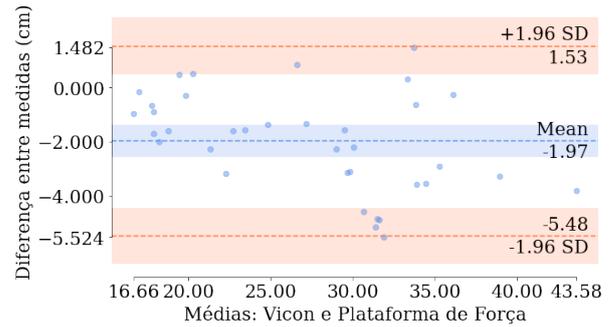


Figura 31 – Bland-Altman comparando o resultado da plataforma de força com o do Vicon para o método TOV.

aceleração da IMU e da plataforma de força, os sinais apresentam uma maior variação (em comparação com o sinal das velocidades, por exemplo; 27). Ainda assim, os resultados foram bastante similares.

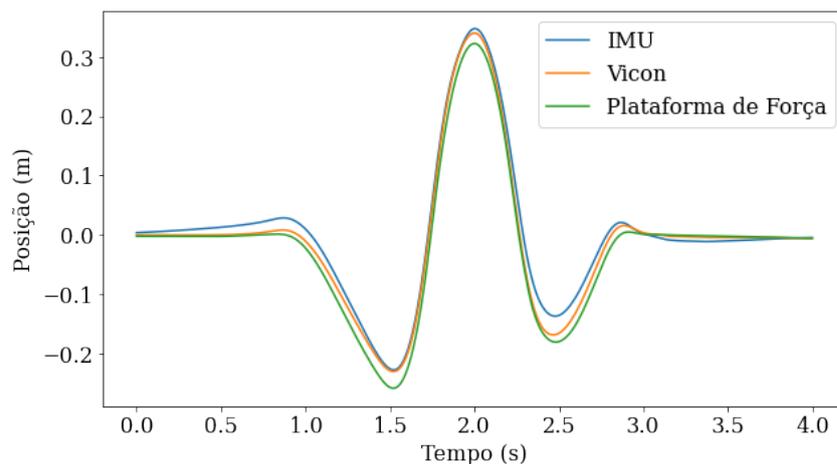


Figura 32 – Deslocamento obtida utilizando as tecnologias Vicon, plataforma de força e IMU. Este gráfico é de apenas um indivíduo que apresentou um dos melhores resultados.

Na tabela 4 podemos ver as médias de altura e os erros (MAE e MAPE) obtidos em nosso experimento. Este método de obtenção da altura do salto foi o que resultou em maior diferença entre as tecnologias testadas em relação ao padrão ouro.

Tabela 4 – Médias, MAE e MAPE das medidas de altura para a IMU e Plataforma de Força em relação ao Vicon.

Sensores Comparados	Altura Média Medida Testada (cm)	Altura Média Medida Referência (cm)	MAE (cm)	MAPE (%)
IMU x Vicon	35.440	36.602	3.053	8.111
Plataforma de Força x Vicon	37.203	36.602	1.699	5.008

As alturas de salto médias, estimadas a partir dos três equipamentos, foram significativamente maiores na utilização do método DI em relação a FT e TOV. Tal resultado

decorre da flexão do pé do sujeito durante a execução do movimento CMJ. No método DI, o deslocamento causado pela flexão é incluído na estimativa final da altura, enquanto no TOV e FT, não.

Os resultados de correlação do método, mensurados pelo coeficiente de Pearson, estão disponíveis nas figuras 33 e 34. Apesar de as duas comparações entre dispositivos ainda apresentarem correlações elevadas, é possível notar que são valores menores do que as encontradas nas correlações dos métodos FT e TOV. Os menores valores decorrem da dificuldade na mitigação dos efeitos da deriva, ocasionada pela dupla integração do sinal.

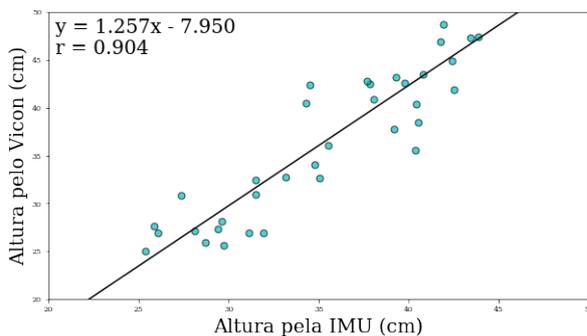


Figura 33 – Correlação entre IMU e Vicon.
 $\rho = 0.904$.

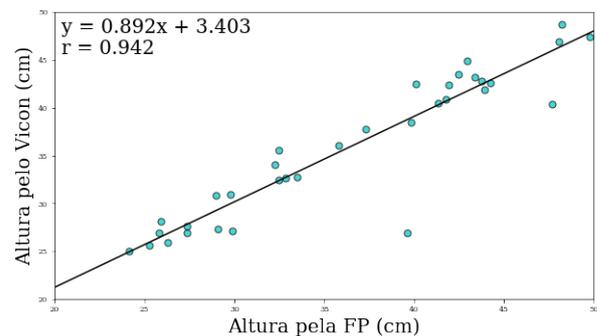


Figura 34 – Correlação entre plataforma de força e Vicon. $\rho = 0.942$.

Nos gráficos de Bland-Altman, a comparação da IMU com o Vicon apresenta um viés de 1.16 cm (figura 35). Já para a Plataforma de Força x Vicon, temos tanto um viés (0.6 cm), com os limites de concordância atingindo cerca de ± 5.45 cm, enquanto para a comparação da IMU com o Vicon esse limite é de ± 7.19 cm. Observa-se que estes limites são relativamente maiores que para os casos da FT e TOV, devido às derivas (e por conseguinte, os desafios de processamento) que ocorrem quando são realizadas as integrações numéricas dos sinais tanto da IMU quanto da Plataforma de Força.

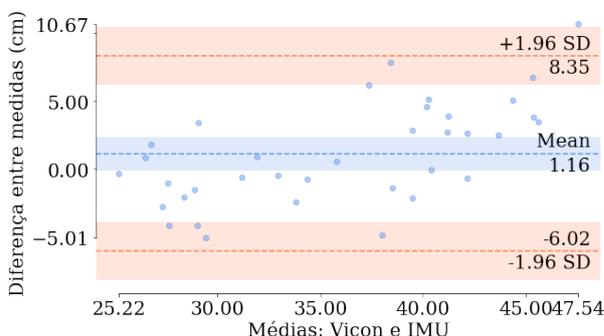


Figura 35 – Bland-Altman comparando o resultado da IMU com o do Vicon para o método DI.

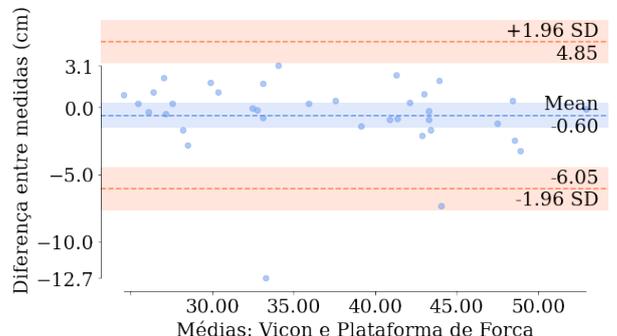


Figura 36 – Bland-Altman comparando o resultado da plataforma de força com o do Vicon para o método DI.

4.4 Comparação das metodologias e equipamentos

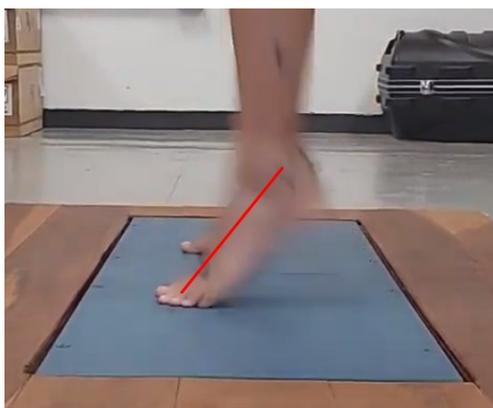
Na tabela 5 são comparadas as alturas médias obtidas utilizando os três equipamentos nos três métodos distintos. Observa-se que, para um mesmo equipamento, as alturas de salto estimadas variam a depender do método utilizado.

Tabela 5 – Comparação da altura média obtida pelos três equipamentos, utilizando os três métodos.

	Vicon	Plataforma de Força	IMU
FT	23.760	24.490	24.865
TOV	26.233	28.206	25.637
DI	36.602	37.203	35.440

A altura obtida pelo DI é significativamente maior que a estimada pelo FT e TOV. O resultado decorre da diferença do comprimento do pé no momento de decolagem (ver seção 4.3). Nos métodos TOV e FT os instantes de saída e velocidade de propulsão são obtidos enquanto o indivíduo está nas pontas dos pés. No método DI os instantes em que o indivíduo fica na ponta do pé são considerados no deslocamento, e portanto somado à altura total.

Os métodos TOV e FT também apresentam diferenças nas estimativas da altura do CMJ. Apesar de pequenas, as divergências nos resultados ocorrem majoritariamente por inconsistências no movimento de cada indivíduo. Durante o salto, normalmente são obtidas inclinações diferentes no momento de decolagem (figura 37a) e aterrissagem (figura 37b). Conseqüentemente, o tempo de voo será maior, mesmo que o sujeito não tenha efetivamente aplicado mais força para elevar seu centro de massa. Nesse contexto, os métodos TOV e DI podem ser mais vantajosos, uma vez que não são afetados pelas inconsistências supracitadas.



(a) *Frame* de decolagem do salto vertical.



(b) *Frame* de aterrissagem do salto vertical.

Figura 37 – Instantes de decolagem e aterrissagem do salto vertical. Observa-se que as inclinações são diferentes na chegada e saída, aumentando de forma não natural o tempo de voo do indivíduo.

Portanto, conclui-se que o método TOV pode trazer resultados mais fidedignos do grau aptidão física dos indivíduos, especialmente na comparação entre sujeitos. Contudo, vale ressaltar que tal conclusão não descarta as demais metodologias. Em geral, indivíduos

mantém os padrões de salto, portanto, a análise da altura do CMJ e dos efeitos de treinamentos pode ser executada por qualquer um dos três métodos estudados.

5 Conclusões

Neste trabalho, foram implementados três métodos para o cálculo da altura do salto vertical de forma automática: o tempo de voo (FT; por meio de *threshold* da aceleração), velocidade de propulsão (TOV; com velocidade máxima de decolagem) e dupla integração (DI; comparação de posições iniciais e máximas) com o uso de sensores inerciais (IMUs). Os dados obtidos foram comparados utilizando os mesmos métodos com duas tecnologias consideradas o padrão ouro na análise do movimento: MOCAP (Vicon) e Plataforma de Força.

Os métodos implementados resultaram em estimativas de altura com erros médios entre 5 e 10% realizando a comparação entre os sensores inerciais com o Vicon e a Plataforma de Força. Assim, as IMUs podem ser consideradas alternativas acessíveis aos sistemas de captura de movimento e às plataformas de força, a depender do nível de exigência de acurácia da aplicação.

Observou-se que a deriva que ocorre na integração numérica, característica inerente à construção física de sensores inerciais, representam um grande desafio de processamento, exemplificada pelos erros médios absolutos menores para o método FT, em que o sinal utilizado das IMUs é a aceleração (não são aplicadas integrações). Em seguida foram obtidos resultados com erros um pouco mais elevados para o método da velocidade de propulsão (o sinal passa por uma integração). Por fim os maiores erros absolutos foram obtidos no método em que temos duas integrações no sinal (DI).

Além disso, foram comparados os valores de altura média obtidos pelos diferentes métodos utilizando os mesmos equipamentos. Com isso, foi possível obter uma melhor compreensão de cada resultado e sua relação com a maneira de se analisar os valores obtidos e quanto à necessidade da execução do movimento de maneira correta, fatores pouco debatidos na literatura. Foram destacadas possíveis discrepâncias na altura do salto existentes no método FT causadas pelo ângulo de inclinação dos pés nos momentos de decolagem e de aterrissagem. Os métodos TOV e DI apresentam valores bem discrepantes, isso se dá pela inclusão do deslocamento da flexão do pé na altura do salto pelo método DI. Entretanto, isto não é problemático, sendo elas apenas definições diferentes da altura do salto. O método do TOV apresentou tanto erro médio absoluto quanto limite de concordância inferiores quando comparados ao método DI. Desta forma, o TOV foi considerado o melhor método para estimativa da altura do salto de contramovimento utilizando sensores inerciais.

É importante ressaltar que as particularidades supracitadas que influenciam no valor final obtido da altura do salto não excluem a importância de nenhum dos métodos, porém reforçam que ao serem realizadas avaliações físicas por meio do salto vertical com

contramovimento, é importante se atentar a estes detalhes, e tentar padronizar ao máximo a realização do movimento.

Pode-se dizer que os sensores inerciais são uma alternativa de baixo custo viável para analisar o salto vertical com contramovimento e, possivelmente, para outros testes de aptidão física que fazem uso de equipamentos de alto custo e pouca flexibilidade nos ambientes de coleta. Contudo, estudos específicos para tais áreas ainda são necessários.

Para trabalhos futuros, pode-se avaliar a utilização de sensores inerciais na identificação de todas as etapas do CMJ. É sugerida também a realização de testes com as IMUs localizadas nas mãos, para verificar a possibilidade de obter boas estimativas de maneira mais prática. Tal localização torna também mais viável a substituição do sensor por aparelhos como *smartphones*, já que estes são dispositivos que possuem IMUs embutidas. Finalmente, sugere-se o estudo do uso de IMUs para obter medidas de orientação (como ângulos das juntas) para a identificação de etapas do salto de contramovimento e a análise de outras métricas.

Referências

- ADESIDA, Y.; PAPI, E.; MCGREGOR, A. H. Exploring the Role of Wearable Technology in Sport Kinematics and Kinetics: A Systematic Review. en. **Sensors**, v. 19, n. 7, p. 1597, abr. 2019. ISSN 1424-8220. DOI: [10.3390/s19071597](https://doi.org/10.3390/s19071597). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/7/1597>. Acesso em: 29 jun. 2022. Citado nas pp. 12, 13, 16.
- ANALYSIS, J. **Vertical Jump Analysis**. Upload de Rafael Fernandes Barbosa e Marina Pinho Garcia. Disponível em: https://github.com/lara-unb/vertical_jump_analysis. Acesso em 03/09/2022. 2022. Citado na p. 28.
- COLYER, S. L.; EVANS, M.; COSKER, D. P.; SALO, A. I. T. A Review of the Evolution of Vision-Based Motion Analysis and the Integration of Advanced Computer Vision Methods Towards Developing a Markerless System. en. **Sports Medicine - Open**, v. 4, n. 1, p. 24, dez. 2018. ISSN 2199-1170, 2198-9761. DOI: [10.1186/s40798-018-0139-y](https://doi.org/10.1186/s40798-018-0139-y). Disponível em: <https://sportsmedicine-open.springeropen.com/articles/10.1186/s40798-018-0139-y>. Acesso em: 3 set. 2022. Citado na p. 12.
- CONCEIÇÃO, F.; LEWIS, M.; LOPES, H.; FONSECA, E. M. M. An Evaluation of the Accuracy and Precision of Jump Height Measurements Using Different Technologies and Analytical Methods. en. **Applied Sciences**, v. 12, n. 1, p. 511, jan. 2022. ISSN 2076-3417. DOI: [10.3390/app12010511](https://doi.org/10.3390/app12010511). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/1/511>. Acesso em: 16 jul. 2022. Citado na p. 12.
- HELLSTEN, T.; KARLSSON, J.; SHAMSUZZAMAN, M.; PULKKIS, G. The Potential of Computer Vision-Based Marker-Less Human Motion Analysis for Rehabilitation. en. **Rehabilitation Process and Outcome**, v. 10, p. 117957272110223, jan. 2021. ISSN 1179-5727, 1179-5727. DOI: [10.1177/11795727211022330](https://doi.org/10.1177/11795727211022330). Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/11795727211022330>. Acesso em: 3 set. 2022. Citado na p. 12.
- HIBBELER, R. C. **Engineering mechanics. Dynamics**. 12th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0-13-607791-6. Citado na p. 17.
- JOHN L. SEMMLOW, B. G. **BIOSIGNAL and MEDICAL IMAGE PROCESSING**. Third ed: CRC Press, 2014. P. 616. ISBN 978-1-4665-6737-5. Citado nas pp. 20–22.
- LABS, Y. Disponível em: <https://yostlabs.com/3-space-sensors/> – acesso em 27 de julho de 2022. 2022. Citado na p. 15.

- LOTURCO, I.; PEREIRA, L. A.; KOBAL, R.; KITAMURA, K.; CAL ABAD, C. C.; MARQUES, G.; GUERRIERO, A.; MORAES, J. E.; NAKAMURA, F. Y. Validity and Usability of a New System for Measuring and Monitoring Variations in Vertical Jump Performance. en. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 31, n. 9, p. 2579–2585, set. 2017. ISSN 1064-8011. DOI: [10.1519/JSC.0000000000002086](https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002086). Disponível em: <https://journals.lww.com/00124278-201709000-00028>. Acesso em: 29 jun. 2022. Citado na p. 12.
- MCGINNIS, R. S.; CAIN, S. M.; DAVIDSON, S. P.; VITALI, R. V.; PERKINS, N. C.; MCLEAN, S. G. Quantifying the effects of load carriage and fatigue under load on sacral kinematics during countermovement vertical jump with IMU-based method. en. **Sports Engineering**, v. 19, n. 1, p. 21–34, mar. 2016. ISSN 1369-7072, 1460-2687. DOI: [10.1007/s12283-015-0185-3](https://doi.org/10.1007/s12283-015-0185-3). Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12283-015-0185-3>. Acesso em: 14 jul. 2022. Citado nas pp. 12–14, 16, 23, 26, 28, 31.
- MCMAHON, J. J.; SUCHOMEL, T. J.; LAKE, J. P.; COMFORT, P. Understanding the Key Phases of the Countermovement Jump Force-Time Curve. en. **Strength & Conditioning Journal**, v. 40, n. 4, p. 96–106, ago. 2018. ISSN 1524-1602. DOI: [10.1519/SSC.0000000000000375](https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000375). Disponível em: <https://journals.lww.com/00126548-201808000-00010>. Acesso em: 4 jul. 2022. Citado nas pp. 12, 13, 18.
- MERRIAUX, P.; DUPUIS, Y.; BOUTTEAU, R.; VASSEUR, P.; SAVATIER, X. A Study of Vicon System Positioning Performance. en. **Sensors**, v. 17, n. 7, p. 1591, jul. 2017. ISSN 1424-8220. DOI: [10.3390/s17071591](https://doi.org/10.3390/s17071591). Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/7/1591>. Acesso em: 31 ago. 2022. Citado na p. 28.
- 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, out. 2008. Publisher: Routledge _eprint: <https://doi.org/10.1080/10913670802349766>. ISSN 1091-367X. DOI: [10.1080/10913670802349766](https://doi.org/10.1080/10913670802349766). Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10913670802349766>. Acesso em: 12 ago. 2022. Citado nas pp. 14, 26, 39.
- MUKAKA, M. M. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. en. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69–71, 2012. Citado na p. 23.
- PUEO, B.; PENICHET-TOMAS, A.; JIMENEZ-OLMEDO, J. M. Validity, reliability and usefulness of smartphone and kinovea motion analysis software for direct measurement of vertical jump height. en. **Physiology & Behavior**, v. 227, p. 113144, dez. 2020. ISSN 0031-9384. DOI: [10.1016/j.physbeh.2020.113144](https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.113144). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031938420304583>. Acesso em: 11 jul. 2022. Citado na p. 13.

- PYCOMPARE. Disponível em: <https://pypi.org/project/pyCompare/> – acesso em 25 de agosto de 2022. 2022. Citado na p. 24.
- ROBERTSON, D. **Research Methods in Biomechanics**. 2nd ed: Human Kinetics, 2013. ISBN 9781492581857. Citado na p. 22.
- SANTOS, C. A. F.; AMIRATO, G. R.; JACINTO, A. F.; PEDROSA, A. V.; CALDO-SILVA, A.; SAMPAIO, A. R.; PIMENTA, N.; SANTOS, J. M. B.; POCHINI, A.; BACHI, A. L. L. Vertical Jump Tests: A Safe Instrument to Improve the Accuracy of the Functional Capacity Assessment in Robust Older Women. en. **Healthcare**, v. 10, n. 2, p. 323, fev. 2022. ISSN 2227-9032. DOI: [10.3390/healthcare10020323](https://doi.org/10.3390/healthcare10020323). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9032/10/2/323>. Acesso em: 16 jul. 2022. Citado na p. 12.
- TOFT NIELSEN, E.; JØRGENSEN, P. B.; MECHLENBURG, I.; SØRENSEN, H. Validation of an inertial measurement unit to determine countermovement jump height. en. **Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology**, v. 16, p. 8–13, abr. 2019. ISSN 22146873. DOI: [10.1016/j.asmart.2018.09.002](https://doi.org/10.1016/j.asmart.2018.09.002). Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214687318300189>. Acesso em: 11 ago. 2022. Citado nas pp. 12, 14, 26, 28, 31.
- VECTORNAV. Disponível em: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-articles/what-is-an-inertial-measurement-unit-imu> – acesso em 03 de setembro de 2022. 2022. Citado nas pp. 16, 17.
- VICON. **Lower body modeling with Plug-in Gait**. 2022. Disponível em: <https://docs.vicon.com/display/Nexus213/Lower+body+modeling+with+Plug-in+Gait>. Acesso em: 3 set. 2022. Citado na p. 29.
- WANG, X.; WANG, F.; CHEN, Y. Capturing Complex 3D Human Motions with Kernelized Low-Rank Representation from Monocular RGB Camera. en. **Sensors**, v. 17, n. 9, p. 2019, set. 2017. ISSN 1424-8220. DOI: [10.3390/s17092019](https://doi.org/10.3390/s17092019). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2019>. Acesso em: 4 jul. 2022. Citado na p. 13.
- WHITMER, T. D.; FRY, A. C.; FORSYTHE, C. M.; ANDRE, M. J.; LANE, M. T.; HUDY, A.; HONNOLD, D. E. Accuracy of a Vertical Jump Contact Mat for Determining Jump Height and Flight Time. en. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 29, n. 4, p. 877–881, abr. 2015. ISSN 1064-8011. DOI: [10.1519/JSC.0000000000000542](https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000542). Disponível em: <https://journals.lww.com/00124278-201504000-00002>. Acesso em: 16 jul. 2022. Citado na p. 13.
- WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. en. **Climate Research**, v. 30, p. 79–82, 2005. ISSN 0936-577X, 1616-1572. DOI: [10.3354/cr03007](https://doi.org/10.3354/cr03007)

9. Disponível em: <<http://www.int-res.com/abstracts/cr/v30/n1/p79-82/>>. Acesso em: 29 ago. 2022. Citado na p. 24.