

---

**Universidade de Évora - Instituto de Investigação e Formação Avançada**

**Programa de Doutoramento em Motricidade Humana**

Tese de Doutoramento

**Contribuição da Biomecânica para a melhoria do  
Rendimento Desportivo, em Atletismo - Desenvolvimento e  
Validação de uma Unidade de Medição Inercial Dedicada**

**Paulo Ricardo Miranda Oliveira**

Orientador(es) | Marco António Colaço Branco

Orlando de Jesus Semedo Mendes Fernandes

Évora 2020

---

---

---

---



**Universidade de Évora - Instituto de Investigação e Formação Avançada**

Programa de Doutoramento em Motricidade Humana

Tese de Doutoramento

**Contribuição da Biomecânica para a melhoria do  
Rendimento Desportivo, em Atletismo - Desenvolvimento e  
Validação de uma Unidade de Medição Inercial Dedicada**

Paulo Ricardo Miranda Oliveira

Orientador(es) | Marco António Colaço Branco

Orlando de Jesus Semedo Mendes Fernandes

Évora 2020

---

---

---

---

---



A tese de doutoramento foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor do Instituto de Investigação e Formação Avançada:

Presidente | Armando Manuel Mendonça Raimundo (Universidade de Évora)

Vogais | Filipe Almeida Viana da Conceição (Universidade do Porto)  
Hugo Miguel Cardinho Alexandre Folgado (Universidade de Évora)  
João Paulo Vilas-Boas Soares Campos (Universidade do Porto)  
Orlando de Jesus Semedo Mendes Fernandes (Universidade de Évora)  
(Orientador)  
Rita Alexandra Prior Falhas Santos Rocha (Instituto Politécnico de Santarém)



**DEDICATÓRIA:**

*À minha esposa*

*À minha família*

*Em homenagem aos meus avós*

*Que durante esta viagem nos deixaram*



# Agradecimentos

Esta viagem foi possível realizar porque houve um conjunto de pessoas que me apoiaram e às quais quero manifestar a minha enorme gratidão.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador **Professor Doutor Orlando Fernandes**, por desde do primeiro momento ter confiado em mim no projeto da Federação Portuguesa de Atletismo e me apoiar incondicionalmente nesta viagem, com a sua amizade, tempo, conhecimento e experiência. Este suporte constante, não só tem construído um especialista na área da Biomecânica, como uma melhor pessoa.

Ao meu coorientador **Professor Doutor Marco Branco** pela sua confiança, disponibilidade total desde do Mestrado, paciência em ouvir-me horas e horas e ajuda na tomada de decisões importantes nesta viagem e por partilhar comigo a sua amizade, tempo e conhecimento científico. Este apoio permitiu-me arriscar e acreditar que era possível realizar todo o caminho traçado inicialmente, com a calma necessária.

Ao meu amigo **Pedro Serra** pelo desenvolvimento do instrumento e auxílio na programação, se a viagem chegou a esta fase, muito se deve à sua competência e amizade.

À **professora Doutora Teresa Bento** pelo constante acompanhamento no artigo de revisão sistemática, os seus contributos permitiram adquirir conhecimento numa área diferente e elevar a qualidade do estudo realizado.

À minha amiga **Elizabete Coutinho** pela partilha da sua experiência no Instituto Nacional de Propriedade Industrial e contributos para o documento submetido no Pedido Provisório de Patente.

Ao **Professor Doutor Armando Raimundo** pelo apoio que facultou ao longo do Doutoramento.

Ao **Professor Doutor Hugo Folgado** e ao **Professor Doutor José Marmeleira** pela exigência que criaram nos momentos intermédios de avaliação do Doutoramento, permitindo um crescimento sustentado ao longo do Doutoramento.

Ao profissionalismo e competência diária dos **Atletas** envolvidos no estudo, são super atletas e o foco e a exigência constante em qualquer tarefa permitindo obter conhecimento de utilidade para o treino.

Ao colega e amigo **Pedro Pinto** pelo desafio e apoio na utilização do Latex, pois a imagem é a primeira característica a ser analisada.

À **Direção da Federação Portuguesa de Atletismo** pelo apoio e compreensão constante da minha participação no Doutoramento, permitindo frequentar todas as aulas e me deslocar sempre que necessário

para tratar de assuntos relacionados com o Doutoramento.

À **Equipa Multidisciplinar da Federação Portuguesa de Atletismo**, em especial aos amigos **fisio-terapeuta Ricardo Paulino** e **psicólogo Doutor João Lameiras** por estarem diariamente presentes na discussão e compreensão do rendimento desportivo dos atletas e pelos conselhos que me permitiram crescer como profissional.

À **Direção Técnica Nacional da Federação Portuguesa de Atletismo**, no nome do **Diretor Técnico Nacional José Santos** pela compreensão ao longo destes anos e em especial ao amigo **técnico nacional Paulo Reis**, pela partilha de conhecimento e de momentos que serão inesquecíveis na minha vida profissional e pessoal.

Ao **Instituto Português do Desporto e Juventude**, nomeadamente ao responsável do Centro de Alto Rendimento do Jamor José Serrador, pela disponibilidade do espaço para a realização das recolhas.

**Aos treinadores** que estão envolvidos no Alto Rendimento da Federação Portuguesa de Atletismo que permitem diariamente momentos de aprendizagem.

Ao **Professor Doutor Rui Ruben** e à **Professora Doutora Milena Vieira** por terem acreditado na minha competência e profissionalismo para partilhar conhecimento com alunos que se preparam para ser os profissionais de amanhã.

**Aos meus amigos** pela compreensão e apoio constante e por permitirem momentos de foco diferente e divertido.

O meu agradecimento **aos meus familiares** pelo apoio total neste caminho e por compreenderem a minha distância em certos momentos. Este trabalho deve-se aos valores que me ensinaram, ao apoio nos momentos difíceis e pelo incentivo constante para finalizar mais um passo importante na minha vida.

Por fim e não menor, o meu agradecimento profundo e amoroso para a minha esposa, **Cláudia Neves**, que foi o pilar diário e fundamental para esta viagem, foi com ela que partilhei os meus entusiasmos, conquistas e tristezas.



# Conteúdo

<b>Conteúdo</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xviii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xix</b>
<b>Sumário</b>	<b>xxi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Pertinência e Questões de Investigação . . . . .	4
1.1.1 Estudo 1 - Descrição dos métodos cinemáticos e cinéticos aplicados na avaliação do rendimento desportivo de atletas de elite, no Atletismo: revisão sistemática . . . . .	5
1.1.2 Estudo 2 – Desenvolvimento de uma Unidade de Medição Inercial para determinar parâmetros cinemáticos e cinéticos, em atletas de elite, no Atletismo . . . . .	5
1.1.3 Estudo 3 - Validação da Unidade de Medição Inercial na determinação de parâmetros cinemáticos e cinéticos no salto de contramovimento, em atletas de elite, no Atletismo	6
1.1.4 Estudo 4 - Validação da Unidade de Medição Inercial na medição de parâmetros cinemáticos e cinéticos no Teste de Velocidade – 40m . . . . .	6
1.1.5 Estudo 5 - Implementação da Unidade de Medição Inercial na determinação de parâmetros cinemáticos e cinéticos no salto de contramovimento, em atletas de elite, no Atletismo . . . . .	6
1.1.6 Estudo 6 - Implementação da Unidade de Medição Inercial na determinação de parâmetros cinemáticos e cinéticos no teste de 40m, em atletas de elite, no Atletismo	7
1.2 Estrutura da Tese . . . . .	7
1.3 Referências Bibliográficas . . . . .	9

<b>2</b>	<b>Os métodos cinemáticos e cinéticos aplicados na avaliação do rendimento desportivo de atletas de elite, no Atletismo: revisão sistemática</b>	<b>13</b>
2.1	Resumo . . . . .	14
2.2	Introdução . . . . .	15
2.3	Métodos . . . . .	16
2.3.1	Protocolo . . . . .	16
2.3.2	Critérios de Inclusão . . . . .	16
2.3.3	Pesquisa . . . . .	16
2.3.4	Seleção dos estudos . . . . .	16
2.3.5	Avaliação da qualidade metodológica . . . . .	17
2.4	Resultados . . . . .	18
2.4.1	Avaliação da qualidade metodológica . . . . .	18
2.4.2	Caraterísticas dos estudos revistos . . . . .	18
2.4.3	Os parâmetros biomecânicos nos estudos de atletas de elite em competição . . . . .	18
2.4.4	Os efeitos do tipo de treino nos parâmetros biomecânicos . . . . .	21
2.5	Discussão de Resultados . . . . .	22
2.5.1	Caraterização dos estudos revistos . . . . .	22
2.5.2	Os parâmetros biomecânicos nos estudos de atletas de elite em competição . . . . .	22
2.5.3	Os efeitos do tipo de treino nos parâmetros biomecânicos . . . . .	23
2.6	Limitações e Perspetivas Futuras . . . . .	23
2.7	Conclusões . . . . .	24
2.8	Referências Bibliográficas . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento de uma Unidade de Medição Inercial sem fios para capturar parâmetros cinemáticos e cinético de atletas de elite, no Atletismo</b>	<b>27</b>
3.1	Resumo . . . . .	28
3.2	Introdução . . . . .	29
3.3	Desenho do Instrumento sem Fios . . . . .	30
3.3.1	Composição de componentes para o instrumento proposto . . . . .	30
3.4	Métodos . . . . .	31
3.4.1	Tratamento de Dados . . . . .	31
3.4.2	Algoritmos . . . . .	32
3.4.3	Filtro aplicado . . . . .	33
3.4.4	Posições de aplicação sugeridas . . . . .	33
3.5	Resultados . . . . .	34
3.6	Discussão . . . . .	35
3.7	Conclusões . . . . .	36
3.8	Referências Bibliográficas . . . . .	37

<b>4</b>	<b>Validação de uma IMU na determinação de parâmetros cinemáticos e cinéticos no CMJ, em atletas de elite, no Atletismo</b>	<b>39</b>
4.1	Resumo . . . . .	40
4.2	Introdução . . . . .	41
4.3	Métodos . . . . .	43
4.3.1	Amostra . . . . .	43
4.3.2	Equipamento . . . . .	43
4.3.3	Procedimentos . . . . .	43
4.3.4	Processamento de dados . . . . .	44
4.3.5	Análise Estatística . . . . .	46
4.4	Resultados . . . . .	46
4.5	Discussão . . . . .	50
4.6	Conclusões . . . . .	52
4.7	Referências Bibliográficas . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Validação de uma IMU na determinação de parâmetros cinemáticos e cinéticos no Teste de Velocidade - 40m, em atletas de elite, no Atletismo</b>	<b>57</b>
5.1	Resumo . . . . .	58
5.2	Introdução . . . . .	59
5.3	Métodos . . . . .	61
5.3.1	Amostra . . . . .	61
5.3.2	Equipamento . . . . .	61
5.3.3	Procedimentos . . . . .	61
5.3.4	Processamento de dados . . . . .	61
5.3.5	Análise Estatística . . . . .	62
5.4	Resultados . . . . .	63
5.5	Discussão . . . . .	65
5.6	Conclusões . . . . .	66
5.7	Referências Bibliográficas . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Interpretação da aceleração obtida por uma IMU e os parâmetros cinéticos e cinemáticos obtidos por uma plataforma de força, no CMJ, em atletas de elite, no Atletismo</b>	<b>71</b>
6.1	Resumo . . . . .	72
6.2	Introdução . . . . .	73
6.3	Métodos . . . . .	74
6.3.1	Amostra . . . . .	74
6.3.2	Equipamento . . . . .	74
6.3.3	Procedimentos . . . . .	74
6.3.4	Processamento de dados . . . . .	75

6.3.5	Análise Estatística . . . . .	76
6.4	Resultados . . . . .	77
6.5	Discussão . . . . .	82
6.6	Conclusões . . . . .	84
6.7	Referências Bibliográficas . . . . .	86
<b>7</b>	<b>Interpretação da aceleração no teste de velocidade de 40m, através da aplicação da IMU, em atletas de elite, no Atletismo</b>	<b>89</b>
7.1	Resumo . . . . .	90
7.2	Introdução . . . . .	91
7.3	Métodos . . . . .	92
7.3.1	Amostra . . . . .	93
7.3.2	Equipamento . . . . .	93
7.3.3	Procedimentos . . . . .	93
7.3.4	Processamento de dados . . . . .	93
7.3.5	Análise Estatística . . . . .	94
7.4	Resultados . . . . .	94
7.5	Discussão . . . . .	99
7.6	Conclusões . . . . .	101
7.7	Referências Bibliográficas . . . . .	103
<b>8</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>107</b>
8.1	Considerações Finais . . . . .	108
8.2	Limitações . . . . .	113
8.3	Perspetivas Futuras . . . . .	114
8.4	Implicações Práticas . . . . .	114
8.5	Conclusão Final . . . . .	115
8.6	Referências Bibliográficas . . . . .	117
<b>A</b>	<b>Consentimento da Comissão de Ética</b>	<b>121</b>
<b>B</b>	<b>Anexo B - Instituto Nacional da Propriedade Industrial</b>	<b>125</b>

# Lista de Figuras

1.1	Sinais, Dados, Informação e Conhecimento, adaptado (Choo, 2006) (pág.132) . . . . .	5
2.1	Fluxograma da seleção de artigos através das diferentes fases da revisão sistemática . . . . .	17
3.1	Exemplo do MEMS utilizado no estudo. Fonte: <a href="https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/icm-20948/">https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/icm-20948/</a> . . . . .	30
3.2	Composição e distribuição dos componentes para o instrumento proposto . . . . .	31
3.3	Propostas de colocação da Unidade de Medição Inercial no atleta . . . . .	34
3.4	Parâmetro cinemático - Aceleração . . . . .	34
3.5	Sinal não suavizado e sinal após aplicação do filtro . . . . .	35
3.6	Sinal obtido pela Unidade de Medição Inercial e pela Plataforma de Força . . . . .	35
4.1	Definição das fases do CMJ;1- Fase excêntrica;2- Fase da taxa de produção de força; 3- Fase concêntrica; 4- Fase de voo; 5- Fase de queda . . . . .	44
4.2	Gráficos do Bland-Altman . . . . .	50
4.3	Gráficos de correlação entre a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial na posição da L5 e a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial na posição do Calcâneo . . . . .	51
5.1	Gráficos de <i>Bland-Altman</i> - Unidade de Medição Inercial vs Câmara de Alta Velocidade . . . . .	64
6.1	Definição das fases do CMJ;1- Fase excêntrica;2- Fase da taxa de produção de força; 3- Fase concêntrica; 4- Fase de voo; 5- Fase de queda . . . . .	75
6.2	Gráficos dispersão e linhas de regressão dos modelos preditivos da aceleração vertical . . . . .	82
6.3	Gráficos de representação das curvas de aceleração obtidas por uma Unidade de Medição Inercial e uma Plataforma de Força . . . . .	83
7.1	Gráfico de dispersão e linha de regressão do modelo preditivos entre o tempo parcial 0-10m e o CMJ . . . . .	95

7.2	Gráficos dispersão e linhas de regressão dos modelos preditivos dos tempos parciais do teste de velocidade de 40m . . . . .	100
-----	---	-----

# Lista de Tabelas

1.1	Resumo dos métodos usados em cada Campeonato do Mundo de Atletismo, para cada evento do Atletismo . . . . .	3
2.1	Caraterização dos estudos revistos (n=5) . . . . .	19
2.2	Caraterização dos parâmetros biomecânicos por amostra e por estudo, em competição, n=2	20
2.3	Caraterização dos parâmetros biomecânicos nos estudos revistos em treino (n=3) . . . . .	21
4.1	Estatística descritiva para os instrumentos analisados e as diferenças sistemáticas ( $\rho \leq 0,05$ )	47
4.2	Média das diferenças e limites de confiança absoluto (LOA) <i>Bland-Altman's</i> , ambos para um intervalo de confiança de 95% para os parâmetros que não obtiveram diferenças significativas no <i>Test T</i> igual a zero entre a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial na posição da L5 e a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial na posição do calcâneo . . . . .	48
4.3	Correlação dos parâmetros obtidos entre a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial colocada na posição da L5 e a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial colocada na posição do calcâneo . . . . .	49
5.1	- Estatística descritiva das células fotoelétricas, medidor de deslocamento, câmara de alta velocidade e a Unidade de Medição Inercial, diferenças sistemáticas ( $\rho \leq 0.05$ ) e correlações entre os instrumentos analisados, para os parâmetros temporais [s] 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m e tempo total . . . . .	63
5.2	Estatística descritiva da câmara de alta velocidade e da Unidade de Medição Inercial, diferenças sistemáticas ( $\rho \leq 0.05$ ) e correlações entre os instrumentos analisados, para os parâmetros da fase de apoio, da fase de voo e tempo de passo . . . . .	64
5.3	Estatística descritiva do medidor de deslocamento e da Unidade de Medição Inercial, diferenças sistemáticas ( $\rho \leq 0.05$ ) e correlações entre os instrumentos analisados, para os parâmetros da aceleração máxima, mínima, raiz quadrada média e amplitude . . . . .	65
6.1	Estatística descritiva dos parâmetros analisados na Unidade de Medição Inercial e na Plataforma de Força . . . . .	78
6.2	Estatística do teste de correlação entre a aceleração vertical obtida através da Unidade de Medição Inercial e os parâmetros cinemáticos e cinéticos obtidos na Plataforma de Força . . . . .	79

6.3	Modelo de regressão para a aceleração vertical máxima . . . . .	80
6.4	Modelo de regressão para a aceleração vertical mínima . . . . .	80
6.5	Modelo de regressão para a amplitude da aceleração vertical . . . . .	81
6.6	Modelo de regressão para a raiz quadrada média da aceleração vertical . . . . .	81
7.1	Estatística descritiva e de correlação entre altura de salto e a raiz quadrada média da aceleração obtida pela Unidade de Medição Inercial e os parâmetros temporais obtidos pelas células em cada parcial . . . . .	95
7.2	Modelo de regressão para o tempo 0-10m associado com a altura de salto obtida através da Unidade de Medição Inercial . . . . .	96
7.3	Estatística descritiva e de correlação entre os parâmetros de aceleração obtidos pela Unidade de Medição Inercial e os parâmetros temporais obtidos pelas células em cada parcial . . . . .	97
7.4	Modelo de regressão para o parcial entre os 0m e os 10m . . . . .	98
7.5	Modelo de regressão para o parcial entre os 10m e os 20m . . . . .	98
7.6	Modelo de regressão para o parcial entre os 20m e os 30m . . . . .	99
7.7	Modelo de regressão para o parcial entre os 30m e os 40m . . . . .	99
8.1	Tabela resumo das questões levantadas nos estudos propostos e as conclusões obtidas . . . . .	116



# Lista de Abreviaturas

- 1D** Unidimensional
- 2D** Bidimensional
- 3D** Tridimensional
- BM** Traduzido do Inglês *Body mass* - Massa corporal
- BW** Traduzido do Inglês *Body weight* - Peso corporal
- CG** Centro de Gravidade
- CMJ** Traduzido do Inglês *Countermovement Jump* - Salto de contramovimento
- COP** Comité Olímpico de Portugal
- DJ** Traduzido do Inglês *Drop Jump* - Salto em queda
- DLT** Traduzido do Inglês "*Direct Linear Transformation*" - Transformação Linear Direta
- ECT** Escola de Ciências e Tecnologia
- ESTG** Escola Superior de Tecnologia e Gestão
- UE** Universidade de Évora
- FP** Traduzido do Inglês *Force plate* - Plataforma de Força
- FPA** Federação Portuguesa de Atletismo
- IAAF** Traduzido do Inglês "*International Association of Athletics Federations*" - Associação Internacional de Federações de Atletismo
- IIFA** Instituto de Investigação e Formação Avançada
- IMU** Traduzido do Inglês *Inertial Measurement Unit* - Unidade de Medição Inercial
- Hz** Hertz
- IPL** Instituto Politécnico de Leiria
- ISB** Traduzido do Inglês *International Society of Biomechanics* - Sociedade Internacional de Biomecânica
- L4** Apófise espinhosa da 4ª vértebra lombar
- L5** Apófise espinhosa da 5ª vértebra lombar

**LDS** Traduzido do Inglês *Local Dynamic Stability* - Estabilidade Dinâmica Local

**m** metros

**N** Newton

**PRISMA** Traduzido do Inglês *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* - Itens de relatório preferidos para revisões sistemáticas e metanálises

**Radar** Medidor de deslocamento a laser

**s** segundos

**SJ** Traduzido do Inglês *Squat Jump* - Salto de Agachamento

**VJ** Traduzido do Inglês *Vertical Jump* - Saltos Verticais

**W** Potência

**WA** Traduzido do Inglês *"World Athletics"* - Atletismo Mundial

# Sumário

Os relatórios técnicos de análise biomecânica, no Atletismo têm procurado resolver questões complexas relacionadas com o rendimento técnico dos atletas. Na procura de estudos científicos com atletas de elite e de acordo com os critérios definidos, verificaram-se poucos estudos desenvolvidos. Os métodos limitaram-se à análise cinemática e ao uso de vários instrumentos, em que a análise do parâmetro velocidade foi foco de estudo. Desta forma, este trabalho teve como objetivo desenvolver, validar e implementar um instrumento, que permita avaliar atletas de elite, no Atletismo. Foi desenvolvida uma unidade de medição inercial, que através de algoritmos obteve diretamente a aceleração e determinou os restantes parâmetros cinemáticos e cinéticos. Na validação de critério, entre instrumento desenvolvido e os golden standards propostos, no salto de contramovimento, o tempo de voo, a altura de salto, a amplitude de força vertical e a amplitude de aceleração vertical foram parâmetros válidos. Também, permitiu obter um sinal similar à plataforma de força identificando as diferentes fases do salto. Na corrida de velocidade de 40m, os parciais temporais e o tempo de passo demonstraram validade de critério. Na aplicação da unidade de medição inercial foram desenvolvidos vários modelos teóricos de regressão linear múltipla. No salto de contramovimento, a altura de salto, a força, a velocidade vertical e a força na fase excêntrica foram variáveis preditivas para a raiz quadrada média da aceleração vertical. Na corrida de velocidade de 40m, a altura de salto teve uma elevada explicação no parcial 0-10m e a aceleração obtida no eixo médio-lateral, vertical e ântero-posterior explicaram os restantes parciais temporais, 10-20m, 20-30m e 30-40m. O estudo indica as unidades de medição inercial como um instrumento a usar na avaliação e monitorização sistemática dos atletas de elite, do atletismo, pelo baixo custo, fácil aplicação, portabilidade, dados contínuos, em tempo-real e com resultados válidos.

**Palavras chave:** Cinemática; Cinética; Sensores; Alto Rendimento; Atletismo.



# Abstract

## **The contribution of the biomechanics to improvement the sports performance, in Track and Field**

### Development and Validation of a Dedicated Inertial Measurement Unit

The technical reports of biomechanical analysis, in Track and Field, have find to solved complex questions about the athlete's technical performance. When we searched scientific studies with highly training athletes and with the defined criterions, we verified few developed scientific works. The methods are limit to kinematics analysis and implement several instruments, where the velocity parameter was the focus of the study. Thus, this study aimed to develop, to validity and to apply an instrument, and evaluated the elite athletes, in Track and Field. It was developed an inertial measurement unit, through algorithms obtained acceleration directly, and it determined the remaining kinematic and kinetic parameters. In the criterion validity, between the developed instrument and the proposed golden standards, in countermovement jump, the flight time, the jump height, the vertical force amplitude, and the vertical acceleration amplitude were valid parameters. As well, it allowed us to obtain a similar signal with a force platform identifying the different phases of the jump. In the 40m sprint test, the temporal partials and the step time demonstrated criterion validity. In the application of the inertial measurement unit were develop several theoretical models of multiple linear regression. In the countermovement jump, the jump height, the vertical force and velocity, and the force in the eccentric phase were predictive variables to root mean square of the vertical acceleration. In the 40m sprint test, the jump height had a high explanation in the 0-10m partial, and the acceleration obtained in the mediolateral, vertical, and anteroposterior directions explained the remaining temporal partials, 10-20m, 20-30m and 30-40m. The study indicates the inertial measurement units as an instrument to apply in the systematic evaluation and monitoring of the elite athletes, of the Track and Field, by the low-cost prices, easy application and portability, continuous data, in real-time and with results valid.

**Keywords:** Kinematics; Kinetics; Sensors; High Performance; Track and Field.



# 1

## Introdução

O Atletismo, nos dias de hoje, é uma das modalidades mais populares no desporto Olímpico (IAAF). A modalidade é subdividida em quatro grandes áreas: corridas na pista, desde dos 100m até às corridas de longa distância de 10000m; eventos de pista, como o salto em comprimento, triplo salto, salto com vara, salto em altura, lançamento do peso, do disco, do martelo e do dardo; eventos na estrada, como a marcha atlética e a maratona; e os eventos combinados de heptatlo para as mulheres e decatlo para os homens (IAAF). Em Portugal, o Atletismo, até ao momento, é a única modalidade olímpica que obteve medalhas de ouro (quatro) em Jogo Olímpicos pelos atletas Carlos Lopes em México, 1984, Rosa Mota em Seul, 1988, Fernanda Ribeiro em Atlanta, 1996 e Néilson Évora em Pequim, 2008 (COP).

Os relatórios técnicos de análise biomecânica, no Atletismo, aplicados aos atletas de alta competição, procuraram resolver questões complexas e problemas relacionados com o rendimento técnico dos atletas e complementam a investigação realizada em laboratórios (Susanka, 1986). Com a informação técnica obtida através de estudos científicos, foi possível dotar o treinador com informação sobre treino técnico apropriado ao desenvolvimento individual dos atletas; expandir o conhecimento técnico para países com menor desenvolvimento no Atletismo e; obter uma informação mais pormenorizada dos atletas de elite. Ao longo dos anos, este processo tornou-se num ciclo de treino-formação que garante uma otimização do processo de treino dos treinadores, de alto nível (Susanka, 1986). Os relatórios técnicos de análise

biomecânica que foram realizados desde o Campeonato do Mundo de 1987, permitiram originar informação detalhada para o Atletismo (Brüggemann et al., 1987). O conhecimento obtido nesse momento foi tão importante que passados 30 anos a International Association of Athletics Federations (IAAF), e agora designada como World Athletics (WA), em parceria com a Leeds Beckett University, realizaram o maior estudo de análise biomecânica durante o Campeonato do Mundo de Atletismo de 2017 (IAAF, 2017; Bissas et al., 2017; Pollitt et al., 2017b; Dinsdale et al., 2017; Hanley et al., 2017; Pollitt et al., 2017a,c; Nicholson et al., 2017; Tucker et al., 2017; Bennett et al., 2017; Gravestock et al., 2017). Em Portugal, alguns estudos foram realizados com o objetivo de caracterizar os atletas portugueses, no triplo salto (Fernandes, 1992; da Silva, 1999), no salto em comprimento (da Conceição, 2004) e recentemente, a Federação Portuguesa de Atletismo (FPA) realizou um estudo de análise biomecânica na Taça da Europa de Lançamentos de 2018, com a colaboração dos alunos da licenciatura de Biomecânica, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) do Instituto Politécnico de Leiria (IPL), integrado na unidade curricular de Biomecânica do Movimento e dos alunos da licenciatura em Ciências do Desporto, da Universidade de Évora (UE), integrado na unidade curricular de Atletismo (Federação Portuguesa de Atletismo, 2018).

A realização destes relatórios técnicos, considerando os diversos eventos do Atletismo, associam diversos métodos e instrumentos, associados à biomecânica, com o objetivo de caracterizar o atleta, nos diferentes eventos, de Atletismo (Tabela 1.1). Ao longo dos anos, estes projetos biomecânicos descreveram o movimento dos diferentes eventos do Atletismo, de forma qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa foi realizada através das câmaras e foi aplicada nos eventos de velocidade e barreiras (Bissas et al., 2017; Ferro et al., 2002; Brüggemann et al., 1997; Hommel, 2009a,b; Pollitt et al., 2017b,a,c; Woo et al., 2011); nos eventos de meio fundo, fundo e maratona (Hanley et al., 2017; Enomoto et al., 2008; Hommel, 2009c); nos eventos de saltos horizontais, salto em comprimento e triplo salto (Mendoza and Nixdorf, 2010; Tucker et al., 2017; Woo et al., 2011); nos eventos de saltos verticais, salto em altura e salto com vara (Brüggemann et al., 1997; Gravestock et al., 2017; Nicholson et al., 2017; Woo et al., 2011); e nos eventos de lançamentos do dardo, disco, martelo e peso (Badura, 2010; Bennett et al., 2017; Dinsdale et al., 2017; Gutiérrez-Davila et al., 2009; Isele and Nixdorf, 2011; Schaa W, 2010; Isele et al., 2012; Woo et al., 2011). Este tipo de análise é relativamente simples e a informação obtida é quase imediata, mas com informação pouco detalhada, desta forma houve a necessidade de associar a análise quantitativa.

No estudo do movimento, a análise quantitativa é realizada através da análise biomecânica e estuda o movimento através da cinemática e da cinética. A cinemática é a descrição do movimento desprezando a massa e a força envolvida no movimento (Zatsiorsky, 1998) e determina os parâmetros da posição, deslocamento, velocidade e aceleração, lineares e angulares. A cinética é o estudo de relações entre as forças e o movimento resultante (Zatsiorsky, 1998), os parâmetros mecânicos como forças, impulsos, momentos de inércia, angular e de forças, assim como o trabalho, a potência e a energia, podem ser obtidos diretamente ou através de cálculos. Na análise cinemática, unidimensional (1D) é caracterizado por um movimento simples e retilíneo, ou seja, apenas numa direção (Vilas-Boas, 2016). Na análise 1D foram utilizadas as células fotoelétricas para determinar a velocidade média nos eventos de meio fundo e fundo, e de saltos horizontais. Nas provas de 800m e 1500m foi determinada a cada 100m, nos 3000m obstáculos, a partir do primeiro obstáculo, a cada 200m, nos 5000m e 10000m foram obtidos os valores de velocidade a cada 200m (Hanley et al., 2017; Hommel, 2009c); e nas provas de saltos horizontais para quantificar a velocidade média das células entre o 1m e os 6m a partir da tábua de chamada (Brüggemann et al., 1997; Mendoza and Nixdorf, 2010; Stepanek and Susanka, 1987; Tucker et al., 2017). Neste tipo de análise foi aplicado um dispositivo que permite detetar objetos distante e inferir suas distâncias (mais conhecido por radar), permitindo assim obter a velocidade nos eventos de velocidade e barreiras (Brüggemann et al., 1997; Woo et al., 2011) e salto com vara (Woo et al., 2011). Este tipo de material permite obter informação importante e imediata, no entanto, tem a limitação de analisar somente o movimento numa direção.

A análise cinemática bidimensional (2D) foi associada à análise qualitativa e à análise cinemática unidi-



mensional por caracterizar o movimento em duas direções, isto é, comprimento "x" e altura "y". Este tipo de análise foi aplicado através de câmaras colocadas, em posições de obter movimentos num único plano do movimento (plano sagital ou frontal), com o objetivo de caracterizar o movimento por fases e sendo utilizado nos eventos de velocidade, barreiras e saltos (Brüggemann et al., 1997). Com a necessidade de compreender os movimentos realizados em mais do que um plano e com mais precisão, ou seja, os movimentos de rotação, houve a necessidade de aplicar a análise cinemática tridimensional (3D). Desta forma é possível caracterizar o movimento nas três dimensões cartesianas no espaço (Vilas-Boas, 2016). Este tipo de análise foi aplicado através de pelo menos duas câmaras colocadas em planos diferentes, nos eventos de velocidade (Bissas et al., 2017; Pollitt et al., 2017b,c), de meio fundo e fundo (Enomoto et al., 2008; Hanley et al., 2017), de saltos horizontais e verticais (Nicholson et al., 2017; Tucker et al., 2017) e de lançamentos (Badura, 2010; Bennett et al., 2017; Brüggemann et al., 1987; Dinsdale et al., 2017). A análise cinemática 2D e 3D permitiram obter informação detalhada dos movimentos técnicos realizados nos eventos enumerados. Este tipo de análise tem a necessidade de transformar as coordenadas digitais obtidas através das câmaras, em coordenadas métricas, através da Transformação Linear Direta (DLT) (Abdel-Aziz et al., 2015), técnica muito utilizada na Biomecânica. Este método pode, também ser aplicado na análise 2D, no entanto, apresenta métodos matemáticos complexos e o tratamento de dados é moroso.

Tabela 1.1: Resumo dos métodos usados em cada Campeonato do Mundo de Atletismo, para cada evento do Atletismo

Evento	Análise Qualitativa	Análise Cinemática				Análise Cinética
		1D	2D	3D	ND	
Velocidade	1997, 1999, 2011, 2017	1987, 1997, 1999, 2009, 2011, 2017	1997	1987, 2017	1999, 2007, 2011	
Barreiras	1997, 1999, 2011, 2017	1987, 1997, 1999, 2009, 2011, 2017	1997	1987, 2017		
Meio Fundo e Fundo	2007, 2017	2009, 2017		2007, 2017		
Saltos Horizontais	2009, 2011, 2017	1987, 2009		2017	1987, 1997	
Saltos Verticais	1997, 2017	1987, 2011		2017	1987, 1997	1987
Lançamentos (Círculo)	2009, 2011, 2017			1987, 2017		
Lançamentos (Dardo)	2009, 2011, 2017				2011, 2017	

1D – Unidimensional; 2D – Bidimensional; 3D – Tridimensional; ND – Não descreve o método utilizado.

Após análise dos métodos implementados nos relatórios técnicos de análise biomecânica foi possível reunir um conjunto significativo de dados dos melhores atletas do Mundo. Para além disso, esta análise identificou uma diversidade de instrumentos e métodos associados, dificultando a implementação regular dos instrumentos em contexto competitivo ou treino e, desta forma, limitar a comparação dos resultados, ao longo da época e em diversos contextos ambientais. A análise qualitativa e cinemática 1D obtiveram resultados imediatos, mas pouco detalhados. A análise cinemática 2D e 3D obtiveram informação detalhada, mas o tempo de entrega não é imediato, fator que pode limitar este tipo de análise (Setuain et al., 2018). Para além de identificar um conjunto de instrumentos e métodos associados aos relatórios técnicos de análise biomecânica, foi possível obter resultados pertinentes que ajudam o treinador nas decisões no treino. Estes aspetos realçaram que a obtenção e compreensão dos parâmetros biomecânicos continua a ser essencial e determinante para o estudo do movimento dos gestos técnicos e um auxílio importante para o treinador de

Atletismo.

Novos equipamentos têm surgido e as Unidades de Medição Inercial (IMU) podem ser aplicados em ambiente laboratorial/controlado e no terreno (Setuain et al., 2018). Além de ser um equipamento de baixo custo, tem demonstrado que é um método robusto e fiável na análise dos gestos técnicos no desporto, o que o torna num equipamento de eleição para avaliar o rendimento desportivo e prevenir ou reabilitar a lesão. No Atletismo, foi possível identificar alguns estudos de validação das IMU nos seus diferentes eventos (Hoenig et al., 2018; Setuain et al., 2018). Setuain et al. (2018) tiveram como objetivo determinar a fiabilidade e o grau de concordância destes instrumentos com uma plataforma de força (FP). As IMUs foram aplicadas na zona lombar, nas apófises espinhosas da L4 e L5, local escolhido para representar o Centro de Gravidade (CG) e os sujeitos realizaram um teste de velocidade de 20m. Obtiveram um nível de correlação alto entre os dados recolhidos nas IMUs e os dados recolhidos nas FP, indicando que as IMUs mostraram valores apropriados de validade e confiabilidade para as variáveis propostas para o desempenho dos 20m.

Outro estudo de aplicação das IMUs no Atletismo foi realizado em atletas nos 5000m, com o objetivo de analisar a influência da fadiga na estabilidade dinâmica local (LDS) em atletas recreativos e competitivos. A LDS pode ser quantificada pela determinação do maior valor de expoente de Lyapunov e é interpretado como a habilidade de compensar pequenas perturbações internas ou externas para manter a locomoção funcional (Hoenig et al., 2018). As IMUs foram colocadas no tórax, na bacia e no pé dos atletas para determinar a LDS durante a corrida. Os resultados mostraram que a LDS na corrida aumentou com o aumento da velocidade da corrida para os dois grupos em análise. Além disso, o grupo constituído por corredores de competição mostrou ter um alto valor significativo de LDS quando comparado com o grupo de corredores recreativos. Estes resultados sugerem que à medida que a fadiga aumenta, os valores de LDS aumentam. Deste modo, a determinação da LDS permite compreender melhor a biomecânica e a fisiologia do esforço na corrida de atletas de 5000m (Hoenig et al., 2018).

## 1.1 Pertinência e Questões de Investigação

A biomecânica tem associado um conjunto de instrumentos e métodos que estão a evoluir ao longo dos anos (Robertson et al., 2013), com o intuito de obter uma informação rápida e detalhada, aos treinadores e investigadores. Este estudo tem como objetivo principal o desenvolvimento, a validação e a aplicação de um equipamento de avaliação de rendimento desportivo, de atletas de elite (atletas que representam a seleção nacional do seu país, e que estão inseridos no Programa de Alto Rendimento da sua federação, do Atletismo). Para concretizar este objetivo foram realizados seis estudos que serão apresentados como propostas para artigos científicos a produzir.

O desenvolvimento dos objetivos para este estudo de investigação teve em consideração o modelo de organização do conhecimento de Choo (2006), o qual se baseia na transformação do sinal, em dados, ou seja, o desenvolvimento do instrumento permite obter sinais (Estudo 2), que através de um processamento do sinal obtemos dados, isto é, elemento com representação apropriada, para armazenamento ou processamento e que pode conter informação. Os dados são fundamentais e podem ser, através de transformação adequada em informação, o que será feito através da validação do instrumento desenvolvido para recolha de dados (Estudo 3 e 4). A informação é o significado que os treinadores, atletas, biomecânicos e clínicos atribuem aos dados obtidos em diferentes contextos, por forma a conferir um significado real. O conhecimento é o saber adquirido, pelas experiências específicas e que permite reagir de forma adequada às diferentes situações, em treino, na competição ou no domínio clínico. Toda a informação deveria ser conhecimento, mas em função dos diferentes contextos e experiências é difícil assegurar que toda a informação obtida seja conhecimento. Neste trabalho, através da aplicação do instrumento em tarefas específicas (Estudo

5 e 6), perceber se a informação obtida está próxima do conhecimento adquirido, embora sabendo que o conhecimento está estritamente condicionada às capacidades de cada um, no processamento de informação armazenada. A Figura 1.1 apresenta de forma esquemática o modelo que permite perceber a forma como a partir dos dados podemos chegar ao conhecimento.

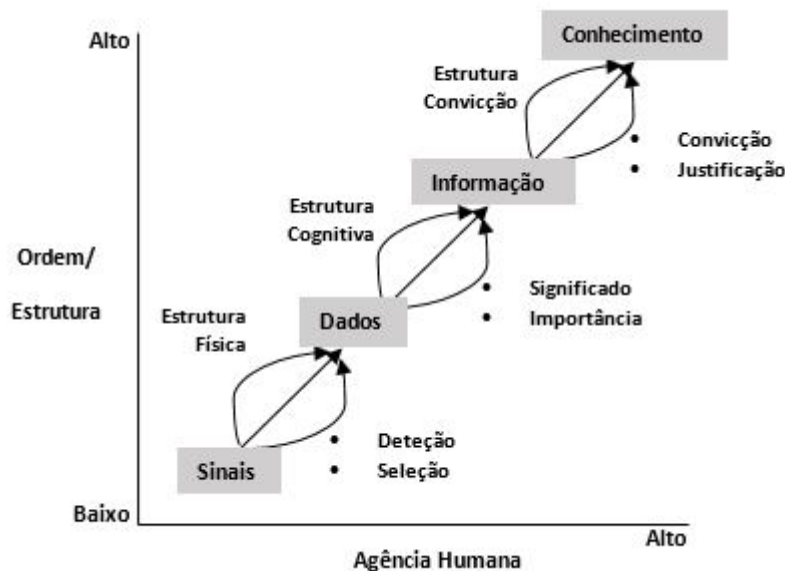


Figura 1.1: Sinais, Dados, Informação e Conhecimento, adaptado (Choo, 2006) (pág.132)

### 1.1.1 Estudo 1 - Descrição dos métodos cinemáticos e cinéticos aplicados na avaliação do rendimento desportivo de atletas de elite, no Atletismo: revisão sistemática

Os estudos na área técnica permitem conhecer de uma forma minuciosa os atletas dos diferentes eventos de Atletismo, mas, também, permitem identificar os poucos estudos de investigação realizados com atletas de elite, no Atletismo. Além disso, permitem aplicar instrumentos válidos, com informação detalhada, mas de custo elevado, de transportabilidade difícil e por norma são somente aplicáveis em ambiente laboratorial. Outros instrumentos, com um maior erro associado, de fácil transporte e de baixo custo, obtêm informação igualmente importante, mas com um processamento de dados demorado. Em atletas de elite, em que o seu ambiente de treino e competição varia ao longo de uma época, os aspetos indicados dificultam a sua implementação sistemática. Neste seguimento, questões surgiram: “Quantos estudos, realmente, científicos foram desenvolvidos no Atletismo, com atletas de elite? “; “Nesses estudos, que tipo de métodos foram aplicados?”; “Em contexto de treino e competição?”; “Quais os instrumentos aplicados?”; “Que parâmetros foram analisados?”. Por estas razões, o objetivo desta revisão sistemática foi identificar os métodos biomecânicos utilizados na avaliação de atletas de elite em treino e em competição.

### 1.1.2 Estudo 2 – Desenvolvimento de uma Unidade de Medição Inercial para determinar parâmetros cinemáticos e cinéticos, em atletas de elite, no Atletismo

No Atletismo, a avaliação dos atletas de elite tem sido realizada em treino e em competição. O desenvolvimento tecnológico ocorrido nos últimos anos tem permitido aplicar vários instrumentos com o objetivo de quantificar o movimento humano e o rendimento desportivo. A aplicação de instrumentos laboratoriais

tem o processo bem validado, mas os custos elevados, a dificuldade de transporte e as restrições do movimento técnico limitam a sua aplicação. No ambiente natural do atleta encontram-se instrumentos com informação imediata, mas pouco informativa e outros com informação detalhada, mas com erro associado e um processamento de dados maior, aspectos limitativos no processo de avaliação sistemática dos atletas. Recentemente, um dos instrumentos que tem sido aplicado e validado são as IMUs, pelo seu baixo custo, métodos robustos e fiabilidade. Desta forma, as seguintes questões foram levantadas: “Será possível desenvolver uma IMU de baixo custo?”; “Será possível aplicar a IMU em treino e em competição, de atletas de elite, no Atletismo?”; “É possível obter parâmetros cinemáticos e cinéticos?”; e “Em tempo-real?”. O objetivo deste estudo foi desenvolver uma IMU para capturar o parâmetro aceleração e a partir deste determinar os restantes parâmetros biomecânicos propostos e implementá-la na avaliação dos atletas de elite, no Atletismo e selecionar os algoritmos de processamento de sinal.

### **1.1.3 Estudo 3 - Validação da Unidade de Medição Inercial na determinação de parâmetros cinemáticos e cinéticos no salto de contramovimento, em atletas de elite, no Atletismo**

O teste de CMJ é um dos testes mais aplicados na avaliação da potência dos membros inferiores de atletas. Diversos instrumentos foram aplicados na avaliação deste teste, no entanto, foi necessário validar os instrumentos e os métodos usados. Recentemente, as IMUs têm sido validadas na análise dos parâmetros temporais e cinemáticos e a literatura indicou que poucos estudos de validação envolvendo a IMU foram realizados. Neste sentido surgiram as seguintes questões, “Que parâmetros cinemáticos estão mais associados à FP?”; “Será possível utilizar a IMU para determinar parâmetros cinéticos?”. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar a validade de critério dos parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos obtidos pela IMU tendo como critério de referência a FP.

### **1.1.4 Estudo 4 - Validação da Unidade de Medição Inercial na medição de parâmetros cinemáticos e cinéticos no Teste de Velocidade – 40m**

As tarefas da corrida de velocidade têm sido implementadas para potenciar o rendimento das atividades explosivas. Nas ciências do desporto, a mecânica da corrida de velocidade tem sido estudada, com o foco de compreender a adaptação do corpo humano à tarefa realizada e desta forma, descrever o seu padrão de movimento. Muitos instrumentos têm sido desenvolvidos, validados e aplicados nesta tarefa, no entanto, os procedimentos tecnológicos e métodos associados têm tornado as avaliações complicadas e por vezes limitado a análise mecânica da corrida. Na tarefa da corrida de velocidade, as IMUs têm sido validadas e aplicadas por colmatar as limitações apresentadas pelos laboratórios tradicionais e por ser um instrumento robusto e confiável na análise do movimento desportivo. Algumas questões surgiram, “A IMU permite identificar o número de apoios realizados durante o teste de 40m?”; “Permite, igualmente, determinar o tempo da fase de apoio, da fase de balanço e do tempo de passo?”; “Que parâmetros cinemáticos e cinéticos podemos obter através da IMU no teste de velocidade?”. Este estudo teve como objetivo validar uma IMU no teste de corrida de velocidade de 40m, em atletas de elite do Atletismo.

### **1.1.5 Estudo 5 - Implementação da Unidade de Medição Inercial na determinação de parâmetros cinemáticos e cinéticos no salto de contramovimento, em atletas de elite, no Atletismo**

Vários estudos têm sido realizados para compreender qual a influência dos parâmetros cinemáticos e cinéticos no máximo rendimento dos saltos verticais (VJ). Esta associação de parâmetros tem permitido identificar que uma maior altura de salto tem indicado uma maior força, velocidade, impulso vertical e coordenação motora dos indivíduos, no entanto, foi a potência muscular que apresentou maior relação com o rendimento do salto. Esta análise dos parâmetros tem sido realizada na FP, que tem permitido obter resultados com uma elevada precisão e validade, no entanto, os preços bastante elevados e transportes difíceis são uma limitação grande para a maioria dos utilizadores, principalmente para treinadores cujos atletas realizam estágios e competições em diversos locais do Mundo. As IMUs são instrumentos integrados de registo de acelerações, e direções dos movimentos através da informação de giroscópios e magnetómetros e têm sido aplicadas em estudos de validação dos VJ, nomeadamente no CMJ, indicando uma validade e consistência na determinação da altura de salto. Ao longo desta pesquisa questões surgiram, “Será que a aceleração obtida pela IMU tem uma associação elevada com a altura de salto, força vertical, potência vertical e impulsos na fase excêntrica e concêntrica, parâmetros obtidos pela FP?”. O objetivo deste estudo foi investigar a correlação dos parâmetros cinéticos, de força, potência e impulso, e dos parâmetros cinemáticos, de velocidade obtidos por uma FP com a aceleração vertical obtida diretamente da IMU, num grupo de atletas de elite no Atletismo.

### **1.1.6 Estudo 6 - Implementação da Unidade de Medição Inercial na determinação de parâmetros cinemáticos e cinéticos no teste de 40m, em atletas de elite, no Atletismo**

A corrida de velocidade nos 100m, a fase de aceleração tem sido determinante para alcançar rendimentos desportivos. A associação entre a aceleração e o comportamento mecânico (biomecânico) do atleta é determinante para melhores resultados. O CMJ tem permitido indicar a potência dos membros inferiores dos atletas e a sua associação aos resultados temporais tem sido objeto de estudo. As passadeiras instrumentadas, também, têm permitido compreender os parâmetros cinéticos para obter uma maior informação da corrida de velocidade. Interpretar as forças realizadas dos apoios em ambiente natural tem sido realizado, através da implementação de FPs no solo, com o objetivo de obter uma informação detalhada, de cada um dos apoios e desta forma, compreender a sua relação com o rendimento desportivo. As IMUs têm sido testadas, recolhendo aceleração de forma contínua, em tempo-real, no ambiente natural e com custos mais baixos, quando comparados com as FPs. Assim, algumas questões foram surgindo, “Será que a altura de salto e a aceleração vertical obtidas pela IMU no CMJ têm correlação com o tempo medido através das células fotoelétricas?”; “De que forma é que a aceleração obtida através da IMU permite associar-se aos tempos obtidos através das células fotoelétricas?”; e “Será que o comportamento da aceleração permite explicar a influência das acelerações na corrida de velocidade?”. Desta forma, foi proposto aplicar a IMU no teste de velocidade de 40m, com atletas de elite de Atletismo, para interpretar de que forma é que a altura de salto e a aceleração obtidas através da IMU, na realização do CMJ permite associar-se com os parâmetros temporais obtidos pelas células fotoelétricas e associar os valores de aceleração obtidos com uma IMU na corrida de velocidade de 40m com os tempos obtidos através de células fotoelétricas e compreender a influência das acelerações na corrida realizada.

## 1.2 Estrutura da Tese

Seguindo a presente Introdução (capítulo 1), esta tese engloba 6 estudos de investigação.

O objetivo do primeiro estudo (capítulo 2), foi analisar os métodos biomecânicos (cinemático e cinético) implementados no treino e na competição no Alto Rendimento do Atletismo, através de uma revisão sistemática.

O objetivo do segundo estudo (capítulo 3), foi desenvolver uma IMU (Anexo 2 - documento submetido no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

O objetivo do terceiro estudo (capítulo 4), foi validar a IMU no CMJ, enquanto o quarto estudo (capítulo 5), foi validar a IMU no teste de velocidade, 40m.

No capítulo 6 e capítulo 7 tiveram como objetivo implementar a IMU no teste de CMJ e no teste de velocidade, 40m, respetivamente.

Finalmente, no capítulo 8, foi abordada a discussão geral e as principais conclusões deste estudo, bem como as recomendações futuras e limitações encontradas.

O Consentimento Informado (Anexo 1) teve parecer positivo da Comissão de Ética da UE.

### 1.3 Referências Bibliográficas

- Abdel-Aziz, Y. I., Karara, H. M., and Hauck, M. (2015). Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry\*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(2):103–107.
- Badura, M. (2010). Biomechanical analysis of the discus at the 2009 IAAF World Championships in athletics. *New Studies in Athletics*, 25(3/4):23–35.
- Bennett, T., Walker, J., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Discus Throw and Javelin Throw. Technical report, IAAF.
- Bissas, A., Walker, J., Tucker, C., Paradisis, G. P., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: 100m. Technical report, IAAF.
- Brüggemann, G.-P., Koszewski, D., and Müller, H. (1997). Biomechanical Research Project Athens 1997: Final Report. Technical report, IAAF.
- Brüggemann, G.-P., Susanka, P., Bosco, C., Glad, B., and Hommel, H. (1987). Scientific Report on the II World Championships in Athletics Rome, 1987. Technical report, IAAF, Rome.
- Choo, C. W. (2006). *The Knowing Organization: How Organizations Use Information to Construct Meaning, Create Knowledge, and Make Decisions*. Oxford University Press, Inc, New York, 2ª edition.
- COP (2016). Pódios.
- da Conceição, F. A. V. (2004). *Estudo Biomecânico do Salto em Comprimento: Modelação, Simulação e Otimização da Chamada (Tese de Doutoramento)*. PhD thesis, Universidade do Porto.
- da Silva, J. A. P. (1999). *Contributo para a caracterização do Triplo Salto: Identificação e caracterização do comportamento de alguns Parâmetros Cinemática limitadores do rendimento (Tese de Mestrado)*. PhD thesis, Universidade do Porto.
- Dinsdale, A., Thomas, A., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Hammer Throw and Shot Put Throw. Technical report.
- Enomoto, Y., Kadono, H., Suzuki, Y., Chiba, T., and Koyama, K. (2008). Biomechanical analysis of the medalists in the 10,000 metres at the 2007 World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics -IAFF*, 23(3):61–66.
- Federação Portuguesa de Atletismo, F. (2018). Federação Lança Projecto Biomecânico na Taça da Europa de Lançamentos.
- Fernandes, O. (1992). Kinematic analysis of the portuguese triple jumpers. In *International Students conference*, Budapest.
- Ferro, A., Rivera, A., Pagola, I., Ferreruella, M., Martin, A., and Rocandio, V. (2002). A kinematic study of the sprint start events at the 1999 World Championships in Athletics in Sevilla. *Isbs 2002*, pages 72–75.
- Gravestock, H., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Pole Vault. Technical report, IAAF.
- Gutiérrez-Davila, M., Rojas, J., Campos, J., Gámez, J., and Encarnación, A. (2009). Biomechanical analysis of the shot put at the 12th IAAF World Indoor Championships Part1. *New Studies in Athletics*, 24(3):45–61.

- Hanley, B., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Middle Distance, Long Distance and Marathon. Technical report, IAAF.
- Hoening, T., Hamacher, D., Braumann, K. M., Zech, A., and Hollander, K. (2018). Analysis of running stability during 5000 m running. *European Journal of Sport Science*, 19(4):413–421.
- Hommel, H. (2009a). Biomechanical analysis of the Hurdles at the 12th IAAF World Indoor Championships. *Deutscher Leichtathletik-Verband*.
- Hommel, H. (2009b). Biomechanical analysis of the Sprint at the 12th IAAF World Indoor Championships. *Deutscher Leichtathletik-Verband*.
- Hommel, H. (2009c). Biomechanics Report World Championships 2009 Berlin - Middle & Long Distance, Race Walk and Steeple. Technical report.
- IAAF (2009). The International Associations of Athletics Federations (IAAF) was founded in 1912. Athletics has been contested in some format at every edition of the Olympic Games, ancient and modern.
- IAAF (2017). Largest ever biomechanics research project in athletics to be undertaken at IAAF World Championships London 2017.
- Isele, R., Lee, S.-H., and Nixdor, E. (2012). Biomechanical Analysis of the Hammer Throw - 13th IAAF World Championships in Athletics - Daegu. Technical report.
- Isele, R. and Nixdorf, E. (2011). Biomechanical Analysis of the Hammer Throw at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 26(3):19–53.
- Mendoza, L. and Nixdorf, E. (2010). Biomechanical Analysis of the Horizontal Jumping Events at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 26(3/4):25–60.
- Nicholson, G., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: High Jump. Technical report, IAAF.
- Pollitt, L., Bissas, A., and Merlino, S. (2017a). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: 4x100m. Technical report, IAAF.
- Pollitt, L., Walker, J., Bissas, A., and Merlino, S. (2017b). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: 100m Hurdles and 110m Hurdles. Technical report, IAAF.
- Pollitt, L., Walker, J., Tucker, C., Bissas, A., and Merlino, S. (2017c). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: 200m and 400m. Technical report, IAAF.
- Robertson, D. G. E., Caldwell, G. E., Hamill, J., Kamen, G., and Whittlesey, S. N. (2013). *Research Methods in Biomechanics*. Human Kinetics, 2<sup>ª</sup> edition edition.
- Schaa W (2010). Biomechanical Analysis of the Shot Put at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 3(4):9–21.
- Setuain, I., Lecumberri, P., Ahtiainen, J. P., Mero, A. A., Häkkinen, K., and Izquierdo, M. (2018). Sprint mechanics evaluation using inertial sensor-based technology: A laboratory validation study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(2):463–472.
- Stepanek, J. and Susanka, P. (1987). Discus throw: results of a biomechanic study. *New Studies in Athletics*, 1:25–36.



- Susanka, P. (1986). The IAAF - Top-Competition programme and its practical coaching applications. *New Studies in Athletics (NSA)*, 4:27–31.
- Tucker, C., Nicholson, G., Cooke, M., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Long Jump and Triple Jump. Technical report, IAAF.
- Vilas-Boas, J. P. (2016). *Biomecânica do Desporto*. IPDJ.
- Woo, S. Y., Seo Kim, J. S., Nam, H. M. K. J., Choi, S. B., and Kim, Y. W. (2011). Biomechanics Research Project in the IAAF World Championships Daegu 2011. Technical report, Korean Society of Sport Biomechanics.
- Zatsiorsky, V. (1998). *Kinematics Of Human Motion*. Human Kinetics.



# 2

Os métodos cinemáticos e cinéticos aplicados na avaliação do rendimento desportivo de atletas de elite, no Atletismo: revisão sistemática

## 2.1 Resumo

Introdução: O objetivo desta revisão sistemática foi identificar os métodos biomecânicos utilizados na avaliação de atletas de elite em treino.

Métodos: O protocolo PRISMA foi seguido para a elaboração da revisão. A PubMed foi pesquisada usando os operadores booleanos (*métodos biomecânicos*) E (*performance*). Dois revisores independentes avaliaram a qualidade metodológica dos estudos através da escala de Black & Downs. Dos 2014 estudos encontrados inicialmente e após a aplicação dos critérios de inclusão, apenas cinco estudos foram incluídos na análise.

Resultados: A média obtida na avaliação da qualidade metodológica foi de 11.6, considerada uma elevada pontuação. Dos cinco estudos com atletas de elite ou altamente treinados, aplicaram os métodos de análise cinemática (n=5), na competição (n=2) e no treino (n=3). Os cinco estudos usaram diferentes métodos e instrumentos de medição, indicando cuidados quando comparados os mesmos parâmetros biomecânicos ao longo dos estudos. A velocidade é um parâmetro biomecânico de análise regular, bem como, a compreensão de como a otimizar.

Conclusões: Os estudos identificaram uma lacuna de estudos de análise cinética e a aplicação de vários instrumentos. Sugere-se o desenvolvimento de um instrumento que se possa aplicar em contextos diferenciados e que obtenha parâmetros cinemáticos e cinéticos de forma ecológica.

**Palavras-chaves:** Análise biomecânica; Performance; e Alta competição

## 2.2 Introdução

No Atletismo, a biomecânica aplicada a atletas de Alta Competição, tem procurado resolver questões complexas e problemas relacionados com os gestos técnicos realizados pelos atletas e complementar a investigação realizada em laboratórios (Susanka, 1986). Os principais objetivos da aplicação dos relatórios técnicos de análise biomecânica em competição têm sido a obtenção de informação técnica dos melhores atletas do Mundo, com o intuito de treinadores de alto nível obterem uma informação mais pormenorizada desses mesmos atletas; dos treinadores de jovens aplicarem um treino técnico correto e apropriado no desenvolvimento individual dos atletas e; na divulgação do conhecimento técnico para países com menor desenvolvimento no Atletismo (Susanka, 1986). Os relatórios técnicos de análise biomecânica tiveram o seu ponto de partida no Campeonato do Mundo de 1987 (Brüggemann et al., 1987) e durante 30 anos tem-se verificado a sua implementação regular em Campeonatos do Mundo. De um modo particular, o Campeonato do Mundo de 2017 associou os métodos de análise cinemática para caraterizar um determinado atleta ou evento (IAAF, 2017; Bissas et al., 2017; Pollitt et al., 2017b; Dinsdale et al., 2017; Hanley et al., 2017; Pollitt et al., 2017a,c; Nicholson et al., 2017; Tucker et al., 2017; Bennett et al., 2017; Gravestock et al., 2017). Nas últimas décadas, vários artigos técnicos têm sido desenvolvidos referentes a competições específicas, nomeadamente na sétima Taça da Europa de Marcha Atlética de 2007. Nesta competição, (Hanley et al., 2008) realizaram uma análise cinemática tridimensional (3D), através de duas câmaras fixas, com o objetivo de obter a relação da fadiga com os parâmetros de velocidade, amplitude e de frequência de passo, e assim, caraterizar os atletas de marcha atlética envolvidos. Com este método foi possível identificar a velocidade como o parâmetro mais importante e o que teve maior associação com a velocidade foi a frequência de passo.

No Campeonato do Mundo de Atletismo de 2009, Badura (2010) utilizou duas câmaras para realizar uma análise cinemática 3D e caraterizar os atletas envolvidos na competição do lançamento do disco. Este método permitiu obter parâmetros de velocidade de saída do disco, ângulo de saída do disco, deslocamento e velocidade dos segmentos corporais, bem como a caraterização temporal das diferentes fases do lançamento do disco. A análise cinemática foi realizada para determinar que a velocidade de saída do disco representa 25% da distância obtida, mas que 50% do lançamento é explicado pela fase de duplo apoio, por ser indicada como a fase em que o atleta acelera o disco. Relativamente, aos segmentos verificou-se que a velocidade da anca e do ombro tiveram uma grande relação com o resultado obtido na prova.

No Encontro Nacional Francês de 2011, em Tarare e no Campeonato do Mundo de 2011, em Daegu, Guex (2012) utilizou a análise cinemática bidimensional (2D) com o objetivo de caraterizar os atletas de 400m barreiras. Ao analisar os parâmetros cinemáticos, o autor verificou que os atletas mais rápidos nos 400m barreiras, são os que têm perdas de 5%, entre os primeiros 200m da corrida e os segundos 200m. Maiores amplitudes e frequência de passo apresentaram uma associação inversa com o tempo obtido em prova, revelando aquilo que podem ser dois indicadores de performance e, enaltecendo a aplicabilidade dos métodos biomecânicos.

No Campeonato do Mundo de 2009, Panoutsakopoulos et al. (2017) realizaram uma análise cinemática 2D com o objetivo de caraterizar a fase final da corrida de balanço dos atletas de salto em comprimento que participaram, e assim, identificar as diferenças entre os atletas masculinos e femininos. A análise dos parâmetros cinemáticos permitiu identificar que existem diferenças na velocidade realizada entre os atletas do sexo feminino e masculino, onde os atletas masculinos realizaram velocidade nos últimos três passos superiores às atletas femininas. Este tipo de método permitiu, também, caraterizar o movimento realizado pelos melhores atletas, nos quais se verificou uma maior amplitude no penúltimo passo, com o objetivo de aumentar o percurso da aceleração podendo assim aplicar mais força e como consequência cinemática, ocorre uma diminuição da altura do centro de gravidade (CG), permitindo desta forma, encurtar o último passo, para melhor transformar a velocidade horizontal da corrida de balanço, em velocidade vertical na

saída da fase de chamada.

Durante estes estudos técnicos identificou-se a importância de caracterizar o movimento dos atletas, compreender mecanicamente as técnicas desportivas de diferentes eventos do Atletismo, para dessa forma ser possível otimizar o rendimento desportivo dos atletas envolvidos. Neste tipo de estudos, foi possível identificar que o tipo de instrumentação utilizada, na maior parte das situações, é muito similar. Esta observação, permitiu identificar que não houve grande evolução dos instrumentos e dos métodos associados à análise biomecânica em competição, ficando apenas restringida à utilização de câmaras de velocidade elevada ou normal e à aplicação dos métodos de análise cinemática 2D e 3D, alguns dos quais já têm perto de um século de existência. Neste seguimento, questões surgiram: “Quantos estudos, realmente, científicos foram desenvolvidos no Atletismo, com atletas de elite? “; “Nesses estudos, que tipo de métodos foram aplicados?”; “Em contexto de treino e competição?”; “Quais os instrumentos aplicados?”; “Que parâmetros foram analisados?”. Desta forma, este estudo teve como objetivo principal realizar uma revisão sistemática dos métodos biomecânicos usados na avaliação de atletas de elite em treino e em competição.

## 2.3 Métodos

### 2.3.1 Protocolo

Esta revisão sistemática, foi conduzida após realização de uma pesquisa exploratória, seguindo o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses*) (Bento, 2014; Moher et al., 2009; Liberati et al., 2009). A pesquisa definitiva na base de dados foi realizado durante o mês de agosto (dia 26 de agosto de 2019).

### 2.3.2 Critérios de Inclusão

A pesquisa foi realizada recorrendo à identificação de estudos transversais ou longitudinais publicados em revistas com revisão por pares, e que cumprissem os seguintes critérios: (1) Incluísem atletas altamente bem treinados; (2) Atletas com idade igual ou superior a 17 anos; (3) artigos que incluíssem os métodos de análise cinemática ou análise cinética; (4) Artigos escritos em Inglês. Foram excluídos os estudos: (1) Estudos publicados após dezembro de 2018; e (2) revisões, revisões sistemáticas e/ou meta-análises.

### 2.3.3 Pesquisa

Esta revisão sistemática usou a base de dados Pubmed usando os filtros de Data de Publicação (*Publication dates*): até 31-12-2018, Espécie (*Species*): Humanos, Línguas (*Languages*): Inglês, e recorrendo às palavras-chave *biomechanics methods* e *performance*. Os operadores booleanos "AND" foram usados na pesquisa "*biomechanics methods*) AND *performance*". A pesquisa não considerou a lista de referências dos estudos, nem outra literatura cinzenta.

### 2.3.4 Seleção dos estudos

Os estudos foram selecionados através da utilização das ferramentas do motor de busca PubMed: Data de Publicação (*Publication dates*): até 31-12-2018, foram excluídos 174 artigos; Espécie (*Species*): Humanos, foram excluídos 367; Línguas (*Languages*): Inglês, foram excluídos 15. De seguida, foram excluídas as

Revisões e Meta-análises, foram excluídos 145 artigos. A análise pelo título foi realizada considerando a modalidade de Atletismo e os eventos associados (*Track and Field, Athletics, Jumps, Sprint, Running, Walking, Race walking, Athletes, Force, Speed and Throwing*) e foram excluídos 1215 artigos. Por fim foi analisado o *Abstract* de cada um dos estudos considerando os critérios de inclusão e exclusão mencionados em cima, foram excluídos 90 artigos (ver Figura 2.1).

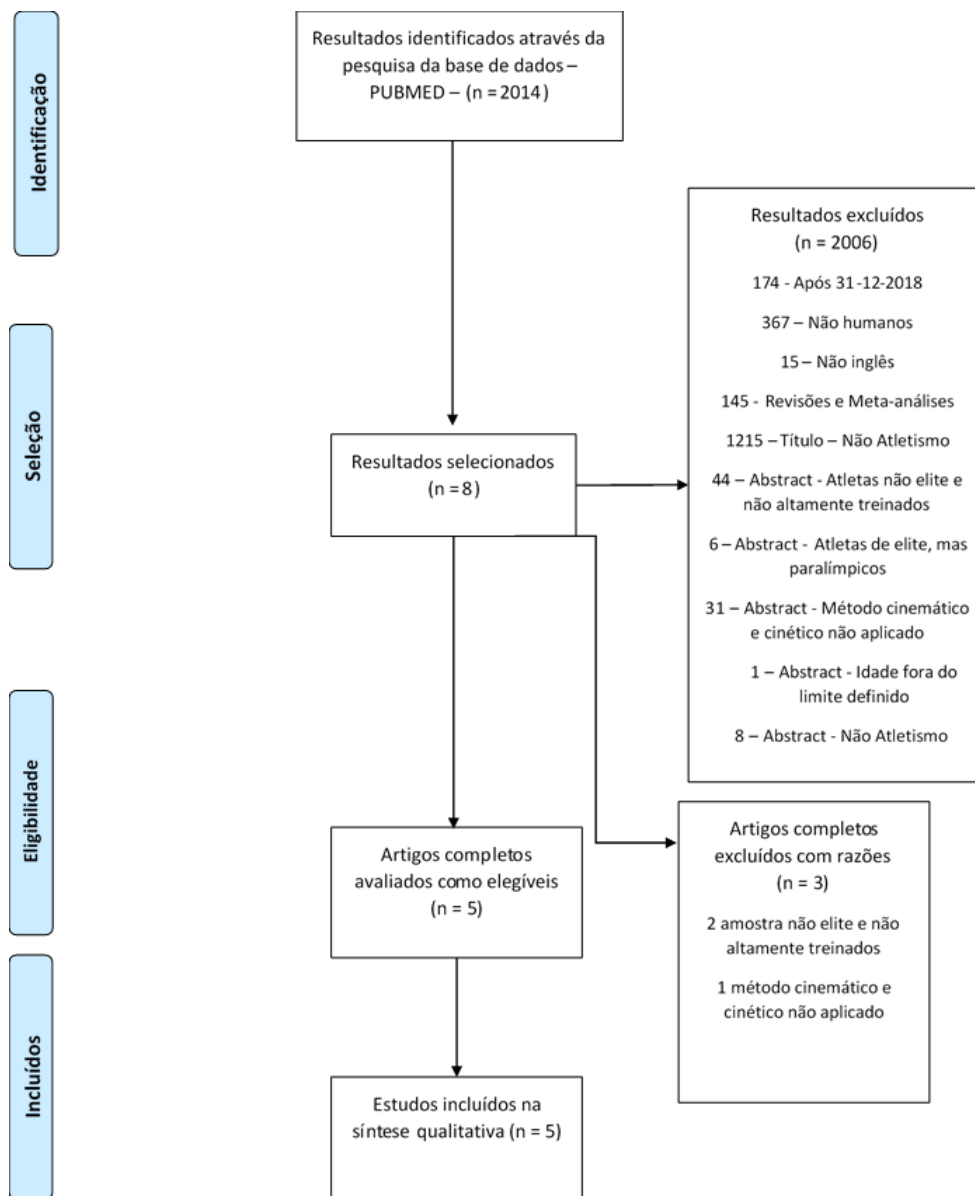


Figura 2.1: Fluxograma da seleção de artigos através das diferentes fases da revisão sistemática

### 2.3.5 Avaliação da qualidade metodológica

Dois revisores independentes mediram a qualidade metodológica dos artigos e sempre que necessário e em caso de desacordo, os revisores resolviam através de discussão e consenso. A qualidade metodológica foi medida através da escala de avaliação da qualidade metodológica de Downs and Black (1998) que define os itens nas seguintes subcategorias: relatório, validade externa, validade interna e potência. A versão original tem 27 itens para um total de 31 pontos. No entanto, realizaram-se as seguintes adaptações para

enquadrar da melhor forma o objetivo de estudo: (i) item 5, item 14, item 15, item 17, item 21, item 22, item 23, item 24, item 25 (Macadam et al., 2019; Moens et al., 2019) e o item 27 (Feitosa et al., 2019; Macadam et al., 2019) não foram usados; (ii) a palavra paciente foi substituída por participante (Feitosa et al., 2019). Estudos prévios realizaram adaptações similares (Costa et al., 2015; Feitosa et al., 2019; Macadam et al., 2019). Artigos com maior pontuação foram considerados de qualidade superior (Feitosa et al., 2019) e consideraram-se os seguintes níveis de pontuação, baixa qualidade,  $<10/17$  e alta qualidade  $>10/17$  (Macadam et al., 2019; Moens et al., 2019).

## 2.4 Resultados

### 2.4.1 Avaliação da qualidade metodológica

A pontuação da qualidade metodológica dos cinco artigos incluídos, tiveram um intervalo de 11 e 12, com uma média de resultados de 11.6 de 17, indicando uma alta qualidade metodológica para os estudos revistos (Tabela 2.1).

### 2.4.2 Características dos estudos revistos

Os estudos revistos tiveram um total de 116 atletas de elite (80 masculinos e 36 femininos), no evento do lançamento do dardo estiveram 41 atletas seniores de elite (26 masculinos e 15 femininos), 35 atletas seniores de elite no evento de velocidade, especificamente nos 100m (34 masculinos e 1 feminino) e 40 atletas juniores de elite no evento de marcha atlética (20 masculinos e 20 femininos). Em todos os estudos foram analisados parâmetros cinemáticos, através de diversos instrumentos, nomeadamente células fotoelétricas, câmaras de velocidade normal e de alta velocidade, e sistemas optoelectrónicos. Nas disciplinas do Lançamento do dardo e da marcha atlética os estudos mostram que as recolhas foram realizadas em competição, enquanto nas disciplinas da velocidade os estudos mostram que as recolhas foram realizadas em treino (Tabela 2.1).

### 2.4.3 Os parâmetros biomecânicos nos estudos de atletas de elite em competição

Em competição, o lançamento do dardo (Viitasalo et al., 2003) e a marcha atlética (Hanley et al., 2014) foram caracterizados através da obtenção e análise dos parâmetros biomecânicos e relacionados com o resultado competitivo dos atletas. Em ambos os casos foram considerados parâmetros temporais e cinemáticos. No lançamento do dardo o resultado de competição foi em média 79,00m e 59,04m, respetivamente para atletas masculinos e atletas femininos. Os parâmetros estudados estiveram relacionados com as condições de saída do dardo, ou seja, a velocidade de saída do dardo, o ângulo de saída do dardo e o ângulo de ataque do dardo. Na marcha atlética o resultado de competição foi em média 45:53s para os atletas masculinos e 51:20s para os atletas femininos. Os parâmetros temporais analisados foram calculados o tempo de contacto, o tempo de voo e a percentagem de tempo de contacto. Os parâmetros cinemáticos lineares estudados foram a velocidade de passo, a frequência de passo e o comprimento de passo e a distância da zona medial ao pé da frente (*foot ahead*) e ao pé de trás (*foot behind*). Na caracterização dos parâmetros cinemáticos angulares foram determinados no plano transversal a rotação pélvica, a rotação do ombro e o ângulo de distorção do tronco causados pela rotação da linha dos ombros com a linha da zona pélvica. No plano sagital foram considerados o ângulo do joelho, o ângulo da anca, o ângulo do tornozelo, o ângulo do ombro e o ângulo do cotovelo (Tabela 2.2).



Tabela 2.1: Caracterização dos estudos revistos (n=5)

Estudo	Amostra	Ambiente	Disciplina	Instrumentos (métodos usados)	Pontuação da Qualidade
(Viitasalo et al., 2003)	26 atletas masculinos e 15 atletas femininos de nível de elite internacional	Competição	Dardo	Porta com Células fotoelétricas de infravermelhos (Análise cinematográfica)	12
(Kratky and Müller, 2013)	19 atletas masculinos de elite da seleção da Áustria (média: $21 \pm 2.3$ anos – 17 – 26 anos); Marca aos 100m: $10.91 \pm 0.23$ s – 10.41 – 11.25;	Treino	Velocidade	Células fotoelétricas – 20m lançados; Optojump-next (Microgate, Bolzano, Italy, 1000Hz) (Análise cinematográfica)	11
(Hanley et al., 2014)	20 atletas juniores masculinos ( $18.2 \pm 0.8$ anos) e 20 atletas juniores femininos ( $18.1 \pm 0.9$ anos)	Competição	Marcha Atlética	2 Câmaras digitais (50Hz), colocadas no 6.5km; Modelo biomecânicos de 17 pontos.	12
(Kratky et al., 2016)	11 atletas (10 masculinos e 1 feminino) – ( $20.5 \pm 2.5$ anos – 17-26 anos); Marca: $11.01 \pm 0.50$ s – 10.41-12.29s.	Treino	Velocidade	– Optojump-next (Microgate, Bolzano, Italy) – colocado nos 32m aos 57m (nos 20m lançados); (Análise cinematográfica); Sistema Vicon Peak, Oxford, Reino Unido, com 16 câmaras de infravermelhos, a recolher a 400Hz (Análise cinematográfica 3D)	12
(Bezodis et al., 2018)	4 atletas masculinos (18-29 anos); Marca aos 100m: 9.98s – 10.30s).	Treino	Velocidade	Células fotoelétricas (30m + 30m) (Análise cinematográfica); 2 Câmaras digitais (50Hz); Modelo biomecânico de 20 pontos (Análise cinematográfica 2D).	11

Hz – Hertz; m – Metros; s – Segundos; CG – Centro de Gravidade; km – Quilómetro; 2D - Bidimensional; 3D - Tridimensional

Tabela 2.2: Caracterização dos parâmetros biomecânicos por amostra e por estudo, em competição, n=2

		Lançamento do Dardo		Marcha	Atlética
		M	F	M	F
<b>Parâmetros Temporais</b>					
	Tempo de contacto (s)			0,29	0,31
	Tempo de Voo (s)			0,03	0,01
	Tempo de Contacto (%)			91,60	96,40
<b>Parâmetros Cinemáticos Lineares</b>					
	Velocidade de Saída (m/s)	27,10	23,00		
	Velocidade de Passo (m/s)			13,36	11,61
	Comprimento de Passo (m)			1,16	1,01
	Frequência de Passo (Hz)			3,21	3,20
	Foot ahead (m)			0,38	0,34
	Foot behind (m)			0,44	0,43
<b>Parâmetros Cinemáticos Angulares</b>					
	Ângulo de Saída (°)	32,70	31,70		
	Ângulo de Ataque (°)	2,30	6,60		
	Rotação Pélvica (°)			15	9
	Rotação do ombro (°)			17	20
	Ângulo de distorção (°)			30	27
Ângulo do Joelho	Contacto inicial (°)			180	178
	Fase Intermédia (°)			192	192
	Contacto Final (°)			155	158
Ângulo da Anca	Contacto inicial (°)			169	167
	Contacto Final (°)			193	195
Ângulo do Tornozelo	Contacto inicial (°)			103	104
	Contacto Final (°)			129	134
Ângulo do ombro	Contacto inicial (°)			-65	-66
	Fase Intermédia (°)			-22	-25
	Contacto Final (°)			37	36
Ângulo do cotovelo	Contacto inicial (°)			80	68
	Fase Intermédia (°)			85	75
	Contacto Final (°)			71	67

M- Masculino; F- Feminino.

#### 2.4.4 Os efeitos do tipo de treino nos parâmetros biomecânicos

Estudos com diferentes tipos de treino foram implementados em atletas de elite, dois estudos indicam os efeitos do treino assistido com paraquedas em atletas de velocidade (Kratky and Müller, 2013; Kratky et al., 2016) e outro pretende analisar os efeitos da velocidade durante um plano de treino periodizado.

No treino assistido (Kratky and Müller, 2013; Kratky et al., 2016) verificou-se que os atletas que realizaram o treino assistido com velocidade normal obtiveram efeitos nos parâmetros de tempo de apoio, comprimento de passo, tempo de voo, distância ao CG e altura do CG no início e no final do contacto, nos ângulos da anca e do joelho. Quando analisado o efeito do treino assistido com supavelocidade verificou-se que os atletas melhoraram os parâmetros de frequência de passo, comprimento do passo, velocidade do passo, tempo de apoio, mas não obtiveram ganhos no tempo de voo (Tabela 2.3).

No treino periodizado (Bezodis et al., 2018) analisou-se que no total de sessões realizada 51% das sessões teve uma causa efeito no treino de velocidade, 43% teve causa efeito na frequência de passo e que 16% teve efeito no comprimento de passo (Tabela 2.3).

Tabela 2.3: Caracterização dos parâmetros biomecânicos nos estudos revistos em treino (n=3)

Tipo de Treino	Effect Size	(Kratky and Müller, 2013)*	(Kratky et al., 2016)**	(Bezodis et al., 2018)**
NS vs BWNS	NS vs BWNS	6,32		
	Frequência de Passo	0,91		
	Comprimento de Passo	0,6		
	Tempo no ar	65,68	1,58	
	Tempo de apoio	100,68	2,18	
	dCG TD		2,96	
	dCG TO		0,18	
	h TD		0,95	
	h TO		0,98	
	ângulo hip TO		1,46	
	max flex hip		1,42	
	max ext hip		0,95	
	min ang joelho		1,76	
	ang joel TO		0,97	
NS vs BWOS	NS vs BWOS	183,3		
	Frequência de Passo	11,63		
	Comprimento de Passo	24,94		
	Tempo no ar	46,18		
	Tempo de apoio	101,73		
BWNS vs BWOS	velocity	267,91		
	Frequência de Passo	11,6		
	Comprimento de Passo	31,32		
	Tempo no ar	1,65		
	Tempo de apoio	16,38		
Treino periorizado	Velocidade Passo			<1,2 (51%)***
	Frequência de Passo			<1,2 (43%)***
	Comprimento de Passo			<1,2 (16%)***

NS - Velocidade normal; BWNS - Velocidade normal com suporte do peso corporal;

BWOS - Velocidade supavelocidade com suporte do peso corporal;

\*Eta-squared; \*\*Cohen effect size; \*\*\*effect size (% das sessões de trenos com effect size <1.2;

## 2.5 Discussão de Resultados

O objetivo deste estudo foi realizar uma revisão sistemática dos métodos biomecânicos usados na avaliação de atletas de elite em treino e em competição.

### 2.5.1 Caracterização dos estudos revistos

Ao pesquisar-se estudos, considerando atletas de elite e Atletismo identificaram-se cinco estudos, indicando um número limitado de estudos. Destes, nenhum utilizou o método de análise cinética. O número de estudos apresentado pode estar relacionado na especificação da amostra, pois muitos deles não permitem a realização destes estudos no seu treino ou competição. Os atletas que permitem, pretendem uma investigação mais ecológica e que a recolha de dados seja implementada durante o seu treino ou competição.

Todos os estudos revistos utilizaram a análise cinemática, e não houve estudos com análise cinética, o que mostra uma lacuna de conhecimento destes parâmetros em situação de treino ou competição, levando à necessidade de utilizar estes métodos para compreender o comportamento das forças dos atletas no Atletismo. Entre estudos, verificou-se que a análise cinemática não foi aplicada da mesma forma. Em alguns estudos utilizaram instrumentos de medição direta (Kratky and Müller, 2013; Viitasalo et al., 2003), outros estudos utilizaram instrumentos de medição indireta (Bezodis et al., 2018; Hanley et al., 2014). Finalmente, no estudo de Kratky et al. (2016) foi realizada a análise cinemática com as duas tipologias. Na medição direta identificaram-se células fotoelétricas na obtenção da velocidade de saída do dardo (Viitasalo et al., 2003) e na obtenção da velocidade média de uma determinada distância na corrida (Bezodis et al., 2018; Kratky and Müller, 2013), bem como a utilização do sistema Optojump-next (Microgate, Bolzano, Italy, 1000Hz) na obtenção da amplitude de passo, tempo de passo e conseqüente frequência de passo (Kratky et al., 2016; Kratky and Müller, 2013). Relativamente, à medição indireta verificou-se a aplicação das câmaras digitais com uma frequência de captura de 50Hz para análise cinemática 2D (Bezodis et al., 2018) e 3D (Hanley et al., 2014). Ainda na análise cinemática 3D verificou-se a utilização de câmaras de infravermelhos (Kratky et al., 2016). Este tipo de instrumentos permitiu determinar a velocidade média do CG, a amplitude de passo, a frequência de passo e estudar o comportamento dos diferentes segmentos para o rendimento desportivo. Identifica-se uma grande variedade de instrumentos aplicados (ver Tabela 2.1), sugerindo, cuidados na comparação e análise de resultados entre os diferentes estudos, pois é necessário ter em consideração o erro de cada instrumento, quando se pretende comparar os resultados entre estudos.

### 2.5.2 Os parâmetros biomecânicos nos estudos de atletas de elite em competição

Em competição, nomeadamente no Lançamento do dardo foi identificada a influência dos parâmetros cinemáticos, da velocidade de saída, do ângulo de saída e do ângulo de ataque no rendimento desportivo dos atletas masculinos e femininos. Os resultados obtidos indicaram que a velocidade de saída teve uma associação elevada com o rendimento desportivo dos atletas do lançamento do dardo (Viitasalo et al., 2003), embora no lançamento do disco, Badura (2010) indica que 25% do resultado obtido é explicado pela velocidade de saída. Foi ainda identificado que os atletas que tiveram maior velocidade de saída, obtiveram menor ângulo de saída e os que tiveram menores velocidades de saída, obtiveram maiores ângulos de saída (Viitasalo et al., 2003), sugerindo que com o aumento do ângulo de saída, ocorre um maior gasto de energia, não permitindo aumentar a velocidade de saída.

Na Marcha Atlética foram determinados os parâmetros cinemáticos de velocidade de passo, de frequência de passo e de amplitude de passo, pois a velocidade de passo é o produto entre a amplitude de passo e a frequência de passo (Bezodis et al., 2018; Kratky et al., 2016; Kratky and Müller, 2013). A importância da

compreensão da velocidade de passo é determinante para o rendimento desportivo dos atletas, pois maiores valores de velocidade de passo, indicaram melhor rendimento desportivo, no evento da marcha atlética, no Atletismo (Hanley et al., 2014). Para além disso, identificou-se que os atletas que realizaram maiores ângulos do joelho na saída do apoio, foram os que tiveram associadas maiores de velocidade de passo, menores tempos de contacto de apoio e maiores tempos de voo (Hanley et al., 2014).

### 2.5.3 Os efeitos do tipo de treino nos parâmetros biomecânicos

A aplicação dos métodos cinemáticos têm ajudado compreender o efeito do treino (Bezodis et al., 2018; Kratky et al., 2016; Kratky and Müller, 2013). Através do planeamento do treino, foi possível compreender que o aumento do volume de treino, a velocidade de passo e a frequência de passo diminuíram, e que ambas aumentavam, em treinos de menor volume e maior intensidade. Isto sugere, também, que quando se pretende otimizar a velocidade, verifica-se um aumento da frequência de passo e não da amplitude de passo (Bezodis et al., 2018). Uma das formas de otimizar a frequência de passo é através do treino com equipamentos de apoio, pois permite otimizar o controlo neuromotor e minimizar o tempo de contacto do apoio (Kratky et al., 2016; Kratky and Müller, 2013). Compreender, mecanicamente, a influência destes equipamentos de apoio na velocidade máxima permitiu identificar que o ângulo da anca não provoca efeitos negativos na velocidade máxima, pois o deslocamento ocorre na direção do movimento (Kratky et al., 2016), a obtenção de maiores ângulos do joelho durante a fase apoio sugere que há uma maior rigidez, contribuindo para um maior desenvolvimento da taxa de produção de força (Kratky et al., 2016) e que a diminuição da distância do CG ao apoio teve uma correlação positiva com a velocidade da corrida sugerindo que ocorre uma diminuição das forças de travagem horizontais na primeira fase excêntrica do contacto do apoio com o chão (Hanley et al., 2014; Kratky et al., 2016), levando a uma diminuição do tempo de apoio e provocando grandes picos de força (Kratky et al., 2016).

## 2.6 Limitações e Perspetivas Futuras

Desde da década de 80 que são desenvolvidos relatórios técnicos que aplicam os métodos biomecânicos com o objetivo de compreender a componente técnica dos atletas envolvidos na Alta Competição do Atletismo. Estes estudos têm sido uma referência para os treinadores de Atletismo e investigadores na área da Biomecânica. Contudo, quando se pesquisaram estudos científicos que aplicassem os métodos biomecânicos em atletas de elite verificaram-se poucos estudos sugerindo a necessidade de desenvolver estudos cinéticos que apliquem os métodos biomecânicos, em atletas de elite, no Atletismo.

A aplicação de diferentes instrumentos no estudo das diferentes técnicas do Atletismo, tem relacionado informação mais detalhada, métodos mais complexos e obtenção de resultados mais morosos, ou informação mais simples, não tão detalhada, métodos mais simples e obtenção de resultados mais rápida. No entanto, esta diversidade de instrumentos de medição utilizada na análise dos atletas, tem levado a estudos de validação, indicando que deve haver cuidados na análise dos resultados obtidos.

A pouca evolução dos instrumentos, principalmente, na obtenção dos dados instantâneos, em tempo real e de preferência adaptável em qualquer evento do Atletismo, competição e treino, sugere o surgimento de um instrumento que permita quantificar os parâmetros biomecânicos de forma contínua e em tempo-real. O mesmo deve ser aplicável em treino e em competição para permitir a comparação de resultados, assegurando o mesmo tipo de erro. Para além disso, o instrumento de ser validado e aplicado nas diferentes tarefas do Atletismo.

## 2.7 Conclusões

Com este estudo foi possível identificar os métodos biomecânicos utilizados, os instrumentos envolvidos e os parâmetros calculados, e como compreender o rendimento desportivo dos atletas de elite no Atletismo. Os cinco estudos obtidos identificam a necessidade de realizar mais estudos científicos que envolvam atletas de elite do Atletismo. Apenas foram encontrados estudos com análise cinemática, o que indica a necessidade na realização de estudos de análise cinética, de modo a compreender o comportamento das forças nos atletas e na performance das técnicas envolvidas. A realização de estudos com este tipo de amostra em competição e em treino deve manter-se. Uma vez que há muitos instrumentos envolvidos nestes tipos de análise, como células fotoelétricas, um sistema *Optojump-next* e câmaras digitais e de infravermelhos, deve ser dada especial atenção à necessidade de otimizar a utilização destes instrumentos, bem como a desenvolver métodos tecnologicamente avançados que permitam um menor gasto de tempo e recursos para obtenção dos mesmos parâmetros. Em todos os estudos revistos, a velocidade foi identificada como um parâmetro essencial a estudar, no entanto, tendo a sua origem em diversos instrumentos, deve haver o cuidado quando se comparam os resultados obtidos, considerar o erro associado a cada instrumento.

## 2.8 Referências Bibliográficas

- Badura, M. (2010). Biomechanical analysis of the discus at the 2009 IAAF World Championships in athletics. *New Studies in Athletics*, 25(3/4):23–35.
- Bennett, T., Walker, J., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Discus Throw and Javelin Throw. Technical report, IAAF.
- Bento, T. (2014). Revisões sistemáticas em desporto e saúde: Orientações para o planeamento, elaboração, redação e avaliação.
- Bezodis, I. N., Kerwin, D. G., Cooper, S.-M., and Salo, A. I. T. (2018). Sprint Running Performance and Technique Changes in Athletes During Periodized Training: An Elite Training Group Case Study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(6):755–762.
- Bissas, A., Walker, J., Tucker, C., Paradisis, G. P., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: 100m. Technical report, IAAF.
- Brüggemann, G.-P., Susanka, P., Bosco, C., Glad, B., and Hommel, H. (1987). Scientific Report on the II World Championships in Athletics Rome, 1987. Technical report, IAAF, Rome.
- Costa, M. J., Balasekaran, G., Vilas-Boas, J. P., and Barbosa, T. M. (2015). Physiological adaptations to training in competitive swimming: A systematic review. *Journal of Human Kinetics*, 49(1):179–194.
- Dinsdale, A., Thomas, A., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Hammer Throw and Shot Put Throw. Technical report.
- Downs, S. H. and Black, N. (1998). The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. *Journal Epidemiol Community Health*, 52:377–384.
- Feitosa, W. G., Correia, R. D. A., Barbosa, T. M., and Castro, F. d. S. (2019). Performance of disabled swimmers in protocols or tests and competitions : a systematic review and meta-analysis. *Sports Biomechanics*, 00(00):1–23.
- Gravestock, H., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Pole Vault. Technical report, IAAF.
- Guex, K. (2012). Kinematic Analysis of the Women's 400m Hurdles. *New Studies in Athletics*, 27(1/2):41–51.
- Hanley, B., Bissas, A., and Drake, A. (2014). Technical characteristics of elite junior men and women race walkers. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 54(6):700–707.
- Hanley, B., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Middle Distance, Long Distance and Marathon. Technical report, IAAF.
- Hanley, B., Drake, A., and Bissas, A. (2008). The biomechanics of elite race walking: technique analysis and the effects of fatigue. *New Studies in Athletics*, 23(4):17–25.
- IAAF (2017). Largest ever biomechanics research project in athletics to be undertaken at IAAF World Championships London 2017.
- Kratky, S., Buchecker, M., Pfusterschmied, J., Szekely, C., and Müller, E. (2016). Effects of a Body-Weight Supporting Kite on Sprint Running Kinematics in Well-Trained Sprinters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(1).

- Kratky, S. and Müller, E. (2013). Sprint Running With a Body-Weight Supporting Kite Reduces Ground Contact Time in Well-Trained Sprinters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(5).
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., and Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *PLoS medicine*, 6(7):e1000100–e1000100.
- Macadam, P., Cronin, J. B., and Feser, E. H. (2019). Acute and longitudinal effects of weighted vest training on sprint-running performance: a systematic review. *Sports Biomechanics*, 00(00):1–16.
- Moens, M., Goudman, L., Brouns, R., Valenzuela Espinoza, A., De Jaeger, M., Huysmans, E., Putman, K., and Verlooy, J. (2019). Return to Work of Patients Treated With Spinal Cord Stimulation for Chronic Pain: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Neuromodulation*, 22(3):253–261.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., and Group, T. P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLOS Medicine*, 6(7):e1000097.
- Nicholson, G., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: High Jump. Technical report, IAAF.
- Panoutsakopoulos, V., Theodorou, A. S., and Papaiakevou, G. I. (2017). Gender differences in the preparation for take-off in elite long jumpers. *Acta Gymnica*, 47(2):84–91.
- Pollitt, L., Bissas, A., and Merlino, S. (2017a). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: 4x100m. Technical report, IAAF.
- Pollitt, L., Walker, J., Bissas, A., and Merlino, S. (2017b). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: 100m Hurdles and 110m Hurdles. Technical report, IAAF.
- Pollitt, L., Walker, J., Tucker, C., Bissas, A., and Merlino, S. (2017c). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: 200m and 400m. Technical report, IAAF.
- Susanka, P. (1986). The IAAF - Top-Competition programme and its practical coaching applications. *New Studies in Athletics (NSA)*, 4:27–31.
- Tucker, C., Nicholson, G., Cooke, M., Bissas, A., and Merlino, S. (2017). Biomechanical Report IAAF World Championships London 2017: Long Jump and Triple Jump. Technical report, IAAF.
- Viitasalo, J., Mononen, H., and Norvapalo, K. (2003). Athletics: Release parameters at the foul line and the official result in javelin throwing. *Sports Biomechanics*, 2(1):15–34.



# 3

Desenvolvimento de uma Unidade de  
Medição Inercial sem fios para  
capturar parâmetros cinemáticos e  
cinético de atletas de elite, no  
Atletismo

### 3.1 Resumo

Introdução: Diversos instrumentos foram utilizados na medição de atletas em treino e em competição, no entanto, a necessidade de ter instrumentos com informação imediata, não evasiva no atleta e que possa obter diversos parâmetros cinemáticos e cinéticos têm sido desenvolvidos graças à evolução tecnológica. As IMUs são equipamentos que podem ser de baixo custo, de baixo consumo e com obtenção de resultados em tempo-real, desta forma, o objetivo deste estudo foi desenvolver uma IMU para capturar parâmetros cinemáticos e a partir destes determinar parâmetros cinéticos dos atletas de elite, no Atletismo e selecionar os algoritmos de processamento de sinal.

Métodos: Os algoritmos apresentados têm como objetivo remover a aceleração da gravidade da aceleração obtida com a IMU. De seguida, foram determinados os parâmetros cinemáticos e cinéticos. Foram aplicados filtros digitais aos dados obtidos, em que a frequência de corte e a amplitude foram definidas através da análise da potência espectral.

Resultados: Foi possível desenvolver um instrumento sem fios que permitisse obter parâmetros cinemáticos e cinéticos, em tempo real. Estes parâmetros foram selecionados considerando a orientação do sensor e a aceleração gravítica, utilizando a noção dos *quaternions*. Os dados foram suavizados através de um filtro digital *butterworth*. Os resultados obtidos permitiram identificar padrões bem reconhecidos em estudos científicos, como por exemplo no salto de contramovimento (CMJ).

Conclusões: Este estudo permitiu desenvolver um instrumento de pequenas dimensões, sem fios, de baixo custo, de baixo consumo e através do qual foi possível obter a aceleração e através dos algoritmos propostos determinar parâmetros cinemáticos e cinéticos, em tempo-real. Este estudo indica, ainda, a necessidade de validar e aplicar estes instrumentos, nas diversas tarefas desportivas.

**Palavras-chaves:** Desenvolvimento; IMU; Cinemática; e Cinética

## 3.2 Introdução

Para alcançar o sucesso, os treinadores necessitam de ganhar vantagem competitiva face ao adversário (Hood et al., 2012) e os avanços tecnológicos têm permitido quantificar o rendimento desportivo (Hood et al., 2012; Li et al., 2016). No desporto, a biomecânica tem estudado e analisado, entre outras, o padrão do movimento humano dos gestos técnicos (Bartlett and Bussey, 2012; Hood et al., 2012) e tem sido uma área que tem associado um conjunto de instrumentos e métodos que estão a evoluir ao longo dos anos (Robertson et al., 2013).

O padrão do movimento pode ser descrito de forma qualitativa e quantitativa, através da implementação de vários instrumentos que têm métodos específicos associados. A videografia é um dos métodos mais antigos e quando aplicado na análise do movimento humano permite obter, descrever e quantificar um padrão de movimento de forma detalhada (Hood et al., 2012). Na análise quantitativa aplicaram o método cinemático tridimensional (3D), através de duas câmaras e analisou os atletas masculinos e femininos do lançamento do martelo no Campeonato do Mundo de 2009, onde identificaram que para lançar o martelo a uma maior distância, é necessária uma maior velocidade de saída e de um ângulo ótimo de saída (Isele and Nixdorf, 2011). A videografia tem permitido obter informação relevante ao longo dos anos, mas o tempo de tratamento de dados associado ainda é elevado e cada vez mais o treinador procura instrumentos e métodos que lhe permita uma comunicação imediata. Para além da videografia, existem instrumentos que permitem quantificar outro tipo de parâmetros, nomeadamente os cinéticos, tal como, a plataforma de força. Hanley and Bissas (2012) tiveram como objetivo analisar as assimetrias de atletas de Marcha Atlética em laboratório e identificaram que os atletas da Marcha Atlética realizam menor pico de força no chão quando comparados os impactos com corredores de fundo. Verificaram, também, pequenas diferenças entre os membros inferiores quando analisadas as forças verticais de reação do apoio dos atletas. A plataforma de força permite obter informação detalhada, mas em ambiente controlado, não possibilitando o atleta de realizar o movimento em ambiente natural.

Outros instrumentos têm sido aplicados, tal como Medidor de Deslocamento a Laser (Radar), que permite medir a velocidade, através de laser e analisar dados em competições de Atletismo (Dickwach et al., 1994; Pinto and Oliveira, 2018). Dickwach et al. (1994) determinaram os valores temporais em diversas corridas de balanço nos saltos horizontais e obtiveram, com precisão, o tempo dos cinco metros antes da tábua de chamada. O tratamento de dados indicou que ao aplicarem métodos de suavização de dados adequados, é possível obter informação sobre o número de passos realizados durante as corridas realizadas. Em estudos não publicados pela equipa de investigação identificaram as mesmas vantagens e o mesmo tipo de parâmetros. Obter detalhadamente a informação da corrida ajuda o treinador a compreender melhor o rendimento do atleta, no entanto, este processo apresentou algumas limitações, como por exemplo, o alcance ótico lateral do instrumento, isto é, não alcança o atleta, ou capta dados de um outro segmento (e.g. braço) tornando-se necessário aplicar métodos de interpolação e de suavização, que nestes casos alteram a informação obtida, podendo indicar uma informação errada ao treinador.

Sensores sem fios e portáteis têm beneficiado da exposição média e comercial como uma ferramenta efetiva para medir a atividade física em toda a população (Chambers et al., 2015; Li et al., 2016; Bailey and Harle, 2016). A aplicação deste tipo de instrumentos foi aumentando, pela disponibilidade, baixo custo e pelos avanços dos portáteis, tablets, telemóveis ou relógios inteligentes (Li et al., 2016; Setuain et al., 2018). Os instrumentos disponíveis para ser comercializados contém micros sensores, que incluem acelerómetros, giroscópios e magnetómetros, denominando de Unidades de Medição Inercial (IMU) (Chambers et al., 2015), em que o termo "inercial" é usado porque ambos os sensores exploraram os conceitos da Inércia, para fornecer velocidades angulares e acelerações (Camomilla et al., 2018). O acelerómetro, o giroscópio e o magnetómetro têm características tridimensionais, em que obtêm a soma de acelerações lineares gravitacionais e inerciais, quantificam as velocidades angulares e determinam as componentes vetoriais do

campo magnético local, respetivamente (Camomilla et al., 2018). Este dados obtidos através das IMUs têm permitido obter dados ricos, e prevê-se a obtenção de parâmetros de rendimento de desportivo relevantes (Bailey and Harle, 2016), no ambiente natural do atleta, sem restrições, diariamente e em tempo real (Camomilla et al., 2018; MacDonald et al., 2017; Bailey and Harle, 2016; Setuain et al., 2018; Wixted et al., 2010). Marsland et al. (2015) utilizaram um micro sensor para determinar parâmetros cinemáticos num treino de Ski e identificou que a IMU permite quantificar parâmetros cinemáticos e detetar diferentes técnicas clássicas realizadas no Ski. Em suma, a implementação da IMU pode tornar a monitorização do atleta sistemática, com o objetivo de reabilitar a lesão desportiva, no desenvolvimento de estudos biomecânicos longitudinais (Bailey and Harle, 2016) e na otimização do rendimento desportivo. Na procura de fornecer parâmetros cinemáticos e cinéticos, em tempo real, através de um instrumento de baixo custo e com dimensões atrativas para atletas e treinadores. As seguintes questões foram levantadas: “Será possível desenvolver uma IMU de baixo custo?”; “Será possível aplicar a IMU em treino e em competição, de atletas de elite, no Atletismo?”; “É possível obter parâmetros cinemáticos e cinéticos?”; e “Em tempo-real?”. O objetivo deste estudo foi desenvolver uma IMU para capturar parâmetros cinemáticos e cinéticos dos atletas de elite, do Atletismo, bem como no desenvolvimento dos algoritmos associados.

### 3.3 Desenho do Instrumento sem Fios

Os sistemas micro eletromecânicos (MEMS) (Figura 3.1) permitiram o desenvolvimento de sensores de giroscópio, de acelerómetro e de magnetómetro altamente miniaturizados, com custo relativamente baixo e de baixo consumo (Camomilla et al., 2018).



Figura 3.1: Exemplo do MEMS utilizado no estudo. Fonte: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/icm-20948/>

#### 3.3.1 Composição de componentes para o instrumento proposto

O MEMS proposto que integra a IMU (Figura 3.2 – 4b) é de baixa potência, com uma alta frequência de amostragem (>200Hz) e de dimensões relativamente pequenas (28mm (comprimento) x 27mm (largura) x 5.8mm (espessura)). A IMU é constituída por um acelerómetro tridimensional, um giroscópio tridimensional e um magnetómetro tridimensional que permite obter diretamente os dados de aceleração e indiretamente obter os restantes dados cinemáticos e cinéticos. Este micro sensor está inserido num instrumento constituído por resistências (Figura 3.2 – 1a a 1s) para divisores de tensão ou resistências de carga e por condensadores cerâmicos (Figura 3.2 – 2a a 2p) para desacoplamento e filtro de sinal. Foi usado, também, um diódo de *Shottky* (Figura 3.2 – 6a) utilizado no circuito de alimentação e um circuito integrado que converte os sinais da UART do microprocessador para USB (Figura 3.2 – 4a). Os transístores (Figura 3.2 – 5a e 5b), foram designados para permitirem colocar o microprocessador em modo de programação.

Um conversor DC/DC (Figura 3.2 – 3a) para converter a tensão de entrada (5VDC) na tensão utilizada na placa (3.3VDC) foi considerado, bem como um integrado de controlo da carga da bateria (Figura 3.2 – 3c) e um conector para a bateria (Figura 3.2 – 8a), com o objetivo de tornar o instrumento autónomo. Os LEDs (Figura 3.2 – 6b, 6c e 6d) inseridos têm o objetivo de realizar o diagnóstico ao invento e o fusível *resettable* de proteção do circuito de alimentação (Figura 3.2 – 7a). Ainda é constituído por uma saída USB para carregar e realizar transmissão de dados (Figura 3.2 – 8c). Enquanto, os três interruptores indicados tiveram a função de um genérico que funcionará como diagnóstico da placa (Figura 3.2 – 9a), um que permite fazer *reset* à placa (Figura 3.2 – 9b) e outro que permite ligar e desligar a placa (Figura 3.2 – 9c). Por último, foi sugerido um microprocessador (Figura 3.2 – 3e) com um módulo programável para definir os dados a receber pela IMU e que os transmite via wireless. A transmissão de dados é feita através de um protocolo UDP para realizar uma taxa de transferência mais alta e transmitir mais dados em menos tempo. Este componente permite, também, realizar a interface entre o invento e um tablet, portátil ou telemóvel, visualizando os parâmetros a estudar em tempo real.

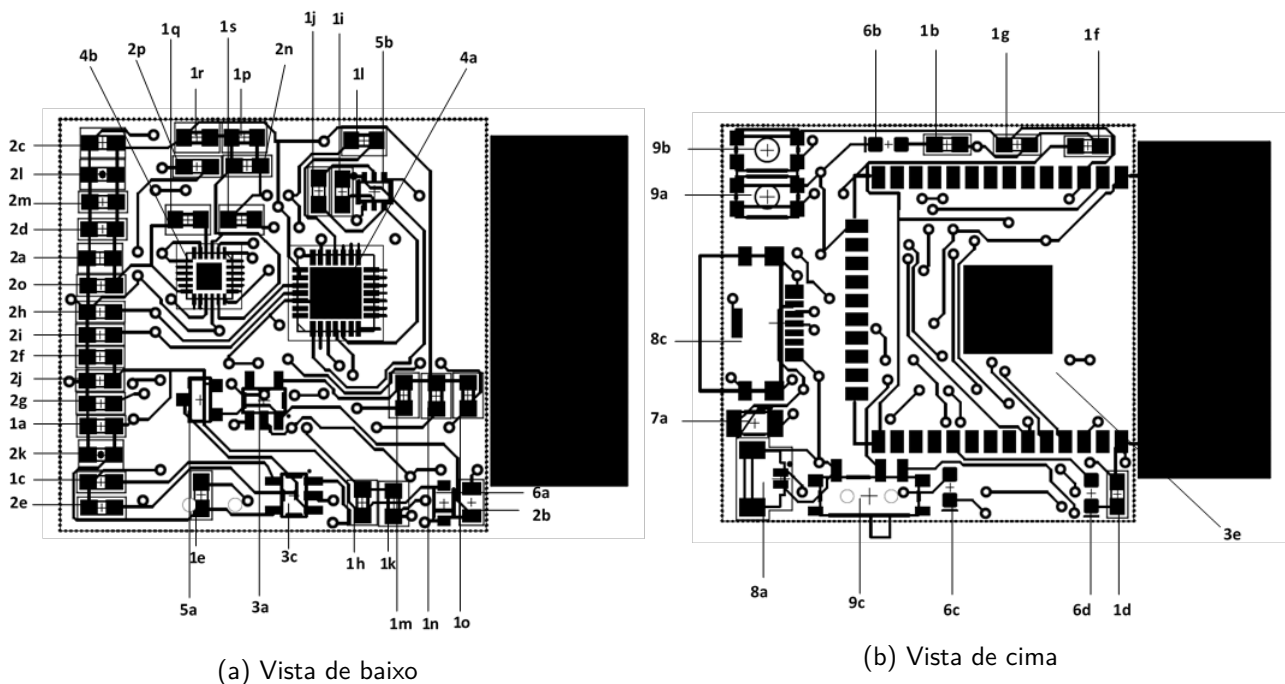


Figura 3.2: Composição e distribuição dos componentes para o instrumento proposto

## 3.4 Métodos

Os dados obtidos pelo instrumento proposto, a soma de acelerações lineares gravitacionais e inerciais, as velocidades angulares e as componentes vetoriais do campo magnético local (Camomilla et al., 2018) são capturados a uma taxa de frequência de captura máxima, de 275Hz.

### 3.4.1 Tratamento de Dados

A biomecânica aplicada ao desporto tem estudado e analisado o padrão do movimento humano, no desporto (Bartlett and Bussey, 2012; Hood et al., 2012). Na necessidade de uniformizar a linguagem na análise do movimento humano foi adotado o sistema de coordenadas global e local definido pela Sociedade Internacional de Biomecânica (ISB) (Wu and Cavanagh, 1995). Este sistema de coordenadas consiste no

num eixo de coordenadas, onde o Y define o eixo longitudinal, o X é eixo ântero-posterior e Z define o eixo médio-lateral (Wu and Cavanagh, 1995).

### 3.4.2 Algoritmos

A aceleração obtida através do acelerómetro da IMU considera a gravidade e não considera a posição do sensor, pelo que houve a necessidade de aplicar algoritmos para remover a aceleração da gravidade, da aceleração provocada pelo movimento, a partir da orientação do sensor (Camomilla et al., 2018; Wang et al., 2015; Yi et al., 2018). A IMU através do acelerómetro obtêm a soma de acelerações lineares gravitacionais e inerciais e é identificada pela equação 3.1; do giroscópio, as velocidades angulares, através da equação 3.2; e do magnetómetro as componentes vetoriais do campo magnético local, pela equação 3.3); (Camomilla et al., 2018).

$$a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} [m/s^2] \quad (3.1)$$

$$g = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} [rad/s] \quad (3.2)$$

$$m = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} [T] \quad (3.3)$$

Os *quaternions* permitem obter a orientação relativa do sensor (Wang et al., 2015; Yi et al., 2018) e são definidos por quatro parâmetros (Yun et al., 2008). A equação 3.4 define a integral dos dados obtidos pelo giroscópio. Cada um dos parâmetros dos *quaternions* foram determinados pelas seguintes equações (3.5), (3.6), (3.7) e (3.8).

$$a = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} [rad] \quad (3.4)$$

$$Q_w = \cos(\alpha/2) \cdot \cos(\beta/2) \cdot \cos(\gamma/2) + \sin(\alpha/2) \cdot \sin(\beta/2) \cdot \sin(\gamma/2) \quad (3.5)$$

$$Q_x = \sin(\alpha/2) \cdot \cos(\beta/2) \cdot \cos(\gamma/2) - \cos(\alpha/2) \cdot \sin(\beta/2) \cdot \sin(\gamma/2) \quad (3.6)$$

$$Q_y = \cos(\alpha/2) \cdot \sin(\beta/2) \cdot \cos(\gamma/2) + \sin(\alpha/2) \cdot \cos(\beta/2) \cdot \sin(\gamma/2) \quad (3.7)$$

$$Q_z = \cos(\alpha/2) \cdot \cos(\beta/2) \cdot \sin(\gamma/2) - \sin(\alpha/2) \cdot \sin(\beta/2) \cdot \cos(\gamma/2) \quad (3.8)$$

As equações anteriores foram utilizadas para determinar a matriz rotação (equação 3.9). O passo seguinte foi determinar a aceleração, removendo a gravidade da aceleração obtida diretamente da IMU (equação

3.10), onde  $g$  é a aceleração gravítica cujo valor foi  $9.806 \text{ m/s}^2$ , à latitude medida. Para os restantes parâmetros cinemáticos, a determinação da velocidade foi sugerida através da integral da aceleração a velocidade foi obtida pela equação (3.11), enquanto a posição foi determinada pela equação (3.12) (Camomilla et al., 2018).

$$Rot = \begin{bmatrix} q^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 & 2 \cdot (q_x q_y - q q_z) & 2 \cdot (q_x q_z + q q_y) \\ 2 \cdot (q_x q_y + q q_z) & q^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2 & 2 \cdot (q_y q_z - q q_x) \\ 2 \cdot (q_x q_z - q q_y) & 2 \cdot (q_y q_z + q q_x) & q^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$a_{correct} = \begin{bmatrix} a_x - g \cdot Rot \\ a_y - g \cdot Rot \\ a_z - g \cdot Rot \end{bmatrix} [m/s^2] \quad (3.10)$$

$$v = v_0 + \int_{t_0}^t a_{correct} dt [m/s] \quad (3.11)$$

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t v dt [m] \quad (3.12)$$

Os parâmetros cinéticos foram determinados através da 2ª Lei de Newton (equação (3.13)), onde  $BM$  é a massa corporal em quilogramas [Kg] do sujeito e  $BW$  é o peso do sujeito em Newtons [N].

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xcorrect} \cdot BM \\ a_{ycorrect} \cdot BM + BW \\ a_{zcorrect} \cdot BM \end{bmatrix} [N] \quad (3.13)$$

### 3.4.3 Filtro aplicado

Os parâmetros foram suavizados através de um filtro digital *Butterworth* passa baixo (Nielsen et al., 2019). A seleção da frequência de corte foi realizada de acordo com Winter A. (2005), onde foi analisada a potência do sinal em cada uma das componentes, para tomar a decisão de qual a potência a aceitar ou rejeitar. Para complementar o método, foi aplicada uma análise residual da diferença entre os filtros suavizados e não suavizados em uma ampla gama de frequência de corte.

### 3.4.4 Posições de aplicação sugeridas

Após o desenvolvimento do instrumento e a definição dos algoritmos a aplicar foram propostas diversas zonas de colocação da IMU que permitissem uma versátil aplicação, tendo em conta os diversos eventos do Atletismo. No Calcâneo (Figura 3.3a) (Camomilla et al., 2018; Giandolini et al., 2014), pela proximidade com chão e com o objetivo de obter as acelerações mais próximas do solo. Na zona intermédia entre a apófise estilóide ulnar e a apófise estilóide radial, designada de punho (Figura 3.3b) (Camomilla et al., 2018; Wright and Stager, 2013), com o objetivo de analisar movimentos que ocorram com os membros superiores. Para definir a zona teórica do Centro de Gravidade (CG), foram propostas três zonas, uma no ponto de referência da apófise espinhosa da 5ª vertebra lombar (L5) (CG1) (Figura 3.3c) (Camomilla et al., 2018; Nielsen et al., 2019), outra no externo (CG2) (Figura 3.3d) (Camomilla et al., 2018; Vales-Alonso

et al., 2015) e por último, na cicatriz umbilical (CG3) (Figura 3.3e) (Camomilla et al., 2018).

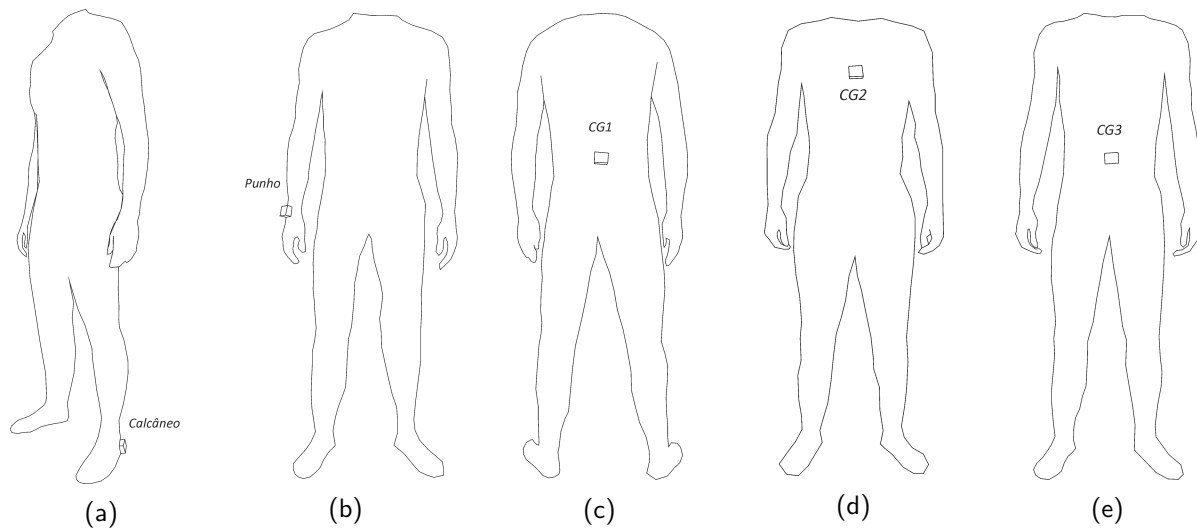
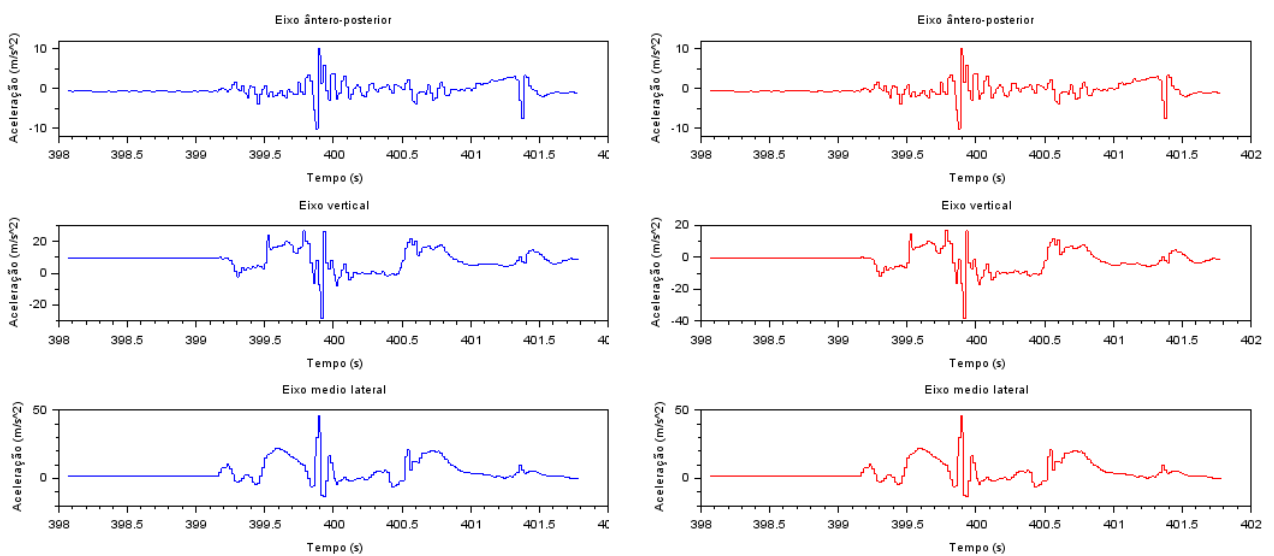


Figura 3.3: Propostas de colocação da Unidade de Medição Inercial no atleta

### 3.5 Resultados

A aceleração obtida através da IMU (Figura 3.4a) e removida através dos conceitos apresentados na metodologia estão representados na Figura 3.4a. A aceleração gravítica manifesta-se no eixo vertical (Figura 3.4), desta forma quando ocorre a remoção da gravidade, verifica-se nesse eixo, um deslocamento da curva para zero (Figura 3.4b), após a aplicação do algoritmo proposto (equação 3.10).



(a) Aceleração obtida diretamente da IMU

(b) Aceleração obtida através da remoção da gravidade

Figura 3.4: Parâmetro cinemático - Aceleração

A proposta de suavização considerou a análise da potência espectral para definir a frequência de corte do filtro passa baixo e a Figura 3.5 representa as diferenças entre os sinais.

Existem tarefas motoras que estão muito bem descritas na literatura, uma delas é o salto de contramo-



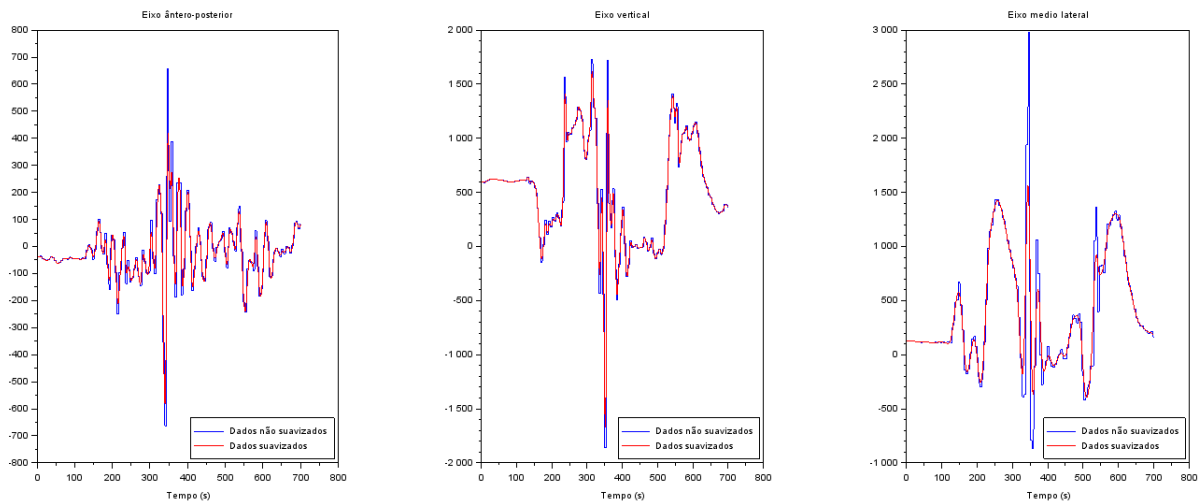


Figura 3.5: Sinal não suavizado e sinal após aplicação do filtro

vimento (CMJ) (e.g. (Dowling and Vamos, 1993; Jidovtseff et al., 2014; Toumi et al., 2004), após a aplicação do dispositivo no local CG1 foi possível identificar-se padrões idênticos com os obtidos através de uma plataforma de força (Figura 3.6).

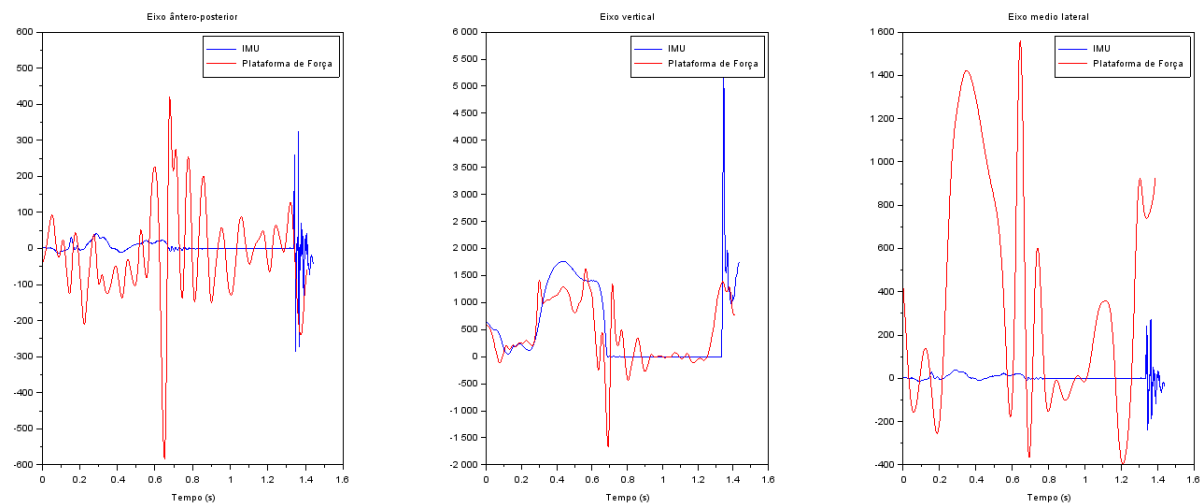


Figura 3.6: Sinal obtido pela Unidade de Medição Inercial e pela Plataforma de Força

### 3.6 Discussão

O objetivo principal deste estudo foi desenvolver um instrumento que englobasse uma IMU que recolhe a aceleração e a partir de algoritmos propostos é possível determinar parâmetros cinemáticos e os parâmetros cinéticos, importantes no estudo do movimento, em tempo real. Ainda foi possível obter parâmetros provenientes de uma IMU de baixa potência para um maior tempo de utilização no terreno, devido a um maior aproveitamento da bateria e a uma alta taxa de frequência de captura que permite obter uma

informação mais detalhada dos movimentos balísticos realizados pelos atletas, de Atletismo.

Para o desenvolvimento da IMU foi necessário um conjunto de componentes eletrônicos e realizar a montagem dos mesmos, a um custo inferior a 100€, por unidade. Este custo pode reduzir, se o número de unidades a desenvolver aumentar. A IMU desenvolvida apresenta dimensões, relativamente, pequenas (28mm (comprimento) x 27mm (largura) x 5.8mm (espessura)), tornando-o atrativo, de fácil aplicação e cómodo sugerindo a aplicação da IMU em treino e em competição com o objetivo de monitorizar os atletas regularmente em treino e em competição.

Os algoritmos propostos consideraram a remoção da gravidade da aceleração e tal como analisado, esta manifesta-se no vetor vertical da IMU (Figura 3.4). Teoricamente, esta remoção poderia ser feita pela subtração da gravidade nos dados inicialmente obtidos, no entanto, a complexidade dos dados inerciais estão associados pelo não conhecimento da orientação da IMU. Desta forma, foi proposta a aplicação dos *quaternions* (equação 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8), possibilitando realizar a remoção da aceleração gravítica (Wang et al., 2015; Yi et al., 2018).

A obtenção de parâmetros cinemáticos e cinéticos foi um objetivo no desenvolvimento deste instrumento. Através do sensor foi possível obter a aceleração diretamente do instrumento proposto, considerando a gravidade e a orientação do sensor. A força, determinada através das Leis de Newton (Figura 3.6), verificou que o sinal da IMU e das plataformas de força (FPs) têm padrões similares, principalmente na força manifestada na componente vertical (Figura 3.6). As forças que se manifestam no eixo ântero-posterior e no eixo médio-lateral verificaram maior variância, estes valores podem estar associado à colocação do sensor na zona lombar e à sensibilidade do mesmo e assim, detetar mais oscilações que na FP (Figura 3.6). Além de ser possível obter parâmetros cinemáticos e cinéticos, o programa desenvolvido permitiu obter e visualizar os dados em tempo real.

### 3.7 Conclusões

O estudo permitiu o desenvolvimento de uma IMU. Foi possível, também, realizar a remoção da aceleração gravítica através dos algoritmos propostos. Desta forma é possível determinar a aceleração e aferir parâmetros cinemáticos e cinéticos. Neste sentido, também foi identificado um padrão de curvas semelhante entre o sinal obtido pela IMU e os caracterizados na literatura.

A proposta de instrumento apresenta dimensões pequenas, de baixo custo, de baixos consumos, uma frequência de captura elevada e com obtenção de dados em tempo real, o que nos indica que pode ser uma alternativa de avaliação biomecânica disponível para a atletas e treinadores de alto rendimento.

### 3.8 Referências Bibliográficas

- Bailey, G. P. and Harle, R. k. (2016). A Portable, Inexpensive Point-Tracking System for Validation of Wearable Biomechanics Sensors. *Proceedings of the 4th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support, (icSPORTS)*:115–123.
- Bartlett, R. and Bussey, M. (2012). *Sports Biomechanics: - Reducing injury risk and improving sports performance*. Routledge, 2nd edition.
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., and Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors (Switzerland)*, 18(3).
- Chambers, R., Gabbett, T. J., Cole, M. H., and Beard, A. (2015). The Use of Wearable Microsensors to Quantify Sport-Specific Movements. *Sports Medicine*, 45(7):1065–1081.
- Choo, C. W. (2006). *The Knowing Organization: How Organizations Use Information to Construct Meaning, Create Knowledge, and Make Decisions*. Oxford University Press, Inc, New York, 2<sup>a</sup> edition.
- Dickwach, H., Hildebrand, F., and Perlt, B. (1994). A laser velocity measuring device. *New Studies in Athletics (NSA)*, 9(4):31–40.
- Dowling, J. J. and Vamos, L. (1993). Identification of Kinetic and Temporal Factors Related to Vertical jump Performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 9:95–110.
- Giandolini, M., Poupard, T., Gimenez, P., Horvais, N., Millet, G. Y., Morin, J.-B., and Samozino, P. (2014). A simple field method to identify foot strike pattern during running. *Journal of Biomechanics*, 47(7):1588–1593.
- Hanley, B. and Bissas, A. (2012). Biomechanical Analysis of Leg Asymmetry in Young International Race Walkers.
- Hood, S., McBain, T., Portas, M., and Spears, L. (2012). Measurement in sports biomechanics. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 45(6):182–186.
- Isele, R. and Nixdorf, E. (2011). Biomechanical Analysis of the Hammer Throw at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics*, 26(3):19–53.
- Jidovtseff, B., Quievre, J., Harris, N. K., and Cronin, J. B. (2014). Influence of jumping strategy on kinetic and kinematic variables. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 54(2):129–138.
- Li, R. T., Kling, S. R., Salata, M. J., Cupp, S. A., Sheehan, J., and Voos, J. E. (2016). Wearable Performance Devices in Sports Medicine. *Sports Health*, 8(1):74–78.
- MacDonald, K., Bahr, R., Baltich, J., Whittaker, J. L., and Meeuwisse, W. H. (2017). Validation of an inertial measurement unit for the measurement of jump count and height. *Physical Therapy in Sport*, 25:15–19.
- Marsland, F., Mackintosh, C., Anson, J., Lyons, K., Waddington, G., and Chapman, D. W. (2015). Using micro-sensor data to quantify macro kinematics of classical cross-country skiing during on-snow training. *Sports Biomechanics*, 14(4):435–447.
- Nielsen, E. T., Jørgensen, P. B., Mechlenburg, I., and Sørensen, H. (2019). Validation of an inertial measurement unit to determine countermovement jump height. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 16:8–13.

- Pinto, P. and Oliveira, P. (2018). As diferentes velocidades do salto com vara. *Anuário do treino desportivo*, pages 191–200.
- Robertson, D. G. E., Caldwell, G. E., Hamill, J., Kamen, G., and Whittlesey, S. N. (2013). *Research Methods in Biomechanics*. Human Kinetics, 2<sup>a</sup> edition edition.
- Setuain, I., Lecumberri, P., Ahtiainen, J. P., Mero, A. A., Häkkinen, K., and Izquierdo, M. (2018). Sprint mechanics evaluation using inertial sensor-based technology: A laboratory validation study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(2):463–472.
- Toumi, H., Best, T. M., Martin, A., F'Guyer, S., and Poumarat, G. (2004). Effects of eccentric phase velocity of plyometric training on the vertical jump. *International Journal of Sports Medicine*, 25(5):391–398.
- Vales-Alonso, J., Chaves-Diéguez, D., López-Matencio, P., Alcaraz, J. J., Parrado-García, F. J., and González-Castaño, F. J. (2015). SAETA: A Smart Coaching Assistant for Professional Volleyball Training. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 45(8):1138–1150.
- Wang, L., Zhang, Z., and Sun, P. (2015). Quaternion-Based Kalman Filter for AHRS Using an Adaptive-Step Gradient Descent Algorithm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(9):1–12.
- Winter A., D. (2005). *Biomechanics and motor control of human movement*. 3rd edition.
- Wixted, A. J., Billing, D. C., and James, D. A. (2010). Validation of trunk mounted inertial sensors for analysing running biomechanics under field conditions, using synchronously collected foot contact data. *Sports Engineering*, 12(4):207–212.
- Wright, B. V. and Stager, J. M. (2013). Quantifying competitive swim training using accelerometer-based activity monitors. *Sports Engineering*, 16(3):155–164.
- Wu, G. and Cavanagh, P. R. (1995). ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, 28(10):1257–1261.
- Yi, C., Ma, J., Guo, H., Han, J., Gao, H., Jiang, F., and Yang, C. (2018). Estimating three-dimensional body orientation based on an improved complementary filter for human motion tracking. *Sensors (Switzerland)*, 18(11).
- Yun, X., Bachmann, E. R., and McGhee, R. B. (2008). A simplified quaternion-based algorithm for orientation estimation from earth gravity and magnetic field measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(3):638–650.

# 4

Validação de uma IMU na  
determinação de parâmetros  
cinemáticos e cinéticos no CMJ, em  
atletas de elite, no Atletismo

## 4.1 Resumo

Introdução: No desporto, os CMJs têm permitido os treinadores otimizar o rendimento desportivo dos atletas. A aplicação das IMUs para quantificar parâmetros biomecânicos no CMJ tem sido pouco estudada. O objetivo deste estudo foi determinar a validade critério dos parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos obtidos por uma IMU, tendo como critério de referência a FP.

Métodos: Oito atletas elite (seis masculinos e dois femininos;  $26 \pm 3,61$  anos) realizaram o salto de CMJ com a IMU colocada na zona da apófise espinhosa L5 e na zona do calcâneo, tendo como referência a FP e foram considerados parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos. Foram realizados os testes estatísticos, *T Students*, a análise de *Bland-Altman* e a correlação de *Pearson* e *Spearman*.

Resultados: Os resultados indicaram validade critério para o tempo de voo e para a altura de salto, determinada através da equação da trajetória aérea do corpo livre, para a IMU colocada tanto na zona L5, como na zona do calcâneo, quando comparados os resultados com o *golden standard*. Na IMU colocada na superfície e na zona L5 obteve uma associação e diferenças significativas para os parâmetros de velocidade, aceleração e força, indicando um valor absoluto diferente, mas de amplitude igual. Na IMU colocada na zona do calcâneo obteve valores absolutos mais próximos com o *golden standard*, associado à sua proximidade com a FP.

Conclusões: Este estudo permitiu validar a IMU para o tempo de voo e respetiva, altura de salto, tal como compreender que é possível estudar parâmetros cinemáticos e cinéticos aumentando a informação obtida aquando é estudado o CMJ através de IMUs.

**Palavras-chaves:** Validação; Sensores; CMJ; e Atletas de elite

## 4.2 Introdução

Os testes de saltos verticais (VJ), como o salto agacha-salto (SJ), o salto de contramovimento (CMJ) ou salto de altura diferenciadas (Drop Jump - DJ), têm sido usados ao longo das décadas e aplicados em todos os tipos de população (Cruvinel-Cabral et al., 2018; Carlos-Vivas et al., 2018). Em especial no Desporto, os treinadores consideram a informação obtida dos VJ essencial, pela associação ao aumento do rendimento desportivo (Buckthorpe et al., 2012; Castagna et al., 2013; Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007), prevenção de lesão dos atletas (Leard et al., 2007) e programas de deteção de talentos (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Carlos-Vivas et al., 2018) em desportos coletivos (Glatthorn et al., 2011), como o futebol, basquetebol, voleibol, rugby e em desportos individuais, como e.g., o mergulho e o atletismo (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Castagna et al., 2013; Leard et al., 2007). Os resultados obtidos destes testes têm proporcionado informações importantes e promovido várias alterações das características atléticas, ao longo do programa de treino definido pelo treinador (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Carlos-Vivas et al., 2018; Leard et al., 2007), medindo a potência muscular dos membros inferiores (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Buckthorpe et al., 2012; Carlos-Vivas et al., 2018; Castagna et al., 2013; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019), monitorizando a fadiga muscular (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Carlos-Vivas et al., 2018) e identificando a composição das fibras musculares (Carlos-Vivas et al., 2018), ou seja, analisar se o atleta é constituído, maioritariamente, por fibras rápidas ou lentas (Rogers et al., 2019). Ainda é possível verificar, a atividade coordenativa (Leard et al., 2007), o desenvolvimento motor e a capacidade motora (Picerno et al., 2011), ou mesmo a capacidade funcional (Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007).

Vários métodos foram usados para quantificar a altura de salto, e respetivo rendimento do salto (Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007). Os mais comuns são determinados através da equação do projétil que caracteriza a trajetória aérea do movimento do corpo livre durante a fase de voo do centro de gravidade (CG) (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Carlos-Vivas et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011), no entanto, determinar a altura de salto pela velocidade de saída da chamada é considerado um método altamente validado e fiável (Carlos-Vivas et al., 2018). Através dos acelerómetros ou das IMUs, é possível determinar a altura de salto, através da dupla integração da aceleração, no entanto, estes instrumentos apresentam limitações associadas às propriedades físicas, ou seja, o *drift* aumentam linearmente ou quadraticamente, ao longo do tempo, quando integrado uma vez (velocidade) ou integrado duas vezes (posição), respetivamente (Camomilla et al., 2018). Para além disso, as propriedades ferromagnéticas podem limitar os dados de posição (Camomilla et al., 2018), porque a obtenção da posição através da integração está associada ao conhecimento da orientação do sensor e dessa forma, é necessário utilizar os dados obtidos através do giroscópio e do magnetómetro (Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011).

Vários instrumentos são usados para medir a altura dos VJ (Buckthorpe et al., 2012; Carlos-Vivas et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007; Picerno et al., 2011). As plataformas de força (FP) (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Buckthorpe et al., 2012; Carlos-Vivas et al., 2018; Castagna et al., 2013; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019) e os dispositivos através da videografia (Carlos-Vivas et al., 2018; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Leard et al., 2007; Rogers et al., 2019) são utilizados na maioria dos estudos como *goldens standards*, pela elevada precisão e validade, no entanto, têm preços bastante elevados, transportes difíceis e no caso da videografia, há a necessidade de calibrar o sistema, fatores que tornam a sua implementação difícil em testes de campo, para a maioria das modalidades desportivas. Dispositivos mais adequados, de preços mais acessíveis, de aplicação em qualquer local têm sido testados e validados (Balsalobre-Fernández et al., 2015), através da comparação dos resultados obtidos com os *goldens standards* enumerados, como e.g., as células fotoelétricas (Cruvinel-Cabral et al., 2018; Picerno et al., 2011), tapetes de contacto (Buckthorpe et al., 2012; Carlos-Vivas et al., 2018; Castagna et al., 2013; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al.,

2011; Leard et al., 2007; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019), os transdutores de posição linear (Castagna et al., 2013; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Rogers et al., 2019), sistemas de teste de salto-alcance (Buckthorpe et al., 2012; Castagna et al., 2013; Leard et al., 2007) ou sistemas de cinto de contacto (Buckthorpe et al., 2012). Este conjunto de instrumentos, também, apresentaram limitações, no resultado obtido, relacionadas com a experiência dos atletas e o respetivo fator técnico (Glatthorn et al., 2011; Picerno et al., 2011). Os acelerómetros (Carlos-Vivas et al., 2018; Castagna et al., 2013; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019) e recentemente, as Unidades de Medição Inercial (IMU) (Nielsen et al., 2019) que contêm acelerómetros, giroscópios e magnetómetros, e os sistemas de tempo ótico (Optojump (Microgate, Bolzano, Italy))(Castagna et al., 2013) têm sido testados por permitir uma aplicação em qualquer tipo de superfície e com uma transportabilidade facilitada. Os acelerómetros e as IMUs têm a vantagem do pequeno tamanho (Castagna et al., 2013; Nielsen et al., 2019) e da possibilidade de relacionar diretamente com os parâmetros cinéticos (Picerno et al., 2011).

Foram realizados vários estudos de validação e precisão, ou seja, validade critério (o instrumento mede o que é suposto medir) e de confiança, isto é, validade concorrente (verificar se as medições são consistentes) (Karras, 1997) dos instrumentos e métodos aplicados na determinação de parâmetros nos VJ. Leard et al. (2007) determinaram a validade concorrente do sistema de salto e alcance (Vertec) e do sistema de tapete de contacto (Just Jump) na obtenção da altura de salto, tendo como critério de referência um sistema de análise de movimento de três câmaras e obtiveram uma elevada associação entre os três sistemas. Na estatística de comparação foram identificadas diferenças significativas entre o Vertec e o sistema de análise de movimento de três câmaras, mas não foram identificadas diferenças significativas entre o Just Jump e o sistema de análise de movimento de três câmaras. Buckthorpe et al. (2012) avaliaram a validade critério de quatro tipos de dispositivos – tapetes de contacto, sistemas de salto-alcance, cintos de contacto e FP portáteis, na obtenção da altura de salto, tendo como critério uma FP laboratorial e verificaram que a FP portátil e os cintos de contacto foram os que produziram alturas de salto similares, enquanto os tapetes de contacto e os sistemas de salto-alcance ficaram significativamente abaixo do esperado. Glatthorn et al. (2011), por considerar que os transdutores lineares e os tapetes de contacto apresentam limitações associadas à não possível aplicação destes dispositivos em qualquer superfície, tiveram como objetivo realizar a validade concorrente do Optojump (Microgate, Bolzano, Italy) com uma FP, na medição da altura de salto do SJ e do CMJ e indicou que o sistema é válido e confiável para determinar a altura de salto quando comparado com uma FP. Para além disso, é de fácil transporte e com um custo mais acessível que as FP. Castagna et al. (2013) avaliaram a validade dos dispositivos Optojump e do Myotest, na medição do tempo de voo dos saltos verticais e compararam com uma FP, indicando que o Optojump e o Myotest obtiveram uma validade e confiança (validade concorrente) na medição do tempo de voo pelas associações elevadas, no entanto tiveram diferenças significativas quando comparados os resultados obtidos com a FP.

Novos meios têm surgido para simplificar o processo de avaliação do VJ, no transporte e aplicação do mesmo em qualquer superfície. Balsalobre-Fernández et al. (2015) validaram e analisaram a confiança de um smartphone iPhone (Apple Inc. (USA)), através de uma câmara a gravar a 120 imagens por segundo (120Hz) e a utilização da aplicação de telemóvel MyJump, no cálculo da altura de salto do CMJ considerando a FP, como *golden standard*, com atletas recreativos. Gallardo-Fuentes et al. (2016) teve o mesmo objetivo, mas com o iPhone 6 e 6s, (Apple Inc. (USA)), através de uma câmara a gravar 240 imagens por segundo (240Hz), com atletas competitivos que realizaram diversos VJ. Carlos-Vivas et al. (2018) tiveram como objetivo calcular a altura de salto através do método de tempo de voo com o iPhone e a aplicação MyJump e a FP e comparar com o método da velocidade vertical obtida na fase de saída de uma FP, em alunos, pois consideram este método o mais preciso. Cruvinel-Cabral et al. (2018) tiveram como objetivo testar a aplicação MyJump em população idosa, na realização do CMJ, mas compararam com um tapete de contacto (Chronojump, version. 1.6.2; Boscosystem, Barcelona, Spain). Rogers et al. (2019) mediram a altura de salto no CMJ e do índice de força reativa no DJ, através de um iPad Pro e da aplicação MyJump2, e comparam com os resultados obtidos com a FP, em jovens atletas. Nos estudos



que envolveram o uso do iPhone e a aplicação MyJump e MyJump 2 obtiveram medições com precisão e confiança, em que a sua aplicação foi fácil e simples, obtendo os resultados com erros mínimos quando comparados com a FP (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Carlos-Vivas et al., 2018; Gallardo-Fuentes et al., 2016; Rogers et al., 2019) e com o tapete de contacto (Cruvinel-Cabral et al., 2018).

Estudos de investigação com as IMUs, também, têm sido realizados, no entanto, poucos estudos de validação foram realizados nos VJ com este tipo de instrumento. Picerno et al. (2011) estimaram a altura de salto, através das IMUs, considerando como critério de referência a fotogrametria e as FP, e obtiveram uma elevada associação para o cálculo da altura de salto, validando o instrumento e indicando que a sua aplicação é adequada em testes de campo, pois eles são leves, portáteis, baratos e fáceis de configurar permitindo assim uma avaliação rápida de um grande número de atletas. Nielsen et al. (2019) tiveram como objetivo determinar o deslocamento vertical do CG com a FP e com a IMU, aplicando três métodos distintos, dupla integração da aceleração, velocidade vertical e tempo de voo e verificaram que é possível substituir a FP, através da IMU. Estes autores consideram que o método da dupla integração é um método mais fiável para determinar o deslocamento vertical do CMJ com a IMU.

A literatura indicou que poucos estudos de validação envolvendo a IMU foram realizados com os parâmetros obtidos através do teste de CMJ, para o tempo de salto e parâmetros cinemáticos (altura de salto, velocidade vertical e aceleração vertical) e nenhum estudo validou os parâmetros cinéticos (Força, Potência, Impulso e Taxa de Produção de Força). Neste sentido surgiram as seguintes questões, “Que parâmetros cinemáticos estão mais associados à FP?”; “Será possível utilizar a IMU para determinar parâmetros cinéticos?”. Então, o objetivo deste estudo foi avaliar a validade de critério dos parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos obtidos pela IMU tendo como critério de referência a FP.

## 4.3 Métodos

### 4.3.1 Amostra

Foram incluídos no estudo oito atletas de elite (seis masculinos e dois femininos;  $26 \pm 3,61$  anos; massa corporal:  $73,19 \pm 8,96$  Kg; e estatura:  $1,77 \pm 0,08$  m), com representação internacional pelos seus países. Todos os sujeitos tiveram informação dos objetivos do estudo e assinaram o protocolo que foi aprovado pelo conselho de ética da Universidade de Évora e está de acordo com os princípios de ética da Declaração de Helsínquia.

### 4.3.2 Equipamento

A IMU desenvolvida neste estudo, que é constituída por um acelerómetro tridimensional (3D), um giroscópio 3D e um magnetómetro 3D, a recolher a 275 dados por segundo (275 Hz) foi aplicada. Uma FP, Bertec (Columbus, USA), de 1,2m x 0,6m, a recolher a 1000Hz, foi usada como *golden standart*. O Qualisys Track Manager e o Spyder - Python 3.7 foram usados para recolher os dados da FP e da IMU, respetivamente.

### 4.3.3 Procedimentos

A amostra foi informada sobre os objetivos e o atleta realizou o aquecimento estipulado pelo seu treinador. Foi explicada a realização do CMJ. O atleta iniciou o movimento na posição vertical estática, realizou uma flexão do joelho a 90° e de seguida um salto, finalizando o movimento na posição em que iniciou, com

os braços colocados à cintura, o salto foi realizado na FP e com a IMU colocada no ponto de referência da apófise espinhosa da 5ª vertebra lombar (L5) (IMU-CG), sendo referência para o CG (Camomilla et al., 2018; Nielsen et al., 2019), e na zona do calcâneo (IMU-Pé) (Camomilla et al., 2018; Giandolini et al., 2014) por ser o ponto de referência mais próximo da FP. Os instrumentos foram fixados com fita adesiva na superfície e na zona da apófise espinhosa L5 e do calcâneo. Os dados foram sincronizados automaticamente através de uma rotina em *Python*, que permitiu recolher os dados para o mesmo ficheiro, ao mesmo tempo. Os atletas realizaram três CMJ cada e com um descanso de um minuto entre cada salto.

#### 4.3.4 Processamento de dados

A recolha de dados foi realizada através do *Spyder 3.3.3 (Python Project Contributors)*, que exportou um ficheiro em formato *MO Excel 2018* e a análise de dados foi realizada através do *Scylab 6.0.1 (ESI Group, France, 2018)*. Foi considerado o sistema de coordenadas definido pela Sociedade Internacional de Biomecânica (ISB) (Wu and Cavanagh, 1995). Através da IMU foram obtidos os dados da aceleração 3D ( $m/s^2$ ), no sistema de coordenadas local da IMU, e os dados do giroscópio ( $^\circ/s$ ), (Nielsen et al., 2019) através dos quais foram calculados os *quaternions* para obter a orientação do sensor relativamente ao sistema de coordenadas global (Vince, 2011). Em cada salto foi removida a aceleração da gravidade da aceleração recolhida inicialmente da IMU. Antes de iniciar a tarefa, o atleta ficou cerca de 30 segundos parado para obter a aceleração de base e realizou um salto antes para definir o critério inicial de ambos os instrumentos.

A partir da IMU e da FP foram determinados os parâmetros temporais que definem a fase excêntrica, a fase da taxa de produção de força, a fase concêntrica, a fase de voo e a fase de queda (Figura 4.1) (Dowling and Vamos, 1993; Jidovtseff et al., 2014; Toumi et al., 2004).

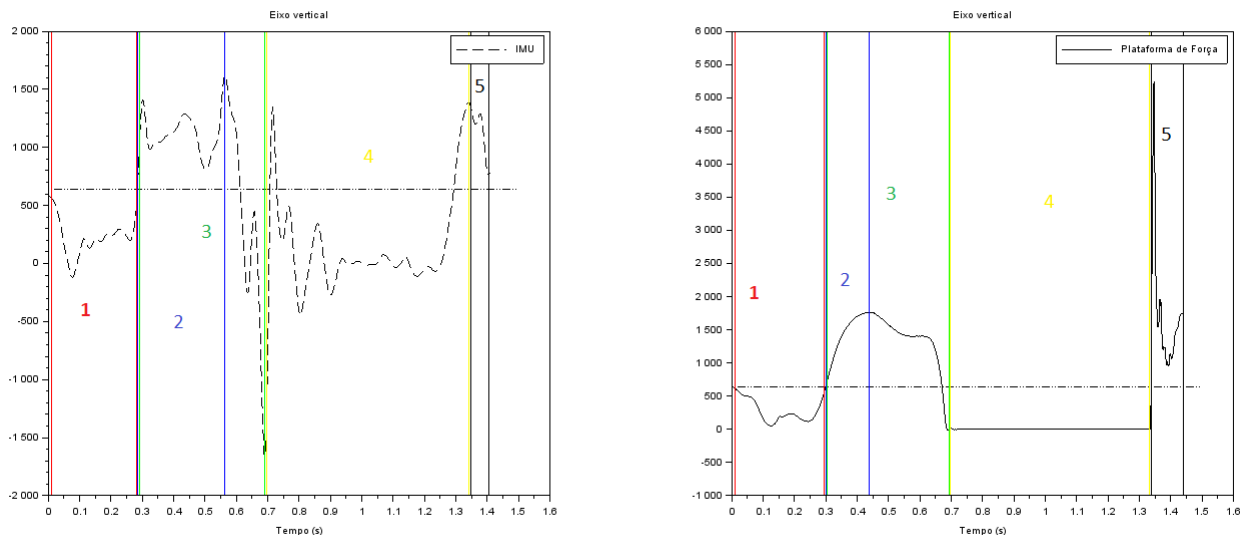


Figura 4.1: Definição das fases do CMJ;1- Fase excêntrica;2- Fase da taxa de produção de força; 3- Fase concêntrica; 4- Fase de voo; 5- Fase de queda

Nos parâmetros cinemáticos, a altura de salto foi calculada através da equação de queda livre (equação 4.1) (Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011), onde  $h$ , é a altura de salto;  $t$ , é o tempo de voo; e  $g$ , a

aceleração gravítica, cujo valor foi de  $9.806 \text{ m/s}^2$ , à latitude recolhida.

$$h = (t^2 \cdot g)/8 [m] \quad (4.1)$$

A aceleração vertical foi obtida diretamente da IMU, enquanto na FP a aceleração vertical foi determinada pela equação 4.2 (Jidovtseff et al., 2014; Nielsen et al., 2019), onde  $a_y$ , é aceleração vertical; BM é a massa corporal;  $F_y$ , a Força Vertical; e o BW, o Peso.

$$a_y = 1/BM \cdot (F_y - BW) [m/s^2] \quad (4.2)$$

Foram ainda determinados os seguintes parâmetros de aceleração vertical: aceleração vertical máxima, aceleração vertical mínima, amplitude da aceleração vertical, que consistiu na diferença entre o valor máximo e mínimo da aceleração e a raiz quadrada média (RMS) da aceleração vertical. A velocidade vertical foi obtida através da integral da aceleração vertical (equação 4.3) (Nielsen et al., 2019) e foram determinados os seguintes parâmetros de velocidade: velocidade vertical máxima, velocidade vertical mínima, amplitude da velocidade vertical, que consistiu na diferença entre o valor máximo e mínimo da velocidade vertical e o RMS da velocidade vertical.

$$v = v_0 + \int_{t_0}^t a_{correct} dt [m/s] \quad (4.3)$$

Relativamente aos parâmetros cinéticos, a força vertical foi determinada diretamente da FP e na IMU foi calculada através dos valores de aceleração recolhidos através da equação 4.4 (Nielsen et al., 2019), onde  $F_y$ , é a força;  $a_y$ , a aceleração vertical obtida através da IMU e corrigida com a gravidade; BM, a massa corporal; e BW, o peso. Após o cálculo das forças, foram determinados os seguintes parâmetros: força vertical máxima absoluta, força vertical máxima relativa, obtida através da divisão entre a força vertical máxima absoluta pela massa corporal, força vertical mínima, amplitude da força vertical, que consistiu na diferença entre o valor máximo e mínimo da força vertical, RMS da força vertical, força mínima na fase excêntrica e a força máxima na fase concêntrica.

$$F_y = a_y \cdot BM + BW [N] \quad (4.4)$$

Para determinar a Potência vertical foi usada a equação 4.5, onde  $P_y$ , é a potência vertical;  $F_y$ , a Força vertical; e  $v_y$ , a velocidade vertical, e foram determinadas a potência vertical máxima absoluta e a potência vertical máxima relativa.

$$P_y = F_y \cdot v_y (W) \quad (4.5)$$

O impulso foi determinado pela equação 4.6, onde  $I$ , é o impulso;  $F_y$ , a força vertical; e  $t$ , o tempo, para determinar o impulso na fase excêntrica e o impulso na fase concêntrica. A taxa de produção de força foi calculada pela equação 4.7, onde RFD é a taxa de produção de força;  $F_y$  e  $t$ , são a Força vertical e o tempo realizados durante essa fase, respetivamente. Determinou-se, ainda, a taxa de produção de força absoluta máxima e a taxa de produção de força relativa, obtida através da divisão entre a taxa de produção de força absoluta máxima pela massa corporal.

$$I = F_y \cdot t [N.s] \quad (4.6)$$

$$RFD = F_y/t [N/s] \quad (4.7)$$

Os dados da IMU foram suavizados através de um filtro *Butterworth* passa baixo e a frequência de corte foi determinada pela análise da potência espectral (Winter A., 2005; Nielsen et al., 2019) e aplicado no eixo vertical uma frequência de corte de 45Hz. Nos dados obtidos pela FP, antes do atleta saltar, foram recolhidos os dados de base da FP, determinou-se a média desses valores, subtraindo esse valor médio aos dados recolhidos no CMJ, considerando desta forma o *offset* da FP.

### 4.3.5 Análise Estatística

As análises estatísticas foram conduzidas para determinar a validade de critério (Buckthorpe et al., 2012; Karras, 1997) dos parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos obtidos com a IMU-CG e a IMU-Pé, tendo como critério de referência a FP, usando o programa SPSS - versão 22 (IBM SPSS Inc., Chicago, IL, USA). A normalidade foi verificada através do Teste de *Shapiro-Wilk* ( $p > 0,05$ ) (Castagna et al., 2013; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Picerno et al., 2011). O teste de *T* para amostras independentes foi utilizado com um intervalo de confiança de 95% (95% CIs), considerando a média dos saltos realizados por cada atleta, para determinar se existiram diferenças entre os instrumentos, através da detecção de diferença estatisticamente significativas entre os instrumentos (Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Karras, 1997).

Para o total de saltos realizados foram realizadas as diferenças absolutas entre a IMU e a FP, nos parâmetros do tempo de voo e altura de salto, para realizar a análise de *Bland-Altman* considerando um limite de confiança de 95% (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Nielsen et al., 2019; Giavarina, 2015) e permitiu visualizar o erro sistemáticos entre as medições dos instrumentos (Carlos-Vivas et al., 2018; Nielsen et al., 2019). O teste de *T* de uma amostra foi utilizado para determinar se as médias das diferenças apresentaram diferenças significativas quando comparado com zero. A regressão linear das diferenças entre os dois instrumentos foram usados para determinar a presença de enviesamento proporcional, como indicado para um gradiente significativo da linha de regressão (Kenneally-Dabrowski et al., 2018).

A correlação de *Pearson* e *Spearman*, entre a IMU-CG e a FP e a IMU-Pé e a FP foi realizada com a média dos parâmetros recolhidas em cada salto e foram considerados os valores de correlação sugeridos por Hopkins et al. (2009),  $r \leq 0,3$ , pequena;  $r$  entre 0,3 e 0,5, moderada; e  $r > 0,5$ , elevada (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Setuain et al., 2018).

## 4.4 Resultados

A análise descritiva e a estatística de comparação para os parâmetros estudados estão apresentadas na Tabela 4.1. Entre a IMU-CG e FP, a altura de salto (diferença média de 0,006m), o tempo de voo (diferença média de 0,005s), a amplitude da força vertical (diferença média de 652N), a amplitude da aceleração vertical (diferença média de  $9,28m/s^2$ ), o RMS da aceleração vertical (diferença média de  $1,12m/s^2$ ), a amplitude da velocidade vertical (diferença média de  $0,827m/s$ ), a potência vertical máxima absoluta (diferença média de 86W), a potência vertical máxima relativa (diferença média de  $0,36W/N$ ), a força mínima na fase excêntrica (diferença média de -0,7N), a força máxima na fase concêntrica (diferença média de 259N) e o tempo na fase concêntrica (diferença média de 0,052s) não apresentaram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ), enquanto para as restantes verificaram diferenças significativas. No instrumento IMU-Pé e FP, a altura de salto (diferença média de 0,012m), o tempo de voo (diferença média de 0,009s), a aceleração vertical máxima (diferença média de  $-21,68m/s^2$ ), a velocidade vertical máxima (diferença média de  $0,411m/s$ ), a velocidade vertical mínima (diferença média de  $-0,396m/s$ ), o RMS da velocidade vertical (diferença média de  $0,0236m/s$ ) e o tempo da taxa de produção de força (diferença média de 0,004s) não se verificaram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ), enquanto para as restantes verificaram diferenças significativas.

A análise de *Bland-Altman* permitiu determinar o erro sistemático e o intervalo de concordância entre o IMU-CG e FP. A altura de salto foi de 0,009m, com um intervalo de confiança de -0,067m a 0,084m. O tempo de voo teve um erro de 0,006s com um intervalo de confiança de -0,039s a 0,050s. A potência vertical máxima absoluta apresentou um erro de 93.785W com um intervalo de confiança de -2690.857W a 2877.426W, A potência vertical máxima relativa obteve um erro de  $0,432W/Kg$  com um intervalo de confiança de  $-6,349W/Kg$  a  $37,217W/Kg$ . O impulso na fase excêntrica teve um erro de  $-6,428N \cdot s$  com

Tabela 4.1: Estatística descritiva para os instrumentos analisados e as diferenças sistemáticas ( $p \leq 0,05$ )

	FP Média±SD	IMU-CG Média±SD	IMU-Pé Média±SD	≠ <sup>1</sup>	≠ <sup>2</sup>
<b>Altura de Salto [m]</b>	0,543±0,062	0,537±0,068	0,531±0,067	n.s.	n.s.
<b>Tempo de voo [s]</b>	0,665±0,039	0,660±0,042	0,656±0,041	n.s.	n.s.
<b>Força Vertical Máxima absoluta [N]</b>	2036,209±258,292	3439,337±1324,247	7564,836±2396,326	¥	¥
<b>Força Vertical Máxima relativa [N/Kg]</b>	27,617±2,238	24,194±3,199	75,082±13,989	¥	¥
<b>Força Vertical Mínima [N]</b>	-25,010±8,391	-1780,714±534,030	-4484,348±610,064	¥	¥
<b>Força Vertical – Amplitude [N]</b>	5872,639±1363,846	5220,051±1420,189	12049,184±2659,907	n.s.	¥
<b>Força Vertical – RMS [N]</b>	1092,752±126,399	902,646±176,400	1371,464±305,546	¥	¥
<b>Aceleração Vertical Máxima [<math>m/s^2</math>]</b>	69,725±18,528	36,339±17,163	91,412±24,191	¥	n.s.
<b>Aceleração Vertical Mínima [<math>m/s^2</math>]</b>	-10,146±0,111	-34,252±7,255	-71,727±13,543	¥	¥
<b>Aceleração Vertical – Amplitude [<math>m/s^2</math>]</b>	79,871±18,489	70,592±17,741	163,138±30,294	n.s.	¥
<b>Aceleração Vertical – RMS [<math>m/s^2</math>]</b>	11,160±1,123	10,040±1,613	16,462±3,288	n.s.	¥
<b>Velocidade Vertical Máxima [m/s]</b>	3,098±0,123	0,351±0,442*	2,687±0,912	¥	n.s.
<b>Velocidade Vertical Mínima [m/s]</b>	-3,567±0,287	-7,141±1,241*	-3,171±1,212	¥	n.s.
<b>Velocidade Vertical – Amplitude [m/s]</b>	6,665±0,379	7,492±1,071	5,929±0,769	n.s.	¥
<b>Velocidade Vertical – RMS [m/s]</b>	1,689±0,122	3,616±0,934	1,666±0,404*	¥	n.s.
<b>Potência Vertical Máxima absoluta [W]</b>	1755,080±1064,447	1669,136±663,601	8697,372±4826,132	n.s.	¥
<b>Potência Vertical Máxima relativa [W/Kg]</b>	23,117±12,481	22,760±8,856	118,306±67,051	n.s.	¥
<b>Taxa de Produção de Força absoluta [N/s]</b>	13798,091±3304,974	9444,310±7304,744*	43811,497±27194,259	¥	¥
<b>Taxa de Produção de Força relativa [N/s/Kg]</b>	189,079±45,655	123,094±77,136*	570,919±282,000	¥	¥
<b>Tempo da Taxa de Produção de Força [s]</b>	0,158±0,045*	0,251±0,068	0,163±0,067	¥	n.s.
<b>Força Mínima na Fase Excêntrica [N]</b>	119,723±122,857	23,599±95,755	437,747±178,486	n.s.	¥
<b>Impulso na Fase Excêntrica [<math>N \cdot s</math>]</b>	-117,445±20,024	-116,715±52,481*	47,813±24,925	n.s.	¥
<b>Tempo da Fase Excêntrica [s]</b>	0,371±0,449	0,452±0,114*	0,460±0,102	¥	¥
<b>Força Máxima na Fase Concêntrica [N]</b>	2036,209±258,293	1777,328±235,960	5550,903±1278,399	n.s.	¥
<b>Impulso na Fase Concêntrica [<math>N \cdot s</math>]</b>	337,916±44,991	144,170±62,733	158,143±62,389*	¥	¥
<b>Tempo da Fase Concêntrica [s]</b>	0,424±0,387	0,372±0,075	0,191±0,067	n.s.	¥

FP – Plataforma de Força; IMU-CG – Unidade de Medição Inercial na apófise espinhosa L5; IMU-Pé – Unidade de Medição Inercial no Pé; SD – Desvio Padrão; m – metros; s – segundos; ≠<sup>2</sup> – análise entre FP e IMU-CG; ≠<sup>1</sup> – análise entre FP e IMU-Pé; \* $p > 0,05$  verificou normalidade; ¥  $p \leq 0,05$ ; n.s. – não significante.

um intervalo de confiança de  $-105,547N \cdot s$  a  $92,692N \cdot s$  (Tabela 4.2). As diferenças de erro entre o IMU-Pé e FP, considerando, também, o número total de saltos, para a altura de salto o erro foi de 0,013m, com um intervalo de confiança de -0,137m a 0,160m. O tempo de voo teve um erro de 0,008s com um intervalo de confiança de -0,074s a 0,091s. A velocidade vertical máxima apresentou um erro de 0,375m/s com um intervalo de confiança de -1,771m/s a 2,524m/s. A velocidade vertical mínima teve um erro de -0,436m/s com um intervalo de confiança de -3,228m/s a 2,356m/s. O RMS da velocidade vertical obteve um erro de -0,436m/s com um intervalo de confiança de -3,228m/s a 2,356m/s. O tempo de taxa de produção de força apresentou um erro de -0,017, com um intervalo de confiança de -0,214 a 0,101 (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Média das diferenças e limites de confiança absoluto (LOA) *Bland-Altman's*, ambos para um intervalo de confiança de 95% para os parâmetros que não obtiveram diferenças significativas no *Test T* igual a zero entre a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial na posição da L5 e a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial na posição do calcâneo

	FP – IMU-CG	FP – IMU-Pé
	BIAS (LOA 95% CI)	BIAS (LOA 95% CI)
<b>Altura de Salto [m]</b>	0,009 (-0,067 a 0,084)	0,013 (-0,137 a 0,160)
<b>Tempo de voo [s]</b>	0,006 (-0,039 a 0,050)	0,008 (-0,074 a 0,091)
<b>Velocidade Vertical Máxima [m/s]</b>		0,375 (-1,771 a 2,524)
<b>Velocidade Vertical Mínima [m/s]</b>		-0,436 (-3,228 a 2,356)
<b>Velocidade Vertical – RMS [m/s]</b>		0,063 (-1,043 a 1,169)
<b>Potência Vertical Máxima absoluta [W]</b>	93,785 (-2690,857 a 2877,426)	
<b>Potência Vertical Máxima relativa [W/Kg]</b>	0,432 (-36,349 a 37,217)	
<b>Tempo da Taxa de Produção de Força [s]</b>		-0,017 (-0,214 a 0,101)
<b>Impulso na Fase Excêntrica [<math>N \cdot s</math>]</b>	-6,428 (-105,547 a 92,692)	

FP – Plataforma de Força; IMU-CG – Unidade de Medição Inercial na apófise espinhosa L5; IMU-Pé – Unidade de Medição Inercial no Pé; CI – Intervalo de Confiança; LOA - Limites de Confiança; m - metros; s – segundos; Kg - Quilograma; N - Newton; W - Watts.

Entre a IMU-CG e a FP foram verificadas correlações elevadas e significativas para a altura de salto ( $r= 0,888$  e  $\rho= 0,003$ ) (Figura 4.3a) e para o tempo de voo (Figura 4.3c) ( $r= 0,890$  e  $\rho= 0,003$ ). A amplitude da força vertical ( $r= 0,791$  e  $\rho= 0,019$ ) (Figura 4.3e) e a amplitude da aceleração vertical ( $r= 0,777$  e  $\rho= 0,023$ ) (Figura 4.3f) obtiveram correlações elevadas e significativas. Os restantes parâmetros analisados não obtiveram correlações estatisticamente significativas. Na IMU-Pé e a FP foram verificadas correlações elevadas e significativas para a altura de salto ( $r= 0,901$  e  $\rho= 0,002$ ) (Figura 4.3b), para o tempo de voo ( $r= 0,927$  e  $\rho= 0,001$ ) (Figura 4.3d), para a força mínima na fase excêntrica (Figura 4.3g) ( $r= 0,842$  e  $\rho= 0,009$ ). Enquanto, os restantes parâmetros analisados não obtiveram correlações estatisticamente significativas (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Correlação dos parâmetros obtidos entre a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial colocada na posição da L5 e a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial colocada na posição do calcâneo

	FP – IMU- CG	FP – IMU- Pé
Altura de Salto [m]	0,888**	0,901**
Tempo de voo [s]	0,890**	0,927**
Força Vertical Máxima absoluta [N]	0,438	0,440
Força Vertical Máxima relativa [N/Kg]	0,302	-0,463
Força Vertical Mínima [N]	-0,698	0,054
Força Vertical – Amplitude [N]	0,791*	-0,069
Força Vertical – RMS [N]	0,68	0,552
Aceleração Vertical Máxima [ $m/s^2$ ]	0,703	-0,185
Aceleração Vertical Mínima [ $m/s^2$ ]	-0,618	0,156
Aceleração Vertical – Amplitude [ $m/s^2$ ]	0,777*	-0,254
Aceleração Vertical – RMS [ $m/s^2$ ]	0,705	0,326
Velocidade Vertical Máxima [m/s]	0,072	0,015
Velocidade Vertical Mínima [m/s]	-0,262	0,444
Velocidade Vertical – Amplitude [m/s]	0,205	0,59
Velocidade Vertical – RMS [m/s]	-0,256	0,095
Potência Vertical Máxima absoluta [W]	0,131	-0,159
Potência Vertical Máxima relativa [W/Kg]	-0,005	-0,372
Taxa de Produção de Força absoluta [N/s]	0,611	-0,291
Taxa de Produção de Força relativa [N/s/Kg]	-0,262	-0,632
Tempo da Taxa de Produção de Força [s]	-0,143	-0,667
Força Mínima na Fase Excêntrica [N]	0,693	0,842**
Impulso na Fase Excêntrica [ $N \cdot s$ ]	0,048	0,024
Tempo da Fase Excêntrica [s]	0,667	0,277
Força Máxima na Fase Concêntrica [N]	0,461	0,148
Impulso na Fase Concêntrica [ $N \cdot s$ ]	0,335	0,188
Tempo da Fase Concêntrica [s]	0,089	-0,561

FP – Plataforma de Força; IMU-CG – Unidade de Medição Inercial na apófise espinhosa da L5; IMU-Pé – Unidade de Medição Inercial no Pé; Significância: \* $\rho < 0,05$  e \*\* $\rho < 0,01$

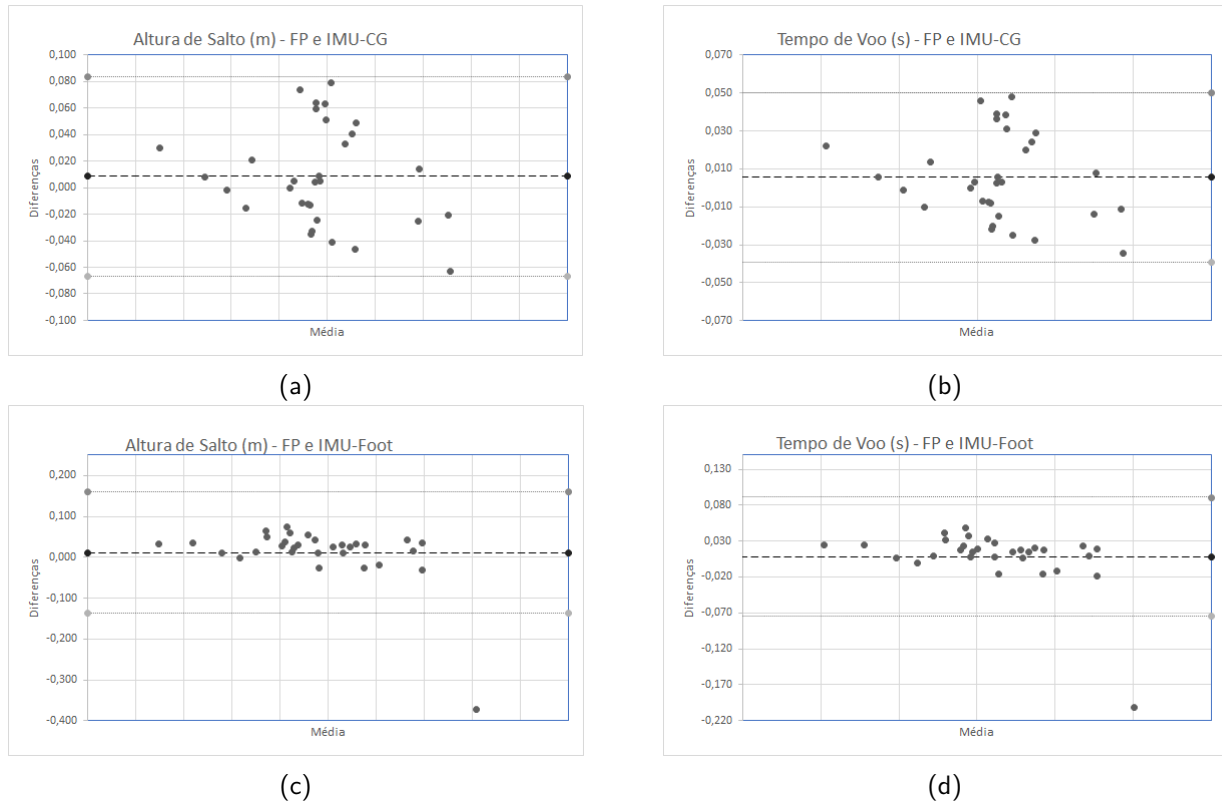


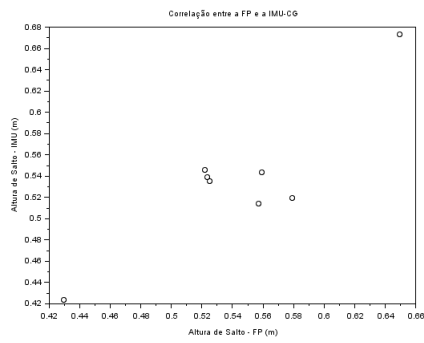
Figura 4.2: Gráficos do Bland-Altman

## 4.5 Discussão

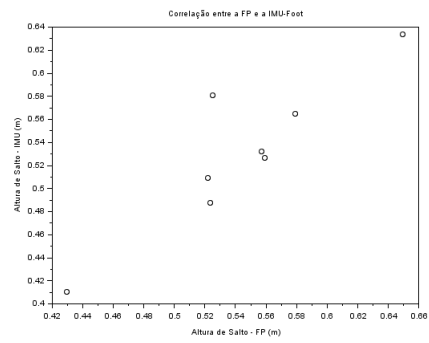
O teste de CMJ é importante na medição da potência muscular dos atletas de elite (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Buckthorpe et al., 2012; Carlos-Vivas et al., 2018; Castagna et al., 2013; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019) e está associado a uma otimização do rendimento dos atletas. O objetivo deste estudo foi determinar a validade de critério dos parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos de uma IMU colocada em dois pontos de referência no corpo, um na zona da apófise espinhosa da 5ª vértebra lombar e outro no Calcâneo, considerando a FP como critério de referência.

A determinação da altura de salto pelo tempo de voo é um dos métodos que tem permitido os treinadores interpretar rendimento dos atletas, no CMJ. Para atletas de elite com o instrumento na posição da apófise espinhosa da 5ª vértebra lombar e no Calcâneo obteve validade quando comparado com o critério de referência, tal como analisado nos estudos de validação do CMJ com a IMU (Castagna et al., 2013; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011). Os valores obtidos para a altura de salto neste estudo de investigação apresentaram resultados ligeiramente superiores ( $FP=0,543m\pm 0,062$ ;  $IMU-CG=0,537m\pm 0,068$  e  $IMU-Pé=0,531m\pm 0,067$ ) que os obtidos nos outros estudos (Buckthorpe et al., 2012; Carlos-Vivas et al., 2018; Gallardo-Fuentes et al., 2016; Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019), bem como no tempo no voo ( $FP=0,665s\pm 0,039$ ;  $IMU-CG=0,660s\pm 0,039$  e  $IMU-Pé=0,656s\pm 0,041$ ) (Castagna et al., 2013) o que era expectável devido à amostra ser constituída por atletas de elite. Na comparação dos resultados obtidos identificou-se que os resultados para o tempo de voo e altura de salto são similares, quando comparados o IMU-CG com FP e IMU-Pé com FP, permitindo indicar que o instrumento mede o que é pretendido. Resultados idênticos foram obtidos no estudo de Picerno et al. (2011).

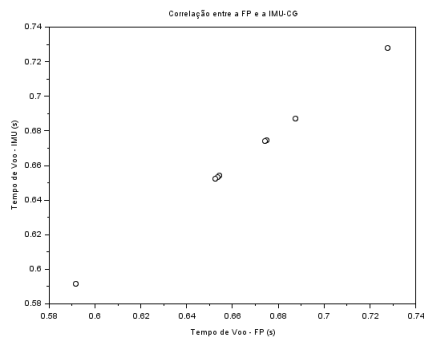




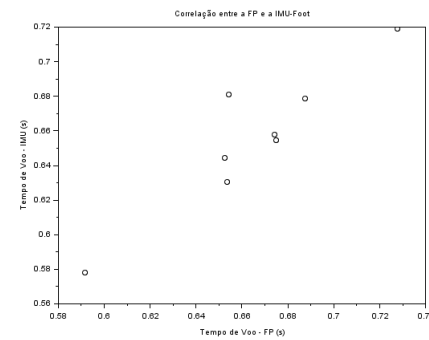
(a)



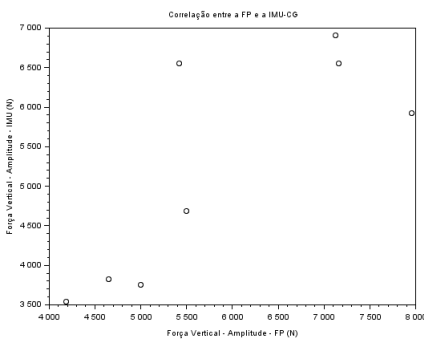
(b)



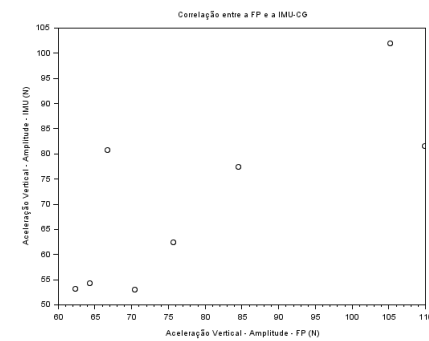
(c)



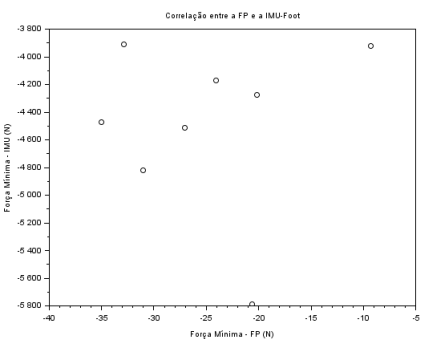
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 4.3: Gráficos de correlação entre a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial na posição da L5 e a Plataforma de Força e a Unidade de Medição Inercial na posição do Calcâneo

Na análise do erro sistemático e do grau de concordância dos instrumentos, para o tempo de voo e altura de salto identificou-se um erro pequeno, representando um elevado nível de concordância ligeiramente superiores para a IMU colocada na posição do calcâneo. Os gráficos (Figura 4.2) e o nível de significância da regressão linear permitiram verificar que para o tempo de voo (Figura 4.2a) e altura de salto (Figura 4.2b), obtidos pela IMU-CG o erro não é proporcional, enquanto na IMU-Pé foram obtidos resultados estatisticamente significativos em ambos os parâmetros (Figura 4.2c e 4.2d), sugerindo que ocorre um erro proporcional quando aplicado o instrumento no pé. Em ambas as posições da IMU, o nível de significância foi positivo, indicando que os valores determinados na FP foram ligeiramente superiores que na IMU. As frequências de captura diferentes e inferiores na IMU são umas das possíveis razões para os resultados da FP serem ligeiramente superiores, pois há estudos que indicam que uma frequência de captura menor pode influenciar os resultados obtidos em menos 2% na altura de salto, pela menor precisão na definição do critério inicial e final do salto (Cruvinel-Cabral et al., 2018). Outra razão para estas diferenças podem estar associadas ao sensor estar colocado na pele e ocorrer oscilações que podem alterar os resultados obtidos (Nielsen et al., 2019). Os testes de correlação foram determinados para analisar a associação entre os instrumentos. Ao associar o tempo de voo e altura de salto entre a IMU-CG e a IMU-Pé, com a FP analisaram-se associações superiores a 0.80, tal como Picerno et al. (2011) e Castagna et al. (2013), para o tempo de voo,  $r=0,96$  e  $\rho<0,0001$  e  $r=0,89$  e  $\rho<0,0001$ , respetivamente. Em suma, o instrumento desenvolvido é válido com uma elevada concordância quando é pretendido avaliar o tempo de voo e, conseqüente, altura de salto. Esta análise permite indicar que a IMU é um instrumento que pode ser utilizado na avaliação do CMJ, através do tempo de voo e altura de salto.

Outro objetivo deste estudo foi avaliar a validade critério de outros parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos. Na IMU-CG, a amplitude da aceleração vertical e a amplitude da força vertical não obtiveram diferenças estatisticamente significativas e tiveram uma alta associação, embora os valores máximos e mínimos de aceleração vertical e força vertical obtivessem diferenças significativas e baixas correlações. Com estes resultados podemos indicar que a IMU colocada na área da L5 obteve valores absolutos diferentes, mas de igual amplitude nos parâmetros de aceleração e força. Para além disso, a IMU colocada na zona da L5 permitiu determinar a potência realizada no CMJ através da potência vertical relativa e desta forma quantificar a potência muscular dos atletas de elite no CMJ (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Buckthorpe et al., 2012; Carlos-Vivas et al., 2018; Castagna et al., 2013; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019). A IMU na posição da L5 permitiu, também, identificar as diferentes fases do CMJ e quantificar o tempo e a força mínima realizada na fase excêntrica, e o tempo e a força máxima realizada na fase concêntrica, sem diferenças estatisticamente significativas quando comparados com os resultados obtidos através da FP. A IMU na zona do calcâneo permitiu determinar os valores máximos, mínimos e RMS da velocidade e o tempo realizado na RFD. Embora, fosse expeável obter valores de força máxima e mínima quando comparados com os resultados da IMU com os da FP, pela proximidade entre a FP e a IMU no calcâneo. Desta forma, os resultados obtidos pela IMU-CG demonstra maior validade para valores relativos, enquanto a IMU Foot demonstrou maior validade para valores absolutos, indicando que quanto maior a distância do chão, menores são as forças obtidas pelo instrumento.

## 4.6 Conclusões

Os resultados deste estudo indicaram validade critério para os parâmetros de tempo de voo e altura de salto na IMU colocada na zona da apófise espinhosa da 5ª vértebra lombar e no calcâneo, no teste de CMJ e envolvendo atletas de elite, de Atletismo. Este estudo concluiu, também, que a IMU colocada em posições diferentes obtém valores absolutos diferentes, mas de amplitude igual para parâmetros cinemáticos e cinéticos. Contudo, a IMU colocada na zona da L5 obteve um conjunto de parâmetros cinemáticos e cinéticos válidos.

Este estudo permite indicar a aplicação deste instrumento no teste CMJ com atletas de elite, pela fácil aplicação e transporte do instrumento (Picerno et al., 2011), e pela obtenção de resultados de forma contínua e em tempo real, obtendo um conjunto de informação relevante para o treinador, a baixo custo.

## 4.7 Referências Bibliográficas

- Balsalobre-Fernández, C., Glaister, M., and Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(15):1574–1579.
- Buckthorpe, M., Morris, J., and Folland, J. P. (2012). Validity of vertical jump measurement devices. *Journal of Sports Sciences*, 30(1):63–69.
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., and Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors (Switzerland)*, 18(3).
- Carlos-Vivas, J., Martin-Martinez, J. P., Hernandez-Mocholi, M. A., and Perez-Gomez, J. (2018). Validation of the iPhone app using the force platform to estimate vertical jump height. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 58(3):227–232.
- Castagna, C., Ganzetti, M., Ditroilo, M., Giovannelli, M., Rocchetti, A., and Manzi, V. (2013). Concurrent Validity of Vertical Jump Performance Assessment Systems. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(3).
- Cruvinel-Cabral, R. M., Oliveira-Silva, I., Medeiros, A. R., Claudino, J. G., Jiménez-Reyes, P., and Boullosa, D. A. (2018). The validity and reliability of the “ My Jump App ” for measuring jump height of the elderly . *PeerJ*, 6:e5804.
- Dowling, J. J. and Vamos, L. (1993). Identification of Kinetic and Temporal Factors Related to Vertical jump Performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 9:95–110.
- Gallardo-Fuentes, F., Gallardo-Fuentes, J., Ramírez-Campillo, R., Balsalobre-Fernández, C., Martínez, C., Caniuqueo, A., Cañas, R., Banzer, W., Loturco, I., Nakamura, F. Y., and Izquierdo, M. (2016). Intersession and Intrasession Reliability and Validity of the My Jump App for Measuring Different Jump Actions in Trained Male and Female Athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(7).
- Giandolini, M., Poupard, T., Gimenez, P., Horvais, N., Millet, G. Y., Morin, J.-B., and Samozino, P. (2014). A simple field method to identify foot strike pattern during running. *Journal of Biomechanics*, 47(7):1588–1593.
- Giavarina, D. (2015). Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia Medica*, 25(2):141–151.
- Glatthorn, J. F., Gouge, S., Nussbaumer, S., Stauffacher, S., Impellizzeri, F. M., and Maffiuletti, N. A. (2011). Validity and Reliability of Optojump Photoelectric Cells for Estimating Vertical Jump Height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2).
- Hopkins, W., a.M. Batterham, Marshall, S., and Hanin, J. (2009). Progressive Statistics. *Sportsci.org*, 2009:55–70.
- Jidovtseff, B., Quievre, J., Harris, N. K., and Cronin, J. B. (2014). Influence of jumping strategy on kinetic and kinematic variables. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 54(2):129–138.
- Karras, D. J. (1997). Statistical methodology: II. Reliability and validity assessment in study design, Part A. *Academic Emergency Medicine*, 4(1):64–71.
- Kenneally-Dabrowski, C. J., Serpell, B. G., and Spratford, W. (2018). Are accelerometers a valid tool for measuring overground sprinting symmetry? *International Journal of Sports Science and Coaching*, 13(2):270–277.

- Leard, J. S., Cirillo, M. A., Katsnelson, E., Kimiatek, D. A., Miller, T. W., Trebincevic, K., and Garbalosa, J. C. (2007). Validity of Two Alternative Systems for Measuring Vertical Jump Height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(4).
- Nielsen, E. T., Jørgensen, P. B., Mechlenburg, I., and Sørensen, H. (2019). Validation of an inertial measurement unit to determine countermovement jump height. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 16:8–13.
- Picerno, P., Camomilla, V., and Capranica, L. (2011). Countermovement jump performance assessment using a wearable 3D inertial measurement unit. *Journal of sports sciences*, 29(2):139–46.
- Rogers, S. A., Hassmén, P., Hunter, A., Alcock, A., Crewe, S. T., Strauts, J. A., Gilleard, W. L., and Weissensteiner, J. R. (2019). The Validity and Reliability of the MyJump2 Application to Assess Vertical Jumps in Trained Junior Athletes. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 23(1):69–77.
- Setuain, I., Lecumberri, P., Ahtiainen, J. P., Mero, A. A., Häkkinen, K., and Izquierdo, M. (2018). Sprint mechanics evaluation using inertial sensor-based technology: A laboratory validation study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(2):463–472.
- Toumi, H., Best, T. M., Martin, A., F'Guyer, S., and Poumarat, G. (2004). Effects of eccentric phase velocity of plyometric training on the vertical jump. *International Journal of Sports Medicine*, 25(5):391–398.
- Vince, J. (2011). *Quaternions for Computer Graphics*, volume 53. Springer-Verlag London, Bournemouth, UK, 1 edition.
- Winter A., D. (2005). *Biomechanics and motor control of human movement*. 3rd edition.
- Wu, G. and Cavanagh, P. R. (1995). ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, 28(10):1257–1261.



# 5

Validação de uma IMU na  
determinação de parâmetros  
cinemáticos e cinéticos no Teste de  
Velocidade - 40m, em atletas de elite,  
no Atletismo

## 5.1 Resumo

Introdução: Diversos estudos desenvolveram, validaram e aplicaram as IMUs, permitindo uma aplicação mais fácil, rápida e económica no desporto e no exercício. Este estudo teve o objetivo de validar uma IMU no teste de corrida de velocidade de 40m em atletas de elite do Atletismo.

Métodos: Seis atletas de elite (quatro masculinos e dois femininos;  $26 \pm 3,72$ anos) realizaram três corridas de velocidade máxima no teste de 40m, com a IMU colocada na apófise espinhosa L5, tendo como referência as células fotoelétricas de duplo corte, o radar e a câmara de alta velocidade em *panning*. Foram realizados os testes estatísticos de *T students* de amostra independentes, a análise de *Bland-Altman* e os testes de correlação de *Pearson* e a de *Spearman*.

Resultados: Os resultados indicaram validade critério para a IMU no teste de 40m tendo em consideração os instrumentos de referência. Nas comparações entre os resultados do IMU com as células fotoelétricas e com o radar, obteve-se no parcial dos 20-30m relações moderadas e pequenas, respetivamente. No parcial 0-10m foram detetadas diferenças significativas quando comparada a IMU com o radar. Foi verificada também, a validade na determinação do tempo de passo da IMU quando comparada com a câmara de alta velocidade em *panning*, indicando a IMU, como um bom instrumento para determinar a frequência de passo. Além disso, verificou-se ainda que os valores de aceleração mínima, o RMS da aceleração e amplitude da aceleração não tiveram diferenças significativas quando comparados os resultados de aceleração da IMU com o radar.

Conclusões: Este estudo permitiu validar a IMU para um conjunto de parâmetros temporais e cinemáticos propostos, no teste de velocidade de 40m. Tornando a IMU um instrumento informativo, útil, de baixo custo e de fácil aplicação na tarefa estudada.

**Palavras-chaves:** Validação; IMU; Velocidade; e Atletas de elite



## 5.2 Introdução

A análise biomecânica da marcha humana (Lee et al., 2010) e da corrida (Bailey and Harle, 2014) têm sido conduzidas com objetivo de otimizar o rendimento desportivo e em prevenir a lesão associada (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; MacDonald et al., 2017; Setuain et al., 2018). As avaliações biomecânicas têm sido desenvolvidas por serem uma componente válida no treino do desporto de elite (Bailey and Harle, 2014) e a sua aplicação em ambientes laboratoriais tem o objetivo de permitir uma análise válida e confiável do movimento a estudar (Lee et al., 2010). Na corrida, nomeadamente na corrida de velocidade, a otimização do seu rendimento tem sido a chave de muitas rotinas de treino em numerosos desportos e programas de condição física (Setuain et al., 2018). Estas tarefas de alta velocidade têm sido implementadas para potenciar o rendimento das atividades explosivas e, através das ciências do desporto, a análise biomecânica da corrida de velocidade tem sido estudada, com o foco de compreender a adaptação do corpo humano à tarefa realizada, bem como descrever o padrão do movimento realizado (Setuain et al., 2018). A caracterização do padrão da corrida tornou-se uma das principais questões de análise no rendimento do atleta de velocidade (Kuznietsov, 2012; Schmidt et al., 2016), no qual, através do estudo dos parâmetros temporais, a duração da fase de apoio e da fase de voo, respetiva frequência de passo e a sua correlação com o rendimento desportivo dos atletas, indica que os parâmetros associados ao passo representam uma informação útil para o treinador (Schmidt et al., 2016).

As avaliações em ambiente laboratorial apresentam muitos equipamentos para avaliar o rendimento desportivo dos atletas, como as plataformas de força (FP), eletromiografia, passadeiras instrumentadas e os sistemas de medição de deslocamento (radar) (Setuain et al., 2018). Muitos procedimentos tecnológicos e métodos estão associados a estes equipamentos que tem tornado as avaliações complicadas e por vezes limitado as avaliações da análise biomecânica da corrida, como por exemplo, a dificuldade de transportabilidade dos equipamentos (Wixted et al., 2010), os preços elevados associados, a análise manual, as métricas subjetivas (Bailey and Harle, 2014, 2016), a limitação a uma área, a obtenção de informação de apenas de um atleta (Schmidt et al., 2016) e as restrições da roupa, para a colocação dos marcadores anatómicos, em muitos casos limitando o movimento realizado (Lee et al., 2010). Embora estas limitações têm sido colmatadas através do desenvolvimento de estudos longitudinais para diminuir as restrições indicadas (Lee et al., 2010).

Recentemente, as Unidades de Medição Inercial (IMU) sem fios, têm sido aplicadas no desporto de elite (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Setuain et al., 2018). Esta tecnologia tem permitido colmatar as limitações apresentadas pelos laboratórios tradicionais (Lee et al., 2010). Este tipo de instrumento é robusto e confiável na análise do movimento desportivo (Setuain et al., 2018) e têm permitido o indivíduo realizar tarefas no seu ambiente natural, obter dados em tempo real, avaliar diariamente o rendimento desportivo dos atletas, pelo seu relativo baixo custo (Alexander et al., 2016; Bailey and Harle, 2014; Kuznietsov, 2012; Schmidt et al., 2016; Wixted et al., 2010) e pela possibilidade dos dados obtidos serem comparáveis com as FPs (Setuain et al., 2018). Na velocidade pode ser determinante, pois permite obter os dados da aceleração instantânea e caracterizar o perfil do atleta nas diferentes fases da velocidade, na fase de aceleração, na fase de velocidade máxima constante e na fase de desaceleração (Kuznietsov, 2012).

Diversos estudos têm procurado desenvolver e validar as IMU com diferentes objetivos, aplicados ao rendimento desportivo da corrida e em programas de prevenção de lesão. Na procura das melhores características das IMUs, Kuznietsov (2012) teve o objetivo de desenvolver um sistema de baixo custo, para capturar dados relevantes e instantâneos da velocidade, e desenvolver algoritmos para derivar esses parâmetros do padrão de passo como a frequência de passo e amplitude de passo e identificou que foi possível analisar o padrão do movimento humano sem aplicação de soluções mais dispendiosas e desta forma otimizar o treino dos atletas. Schmidt et al. (2016) tiveram o objetivo de desenvolver e validar um sensor sem fios baseado na deteção e monitorização da duração do apoio durante a velocidade, comparando com um sistema Op-

tojump e indicou que estes sistemas permitem uma comunicação objetiva e em tempo real ao treinador e que o sistema pode contribuir para um ganho de qualidade no treino em desportos de elite.

Na caracterização do rendimento desportivo dos atletas, Lee et al. (2010) tiveram como objetivo de estudo determinar a confiança entre um sensor inercial e um método para medir o tempo das fases de apoio, do passo e do ciclo da passada e, se esta confiança altera com o aumento da velocidade. Estes autores sugeriram que o sensor fosse colocado na zona do sacro, o que permitiu identificar a duração do apoio, do passo e do ciclo da passada em vários níveis da corrida e, que ao comparar-se estes parâmetros com o aumento da velocidade, não foram encontradas diferenças significativas. Wixted et al. (2010) propuseram a avaliação da frequência de passo e do deslocamento e compararam graficamente os dados fornecidos pelo acelerómetro no tronco e um sensor de pressão no solo, sugerindo que o acelerómetro pode ser um instrumento a aplicar na análise da corrida do atleta. Bailey and Harle (2014) tiveram como objetivo avaliar a adequação dos sensores montados no pé para determinar a trajetória tridimensional (3D) do mesmo durante a corrida. Estes autores avaliaram a validade de duas propostas confrontando o sistema de análise de movimento padrão, indicando que os resultados do sensor no pé podem avaliar cinematicamente a corrida e fornecer dados ricos da trajetória completa do pé, no seu ambiente natural e sem restrições. Alexander et al. (2016) tiveram o objetivo de determinar a validade de um acelerómetro durante a corrida de alta velocidade e identificaram algum ruído nos dados obtidos, limitando a suavização realizada e indicando que este instrumento pode não ser aplicado na medição da aceleração média da tarefa proposta. Setuain et al. (2018) tiveram o objetivo de analisar a validação das IMUs colocados na zona lombar, comparando com a FP, na avaliação da relação força-velocidade durante a corrida. Este estudo permitiu quantificar as corridas de velocidade realizadas, através das variáveis da força horizontal zero, força horizontal para a velocidade zero, potência máxima, rácio de perda de força horizontal e rácio de decréscimo de força. Desta forma, os autores identificaram a importância das IMUs na avaliação mecânica da corrida quando este é colocado na zona do centro de gravidade (CG). Raper et al. (2018) tiveram o objetivo de determinar a validade de um acelerómetro montado na tíbia para o cálculo da força da reação dos apoios, tendo como referência as FPs, bem como determinar a confiança relativa e absoluta na corrida de velocidade constante e identificou que não foi possível determinar o pico de força das reações do apoio quando comparado com os dados das FPs. Os autores sugerem que o instrumento proposto é válido e confiável na medição da corrida a uma velocidade constante.

Em programas de identificação e prevenção de lesão, Kenneally-Dabrowski et al. (2018) tiveram como objetivos calcular a assimetria através do tempo realizado em cada passo no eixo vertical, calculados a partir dos dados de aceleração no eixo médio-lateral, para maximizar as forças médio-laterais da FP e determinar a assimetria no cálculo do tempo do ciclo da passada através do acelerómetro, bem como as forças de reação do apoio e identificaram o tempo do ciclo da passada, um parâmetro válido na determinação da corrida simétrica. Kiernan et al. (2018) propuseram a determinação dos parâmetros relacionados com o ciclo da passada e o pico de força vertical e quantificaram as cargas de perfil em todos os atletas de atletismo e observaram diferenças significativas nas cargas dos perfis entre os atletas lesionados e não lesionados ao longo de 60 dias.

Na última década foram desenvolvidos alguns estudos de desenvolvimento de IMUs (Kuznietsov, 2012; Schmidt et al., 2016), outros que aplicaram o sensor em estudos de validação em tarefas de rendimento desportivo (Alexander et al., 2016; Bailey and Harle, 2016; Lee et al., 2010; Raper et al., 2018; Setuain et al., 2018; Wixted et al., 2010) e em programas de identificação e prevenção de lesão (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Kiernan et al., 2018). Para além disso, alguns autores indicaram as IMUs como sistemas válidos e aplicáveis na medição da velocidade (Bailey and Harle, 2016; Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Kiernan et al., 2018; Kuznietsov, 2012; Lee et al., 2010; Schmidt et al., 2016; Setuain et al., 2018; Wixted et al., 2010) e outros que sugeriram alguns cuidados ao aplicar a IMU (Alexander et al., 2016; Raper et al., 2018). Então, algumas questões surgiram, "A IMU permite determinar o tempo da fase de apoio, o tempo

da fase de balanço e do tempo de passo?"; "Que parâmetros cinemáticos podemos obter através da IMU no teste de velocidade de 40m?". Este estudo teve como objetivo validar uma IMU no teste de corrida de velocidade de 40m, em atletas de elite do Atletismo.

## 5.3 Métodos

O estudo realizado é um estudo transversal de determinação da validade de uma IMU, tendo como referência quatro pares de células, um radar e uma câmara de alta velocidade em *panning*.

### 5.3.1 Amostra

Foram incluídos no estudo seis atletas de elite (quatro masculinos e dois femininos;  $26 \pm 3,72$ anos; massa corporal:  $73,01 \pm 9,97$ Kg; e estatura:  $1,76 \pm 0,08$ m), com representação internacional pelos seus países. Todos os sujeitos tiveram informação dos objetivos do estudo e assinaram o protocolo que foi aprovado pelo conselho de ética da Universidade de Évora e está de acordo com os princípios de ética da Declaração de Helsínquia.

### 5.3.2 Equipamento

A IMU desenvolvida neste estudo, que é constituída por um acelerómetro tridimensional (3D), um giroscópio 3D e um magnetómetro 3D, a recolher a 275 dados por segundo (275 Hz) foi aplicada. Quatro pares de células fotoelétricas de duplo corte da Microgate foram usadas para determinar o tempo realizado a cada 10m, num total de 40m. Um radar (*LDM, Jenoptik*) e uma câmara de alta velocidade da (*Panasonic Lumix Fz200*) foram usados para obter o deslocamento instantâneo e os tempos da fase de apoio e da fase de balanço e do tempo de passo, respetivamente e recolheram a 100 dados por segundo (100Hz).

### 5.3.3 Procedimentos

A amostra foi informada sobre os objetivos e o atleta realizou o aquecimento estipulado pelo seu treinador. Foi explicada a realização do teste de 40m, isto é, o atleta realiza um salto de contramovimento (CMJ) para sincronizar os quatro instrumentos propostos. Inicia a tarefa de três apoios e corre na máxima velocidade durante 40 metros. A IMU foi colocada na apófise espinhosa da 5ª vértebra lombar (L5) (IMU-CG), com fita adesiva, sendo referência para o CG (Nielsen et al., 2019). Cada atleta realizou três corridas de velocidade máxima e com um descanso de dez minutos entre cada tarefa.

### 5.3.4 Processamento de dados

A recolha de dados foi realizada através do *Spyder 3.3.3 (Python Project Contributors)*, que exportou um ficheiro em formato *MO Excel 2018* e a análise de dados foi realizada através do *Scylab 6.0.1 (ESI Group, France, 2018)*. Foi considerado o sistema de coordenadas definido pela Sociedade Internacional de Biomecânica (ISB) (Wu and Cavanagh, 1995). Para cada corrida foi necessário remover a gravidade da aceleração obtida do acelerómetro 3D e considerar a inclinação do sensor. Assim, foram obtidos os dados da aceleração 3DI ( $m/s^2$ ), no sistema de coordenadas local da IMU, e os dados do giroscópio ( $^\circ/s$ ) (Nielsen et al., 2019) através dos quais foram calculados os *quaternions* para obter a orientação do sensor

relativamente ao sistema de coordenadas global da IMU (Vince, 2011). Antes de iniciar a tarefa, o atleta ficou cerca de 30 segundos parado para obter a aceleração de base e realizou um salto antes para definir o critério inicial de ambos os instrumentos.

Os dados da IMU e do radar foram suavizados através de um filtro *Butterworth* passa-baixo, com uma frequência de corte determinada através da análise da potência espectral (Winter A., 2005), com valores compreendidos entre os 12Hz. Os dados das células foram obtidos diretamente do sistema de cronometragem e organizados numa base de dados em Excel. Os vídeos da câmara de alta velocidade foram tratados através do programa *Kinovea*<sup>®</sup> para determinar cada tempo de apoio, tempo da fase de balanço e respetivo tempo de passo. Além disso, permitiu realizar a contagem do número de passos realizados durante os 40 metros, bem como o número de passos realizado em cada parcial, ou seja, o número de passos entre o início (0m) e os 10m, os 10m e os 20m, os 20m e os 30m e os 30m e os 40m. Este processo permitiu determinar o tempo total, bem como os tempos parciais, da câmara de alta velocidade, bem como da IMU.

### 5.3.5 Análise Estatística

As análises estatísticas foram conduzidas para determinar a validade dos parâmetros temporais e cinemáticos obtidos de uma IMU, tendo como critério de referência as células fotoelétricas de duplo corte, o radar e uma câmara de alta velocidade, usando o programa SPSS - versão 22 (*IBM SPSS Inc., Chicago, IL, USA*). A normalidade foi verificada através do Teste de *Shapiro-Wilk* ( $\rho < 0,05$ ). Os dados foram apresentados em média e em desvio padrão, para um nível de significância de  $\rho < 0,05$  (Alexander et al., 2016; Romero-Franco et al., 2017).

O teste *T student* de amostras independentes foi usado para analisar se ocorreram diferenças significativas entre as células fotoelétricas e a IMU, entre o radar e a IMU e a câmara de alta velocidade e a IMU, para os parciais dos 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m e 0-40m (Romero-Franco et al., 2017). Este teste, também, foi utilizado para analisar se ocorreram diferenças significativas entre os valores de tempo da fase de apoio, da fase de balanço e respetivo tempo de passo, quando determinados pela câmara de alta velocidade e a IMU. Na análise dos parâmetros aceleração máxima, aceleração mínima, a raiz quadrada da média (RMS) e a amplitude da aceleração, que consiste na diferença entre a aceleração mínima e aceleração máxima foi igualmente aplicado o teste *T student* de amostras independentes entre a IMU e o radar.

Os testes de correlação de *Pearson* e *Spearman* foram aplicados para determinar a correlação entre os instrumentos de critério e a IMU (Alexander et al., 2016; Romero-Franco et al., 2017). Neste estudo foi aplicado a correlação das células fotoelétricas, do radar e da câmara de alta velocidade com a IMU, para os parciais dos 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m e 0-40m. Este teste, também foi usado para determinar as correlações entre os valores de tempo da fase de apoio, da fase de balanço e respetivo tempo de passo, quando determinados pela câmara de alta velocidade e a IMU. Na análise dos parâmetros de aceleração máxima, aceleração mínima, a raiz quadrada média da aceleração (RMS) e a amplitude da aceleração foi, igualmente, aplicado o teste de correlação entre a IMU e o radar. Foram considerados os valores de correlação sugeridos por Hopkins et al. (2009),  $r \leq 0,3$ , pequena;  $r$  entre 0,3 e 0,5, moderada; e  $r > 0,5$ , elevada (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Setuain et al., 2018).

Nos parâmetros temporais da fase de apoio, da fase de balanço e do tempo do passo, obtidos pela câmara de alta velocidade e a IMU foram determinadas as diferenças absolutas e considerados os limites de confiança (95%) e os gráficos de *Bland-Altman* (Alexander et al., 2016; Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Lee et al., 2010; Raper et al., 2018; Romero-Franco et al., 2017; Schmidt et al., 2016; Seidl et al., 2017). O teste *T* de uma amostra foi utilizada para determinar se as médias das diferenças apresentaram diferenças significativas quando comparado com zero. A regressão linear das diferenças entre os dois métodos de medição foram usados para determinar a presença de enviesamento proporcional, como indicado para um

gradiente significativa da linha de regressão (Kenneally-Dabrowski et al., 2018).

## 5.4 Resultados

A análise descritiva, a estatística de comparação e de correlação para os parâmetros temporais em cada intervalo de tempo e tempo total, para cada instrumento estudados, estão representadas na Tabela 5.1. Na comparação entre as células fotoelétricas e a câmara de alta velocidade com a IMU, não foram verificadas diferenças significativas (Tabela 5.1). Entre a IMU e o radar foram encontradas diferenças significativas entre os instrumentos, para o parcial dos 0-10m ( $t=-3,283$ ,  $\rho = 0,008$ ), enquanto nos restantes parciais não foram encontradas diferenças significativas (Tabela 5.1).

Nas correlações entre as células fotoelétricas e a IMU verificaram-se associações elevadas significativas, nos 0-10m ( $r = 0,960$ ,  $\rho = 0,002$ ), nos 30-40m ( $r = 0,912$ ,  $\rho < 0,011$ ) e nos 0-40m ( $r = 0,829$ ,  $\rho = 0,042$ ). Nos restantes parciais não foram obtidas correlações estatisticamente significativas (Tabela 5.1). Ao associarmos o radar com a IMU verificaram-se correlações significativas elevadas no parcial 0-10m ( $r = 0,927$ ,  $\rho = 0,008$ ), nos 10-20m ( $r = 0,829$ ,  $\rho = 0,042$ ) e nos 30-40m ( $r = 0,949$ ,  $\rho = 0,004$ ), enquanto nas restantes não se verificaram associações estatisticamente significativas. Por último, na análise entre a IMU e a câmara de alta velocidade foram encontradas associações estatisticamente significativas elevadas nos 0-10m ( $r = 0,990$ ,  $\rho = 0,000$ ), nos 10-20m ( $r = 0,980$ ,  $\rho = 0,001$ ), nos 30-40m ( $r = 0,875$ ,  $\rho = 0,022$ ) e no 0-40m, ( $r = 0,943$ ,  $\rho = 0,005$ ) e nos restantes parâmetros não se verificaram associações significativas (Tabela 5.1).

Tabela 5.1: - Estatística descritiva das células fotoelétricas, medidor de deslocamento, câmara de alta velocidade e a Unidade de Medição Inercial, diferenças sistemáticas ( $\rho \leq 0,05$ ) e correlações entre os instrumentos analisados, para os parâmetros temporais [s] 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m e tempo total

	<b>Células fo- toelétricas</b>	<b>Medidor</b>	<b>Câmara</b>	<b>IMU</b>						
	Média ( $\pm$ SD)	Média ( $\pm$ SD)	Média ( $\pm$ SD)	Média ( $\pm$ SD)	$\neq^1$	$\neq^2$	$\neq^3$	$r^1$	$r^2$	$r^3$
<b>0-10m</b> [s]	1,924 ( $\pm 0,060$ )	1,737 ( $\pm 0,620$ )	2,040 ( $\pm 0,721$ )	2,029 ( $\pm 0,636$ )	n.s.	¥	n.s.	0,960 <sup>##</sup>	0,927 <sup>##</sup>	0,990 <sup>##</sup>
<b>10-20m</b> [s]	1,231 ( $\pm 0,040$ )	1,230 ( $\pm 0,411^*$ )	1,204 ( $\pm 0,032$ )	1,215 ( $\pm 0,055$ )	n.s.	n.s.	n.s.	0,809	0,829 <sup>#</sup>	0,980 <sup>##</sup>
<b>20-30m</b> [s]	1,131 ( $\pm 0,436^*$ )	1,126 ( $\pm 0,473^*$ )	1,125 ( $\pm 0,633$ )	1,181 ( $\pm 0,042$ )	n.s.	n.s.	n.s.	0,314	0,086	0,752
<b>30-40m</b> [s]	1,110 ( $\pm 0,049$ )	1,112 ( $\pm 0,518$ )	1,141 ( $\pm 0,504$ )	1,027 ( $\pm 0,067$ )	n.s.	n.s.	n.s.	0,912 <sup>#</sup>	0,949 <sup>##</sup>	0,875 <sup>#</sup>
<b>0-40m</b> [s]	5,391 ( $\pm 0,190^*$ )	5,193 ( $\pm 0,203^*$ )	5,516 ( $\pm 0,211$ )	5,441 ( $\pm 0,205^*$ )	n.s.	n.s.	n.s.	0,829 <sup>#</sup>	0,714	0,943 <sup>##</sup>

SD – Desvio Padrão; m – metros; s – segundos; \* $\rho > 0,05$  verificou normalidade;  $\neq^1$  – análise entre as Células fotoelétricas e a IMU;  $\neq^2$  – análise entre o Radar e a IMU;  $\neq^3$  – análise entre a Câmara e a IMU; ¥ $\rho \leq 0,05$  – diferenças significativas; n.s. – não significante;  $r^1$  – correlação entre as Células fotoelétricas e a IMU;  $r^2$  – correlação entre o Radar e a IMU; ;  $r^3$  – correlação entre a Câmara e a IMU; # $\rho \leq 0,05$  e ## $\rho \leq 0,01$  – correlações significativas.

A análise descritiva, a estatística de comparação, de correlação e os intervalos de confiança para os parâmetros da fase de apoio, da fase de balanço e tempo de passo, para a câmara de alta velocidade, estão

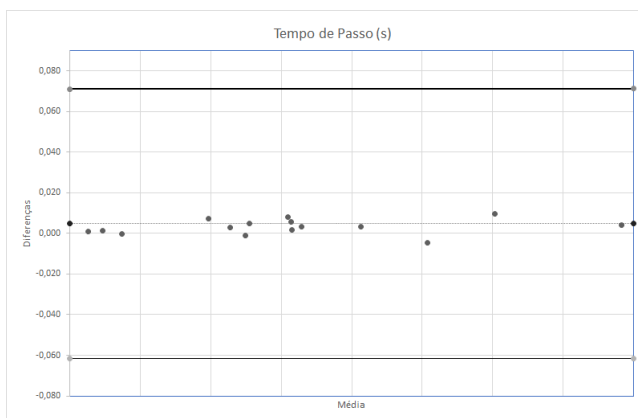
representadas na Tabela 2. Para o instrumento de critério, a câmara de alta velocidade e a IMU verificaram-se diferenças significativas para o tempo da fase de apoio e tempo da fase de voo, enquanto no tempo de passo não foram verificadas diferenças significativas (Tabela 5.2). Nos testes de correlação, o tempo da fase de apoio obteve associações elevadas significativas ( $r = -0,704$ ,  $\rho = 0,000$ ), o tempo da fase de voo não obteve associações estatisticamente significativas, enquanto, o tempo de passo obteve correlações significativas elevadas ( $r = 0,935$ ,  $\rho < 0,000$ ) (Tabela 5.1b).

O teste  $T$  de uma amostra foi determinado para analisar as diferenças para zero e verificaram-se diferenças significativas para os parâmetros temporais da fase de apoio ( $t=-4,151$ ,  $\rho = 0,001$ ) e fase de voo ( $t=4,694$ ,  $\rho = 0,000$ ) indicando um fraco nível concordância. No tempo de passo não se verificaram diferenças significativas ( $t=0,638$ ,  $\rho = 0,531$ ) indicando um elevado nível de concordância entre os dois instrumentos, permitindo aplicar os conceitos de Bland-Altman. Os intervalos de confiança estão expressos na Tabela 5.2 e visíveis na Figura 5.1a e foi possível analisar um erro não proporcional para os tempos de passo determinados ( $\rho = 0,402$ ). A regressão linear indicou um  $R^2$  de 88% (Figura 5.1b).

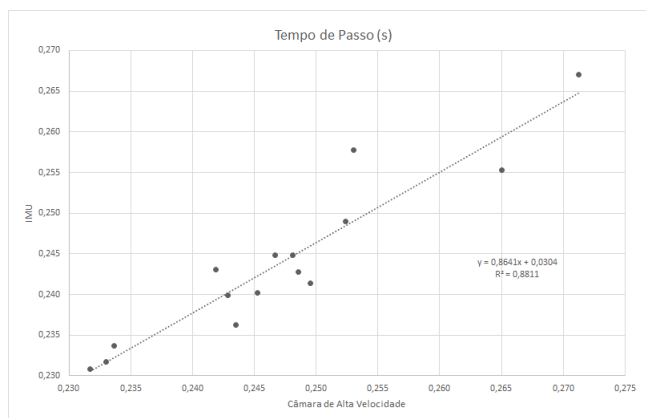
Tabela 5.2: Estatística descritiva da câmara de alta velocidade e da Unidade de Medição Inercial, diferenças sistemáticas ( $\rho \leq 0.05$ ) e correlações entre os instrumentos analisados, para os parâmetros da fase de apoio, da fase de voo e tempo de passo

	Câmara	IMU	$\neq^1$	$r^1$	Gráficos Bland & Altman BIAS (LOA 95% CI)
	Média ( $\pm$ SD)	Média ( $\pm$ SD)			
<b>Tempo da fase de apoio [s]</b>	0,120 ( $\pm 0,003$ )	0,144 ( $\pm 0,005$ )	¥	-0,704 <sup>##</sup>	-0,024 (-0,068 a 0,020) <sup>+</sup>
<b>Tempo da fase de voo [s]</b>	0,128 ( $\pm 0,001$ ) <sup>*</sup>	0,100 ( $\pm 0,006$ )	¥	-0,351	0,027 (-0,017 a 0,072) <sup>+</sup>
<b>Tempo do passo [s]</b>	0,247 ( $\pm 0,003$ )	0,244 ( $\pm 0,003$ )	n.s.	0,935 <sup>##</sup>	0,005 (-0,060 a 0,071)

SD – Desvio Padrão; s – segundos;  $^*\rho > 0,05$  verificou normalidade;  $\neq^1$  – análise entre a Câmara e o IMU; ¥ $\rho \leq 0,05$  – diferenças significativas; n.s. – não significante;  $r^1$  – correlação entre a Câmara e a IMU;  $^{\#}\rho \leq 0,05$  e  $^{\#\#}\rho \leq 0,01$  – correlações significativas; Erro – Erro sistemático; CI – Intervalo de confiança; LOA - Limites de Confiança;  $^+\rho \leq 0,01$ .



(a) Gráfico *Bland-Altman* - Tempo de Passo [s]



(b) Gráfico de regressão linear - Tempo de Passo

Figura 5.1: Gráficos de *Bland-Altman* - Unidade de Medição Inercial vs Câmara de Alta Velocidade

A análise dos parâmetros cinemáticos da aceleração máxima, mínima, RMS e amplitude, entre o radar e a IMU, estão representadas na Tabela 5.3. Na comparação entre os instrumentos indicados verificaram-se diferenças estatisticamente significativas para a aceleração máxima ( $t=3,739$ ,  $\rho = 0,002$ ), no entanto, na aceleração mínima, na RMS da aceleração e na amplitude da aceleração não se verificaram diferenças significativas. Para estes parâmetros não foram identificados correlações estatisticamente significativas (Tabela 5.3).

Tabela 5.3: Estatística descritiva do medidor de deslocamento e da Unidade de Medição Inercial, diferenças sistemáticas ( $\rho \leq 0.05$ ) e correlações entre os instrumentos analisados, para os parâmetros da aceleração máxima, mínima, raiz quadrada média e amplitude

	<b>Radar</b> Média ( $\pm$ SD)	<b>IMU</b> Média ( $\pm$ SD)	$\neq^1$	$r^1$
<b>Aceleração má- xima</b> [ $m/s^2$ ]	46,378 ( $\pm 5,110$ )	62,366 ( $\pm 4,771$ )	¥	-0,681
<b>Aceleração mí- nima</b> [ $m/s^2$ ]	-43,249 ( $\pm 3,389$ )	-33,413 ( $\pm 2,834$ )	n.s.	0,137
<b>Raiz quadrada mé- dia da aceleração</b> [ $m/s^2$ ]	14,143 ( $\pm 0,829$ )	15,642 ( $\pm 1,418$ )	n.s.	-0,216
<b>Amplitude da ace- leração</b> [ $m/s^2$ ]	89,626 ( $\pm 7,499$ )	95,779 ( $\pm 6,976$ )	n.s.	-0,514

SD – Desvio Padrão;  $\neq^1$  – análise entre a Câmara e o IMU; ¥ $\rho \leq 0,05$  – diferenças significativas; n.s. – não significante;  $r^1$  - correlação entre a Câmara e a IMU; # $\rho \leq 0,05$  e ## $\rho \leq 0,01$  – correlações significativas.

## 5.5 Discussão

A proposta deste estudo foi validar uma IMU no teste de corrida de velocidade de 40m, em atletas de elite do Atletismo, tendo como instrumentos de referência quatro pares de células fotoelétricas, um radar e uma câmara de alta velocidade em *panning*.

Na determinação dos tempos parciais 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m e 0-40m foi realizada a estatística inferencial de comparação e de correlação. Na comparação entre as células fotoelétricas, as câmaras de alta velocidade e o radar e a IMU os valores obtidos foram similares, à exceção do parcial 0-10m, no medidor de deslocamento. Estes resultados indicam que podemos utilizar a IMU na medição temporal dos parciais sugeridos. Uma das razões para as diferenças entre o radar e a IMU no parcial 0-10m pode estar associada ao desequilíbrio normalmente realizados pelos atleta nos primeiros metros da corrida. Para correção destes desequilíbrios realizou-se uma interpolação para obter os valores de deslocamento da posição zero à posição que o instrumento deteta o atleta. Na correlação entre os instrumentos de referência e a IMU, à exceção do parcial 20-30m, para as células fotoelétricas e o radar foram obtidas correlações elevadas. Com um objetivo similar, o estudo de Romero-Franco et al. (2017) apresentam correlações quase perfeitas nos resultados e sem diferenças significativas para os parciais estudados, no entanto, pretendiam validar uma aplicação de telemóvel que utiliza a sua câmara de vídeo com o radar.

Na comparação dos resultados obtidos através da câmara de alta velocidade com a IMU, o tempo da fase de apoio e o tempo da fase de balanço verificou diferenças estatisticamente significativas, enquanto, o tempo de passo obteve valores similares. Os resultados obtidos por Lee et al. (2010) não apresentaram diferenças significativas no tempo de apoio, tempo de passo e tempo do ciclo de passo. Nos testes de correlação obtivemos associações elevadas para o tempo de apoio e de passo, tal como Lee et al. (2010)

que obteve valores de associação elevadas ( $r= 0,91$ ), para o tempo da fase de apoio e tempo de passo. Na determinação dos intervalos de confiança para o tempo da fase de apoio, o tempo da fase de balanço e o tempo de passo obteve-se valores inferiores a 0,02s, no tempo de fase de apoio e a 0,08s no tempo da fase de voo e tempo de passo. No enviesamento foi -0,024s, 0,027s e 0,005s, para o tempo da fase de apoio, o tempo de fase de balanço e tempo de passo, respetivamente. Lee et al. (2010) obteve valores inferiores a 0,02s, para o tempo da fase de apoio e tempo de passo e valores de enviesamento inferiores a 0,0008s, para o tempo da fase de apoio e tempo de passo. Estes resultados indicaram que a IMU pode ser aplicada na zona da apófise espinhosa L5 e obter resultados de confiança para o tempo de passo (Lee et al., 2010). Desta forma, será possível realizar avaliações da corrida durante 40m fora do laboratório e obter um dos parâmetros mais importante na velocidade e no Atletismo, a frequência de passo (Kratky et al., 2016; Kratky and Müller, 2013).

Na determinação dos valores de aceleração máxima, mínima, o RMS da aceleração e amplitude da aceleração entre a IMU e o radar foram analisados os valores de aceleração vertical da IMU e a curva de aceleração obtida através da derivada do deslocamento obtido com o radar. Na comparação entre instrumentos foram verificados valores similares da aceleração mínima, do RMS da aceleração e na amplitude de aceleração, enquanto, na aceleração máxima foram detetadas diferenças estatisticamente significativas entre a IMU e o radar. Uma das razões para a obtenção destes resultados pode estar associada ao radar não estar em contacto permanente com o atleta, enquanto a IMU está colocada na zona da apófise espinhosa L5 do atleta e desta forma ocorrerem maiores valores de aceleração máxima, associado ainda, que os valores máximos de aceleração ocorrem durante a fase de apoio do atleta. Esta indicação, também, está associada aos valores mínimos de aceleração, pois esta ocorre na fase de balanço e em ambos os instrumentos não há ocorrência de impactos, obtendo, assim valores semelhantes para os instrumentos estudados.

Na aceleração máxima entre a IMU e o radar foram obtidas diferenças significativas e foram obtidas associações elevadas, indicando que embora os valores máximos sejam diferentes, há uma tendência convergente na interpretação deste valor. Na amplitude de aceleração foram obtidas correlações elevadas indicando que a amplitude média entre a aceleração mínima e máxima têm um comportamento idêntico entre instrumentos. No entanto, nos restantes parâmetros analisados entre a IMU e o radar foram obtidas correlações pequenas, não se verificando uma tendência entre os instrumentos analisados.

## 5.6 Conclusões

O estudo proposto permitiu validar a IMU tendo como critério de referência diferentes instrumentos, as células fotoelétricas, um radar e uma câmara de alta velocidade em *panning*.

Os resultados obtidos indicaram que a IMU permite substituir as células fotoelétricas nos parciais propostos e no radar. A IMU, permitiu, ainda, indicar que os valores de aceleração obtidos são válidos, se for aplicado o tratamento de dados correto.

Permite substituir os resultados quantitativos obtidos através de uma câmara de alta velocidade, pelos parâmetros temporais válidos obtidos pela IMU, relativamente, ao tempo de passo e respetiva frequência de passo no teste de velocidade de 40m. A avaliação dos parâmetros entre os 0m e os 40m, também, apresentaram resultados válidos.

O estudo não permitiu validar os parâmetros cinéticos pela limitação de espaço e de número de plataformas de força no decorrer do estudo.

Em suma, este estudo indicou que a IMU pode substituir os instrumentos de referência propostos, tendo a vantagem de ter um instrumento mais informativo, útil, de baixo custo, fácil aplicação e com somente um



instrumento foi possível determinar o tempo de passo e interpretar a aceleração obtida, para os parciais propostos dos 0m aos 40m.

## 5.7 Referências Bibliográficas

- Alexander, J. P., Hopkinson, T. L., Wundersitz, D. W., Serpell, B. G., Mara, J. K., and Ball, N. B. (2016). Validity of a Wearable Accelerometer Device to Measure Average Acceleration Values during High-Speed Running. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(11):3007–3013.
- Bailey, G. P. and Harle, R. (2014). Assessment of Foot Kinematics During Steady State Running Using a Foot-mounted IMU. *Procedia Engineering*, 72:32–37.
- Bailey, G. P. and Harle, R. k. (2016). A Portable, Inexpensive Point-Tracking System for Validation of Wearable Biomechanics Sensors. *Proceedings of the 4th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support*, (icSPORTS):115–123.
- Hopkins, W., a.M. Batterham, Marshall, S., and Hanin, J. (2009). Progressive Statistics. *Sportsci.org*, 2009:55–70.
- Kenneally-Dabrowski, C. J., Serpell, B. G., and Spratford, W. (2018). Are accelerometers a valid tool for measuring overground sprinting symmetry? *International Journal of Sports Science and Coaching*, 13(2):270–277.
- Kiernan, D., Hawkins, D. A., Manoukian, M. A., McKallip, M., Oelsner, L., Caskey, C. F., and Coolbaugh, C. L. (2018). Accelerometer-based prediction of running injury in National Collegiate Athletic Association track athletes. *Journal of Biomechanics*, 73:201–209.
- Kratky, S., Buchecker, M., Pfusterschmied, J., Szekely, C., and Müller, E. (2016). Effects of a Body-Weight Supporting Kite on Sprint Running Kinematics in Well-Trained Sprinters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(1).
- Kratky, S. and Müller, E. (2013). Sprint Running With a Body-Weight Supporting Kite Reduces Ground Contact Time in Well-Trained Sprinters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(5).
- Kuznietsov, A. (2012). Inertial measurement system for performance evaluation of track and field sprinters. In *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, pages 1681–1686.
- Lee, J. B., Mellifont, R. B., and Burkett, B. J. (2010). The use of a single inertial sensor to identify stride, step, and stance durations of running gait. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2):270–273.
- MacDonald, K., Bahr, R., Baltich, J., Whittaker, J. L., and Meeuwisse, W. H. (2017). Validation of an inertial measurement unit for the measurement of jump count and height. *Physical Therapy in Sport*, 25:15–19.
- Nielsen, E. T., Jørgensen, P. B., Mechlenburg, I., and Sørensen, H. (2019). Validation of an inertial measurement unit to determine countermovement jump height. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 16:8–13.
- Raper, D. P., Witchalls, J., Philips, E. J., Knight, E., Drew, M. K., and Waddington, G. (2018). Use of a tibial accelerometer to measure ground reaction force in running: A reliability and validity comparison with force plates. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(1):84–88.
- Romero-Franco, N., Jiménez-Reyes, P., Castaño-Zambudio, A., Capelo-Ramírez, F., Rodríguez-Juan, J. J., González-Hernández, J., Toscano-Bendala, F. J., Cuadrado-Peñafiel, V., and Balsalobre-Fernández, C. (2017). Sprint performance and mechanical outputs computed with an iPhone app: Comparison with existing reference methods. *European Journal of Sport Science*, 17(4):386–392.

- Schmidt, M., Rheinländer, C., Nolte, K. F., Wille, S., Wehn, N., and Jaitner, T. (2016). IMU- based Determination of Stance Duration During Sprinting. *Procedia Engineering*, 147:747–752.
- Seidl, T., Linke, D., and Lames, M. (2017). Estimation and validation of spatio-temporal parameters for sprint running using a radio-based tracking system. *Journal of Biomechanics*, 65:89–95.
- Setuain, I., Lecumberri, P., Ahtiainen, J. P., Mero, A. A., Häkkinen, K., and Izquierdo, M. (2018). Sprint mechanics evaluation using inertial sensor-based technology: A laboratory validation study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(2):463–472.
- Vince, J. (2011). *Quaternions for Computer Graphics*, volume 53. Springer-Verlag London, Bournemouth, UK, 1 edition.
- Winter A., D. (2005). *Biomechanics and motor control of human movement*. 3rd edition.
- Wixted, A. J., Billing, D. C., and James, D. A. (2010). Validation of trunk mounted inertial sensors for analysing running biomechanics under field conditions, using synchronously collected foot contact data. *Sports Engineering*, 12(4):207–212.
- Wu, G. and Cavanagh, P. R. (1995). ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, 28(10):1257–1261.



# 6

Interpretação da aceleração obtida por uma IMÚ e os parâmetros cinéticos e cinemáticos obtidos por uma plataforma de força, no CMJ, em atletas de elite, no Atletismo

## 6.1 Resumo

Introdução: As IMUs são dispositivos integrados de registo de acelerações, de velocidade angulares e magnetismos. As IMU têm sido validadas nos testes de VJ, mais especificamente na variável altura de salto. Ainda não se verificaram estudos que correlacionem a aceleração obtida pela IMU com os parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos obtidos por uma FP, neste sentido, o objetivo deste estudo foi investigar a correlação da aceleração vertical obtida pela IMU com os parâmetros cinéticos e cinemáticos obtidos pela FP, no CMJ, num grupo de atletas de elite no Atletismo.

Métodos: Oito atletas de elite (seis masculinos e dois femininos;  $26 \pm 3,61$  anos) realizaram três saltos de CMJ com a IMU na apófise espinhosa L5 e foram considerados os parâmetros de aceleração, que foram associados com parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos obtidos pela FP. O teste estatístico de correlação de *Pearson* e *Spearman* foram aplicados.

Resultados: As acelerações verticais obtidas pela IMU tiveram correlações elevadas com a altura de salto, a potência vertical máxima, a força vertical mínima, a amplitude da força vertical, a velocidade vertical mínima, a amplitude da velocidade vertical, o RMS da velocidade vertical e a força mínima na fase excêntrica. Os modelos de regressão linear indicaram que os parâmetros cinéticos e cinemáticos obtidos pela FP explicaram a aceleração vertical máxima 44,50%, a aceleração vertical mínima 22,49%, a amplitude da aceleração vertical 57,99% e o RMS da aceleração vertical 83,62%.

Conclusões: Este estudo permitiu indicar que maiores acelerações verticais estão associadas a maiores alturas de salto, a grandes potências musculares dos membros inferiores e grandes forças máximas e as maiores forças na fase excêntrica. Para além disso sugere a utilização do RMS da aceleração vertical para compreender o rendimento do CMJ. Neste sentido, este estudo permite sugerir a aplicação da IMU por este obter informação rica, a baixo custo, com fácil aplicabilidade e portabilidade.

**Palavras-chaves:** IMU; Aceleração; Força; e CMJ

## 6.2 Introdução

A habilidade motora de saltar tem sido estudada ao longo dos anos (Aragón-Vargas and Melissa Gross, 1997; González-Badillo and Marques, 2010) e um dos objetivos do salto vertical (VJ) é alcançar a melhor velocidade de saída, para obter a melhor altura de salto (Dowling and Vamos, 1993). Diversos estudos têm sido realizados para compreender qual a influência dos parâmetros cinemáticos e cinéticos no máximo rendimento do VJ. Foram identificados para uma maior altura de salto, maiores níveis de força (Dowling and Vamos, 1993; Mandic et al., 2015), de velocidade (Dowling and Vamos, 1993; Ferragut et al., 2003; González-Badillo and Marques, 2010), de capacidade para acelerar (Ferragut et al., 2003), de impulso vertical (Ferragut et al., 2003; Sánchez-Sixto et al., 2018), de coordenação motora dos indivíduos (Aragón-Vargas and Melissa Gross, 1997; Dowling and Vamos, 1993), de massa muscular dos membros inferiores (Ferragut et al., 2003), no entanto, a potência muscular é o principal indicador de rendimento do VJ (Aragón-Vargas and Melissa Gross, 1997; Dowling and Vamos, 1993; González-Badillo and Marques, 2010; Mandic et al., 2015).

Diversos estudos têm proposto a análise da correlação dos parâmetros cinemáticos e cinéticos com a altura de salto. Dowling and Vamos (1993) propuseram o estudo da curva força-tempo do VJ para identificar as características temporais e cinéticas no rendimento do salto, verificando uma relação positiva e elevada entre a potência máxima e a habilidade de saltar. Aragón-Vargas and Melissa Gross (1997) analisaram as diferenças entre os fatores cinesiológicos e o rendimento dos VJ identificando a importância do pico de potência no rendimento do VJ. González-Badillo and Marques (2010) com o objetivo de analisar o contributo da força, potência, impulso e velocidade com a altura de salto no teste de salto de contramovimento (CMJ), mostraram que o pico de potência máxima é um importante fator para o aumento da altura de salto, assim como, a força produzida na fase excêntrica e na fase concêntrica.

Estudos de simulação dos VJs têm correlacionado um conjunto de variáveis com o rendimento do salto. Aragón-Vargas and Melissa Gross (1997) reuniram um conjunto de variáveis indicadas em outros estudos, para compreender, através de um modelo teórico, a correlação dos fatores críticos cinesiológicos com o rendimento do VJ, indicando que o pico de potência mecânica é uma variável preditora no rendimento dos saltos verticais. Ferragut et al. (2003) reuniram diversas variáveis, associaram com a altura de salto e sugeriram que a altura de salto realizada pelos atletas teve como variáveis preditoras, o impulso mecânico positivo realizado na fase de impulsão vertical, a massa muscular dos membros inferiores e a percentagem entre a massa muscular dos membros inferiores e a massa corporal do atleta.

Nos VJ, o deslocamento que os sujeitos realizam durante a flexão dos joelhos, indica a variação vertical (profundidade). Mandic et al. (2015) e Sánchez-Sixto et al. (2018) analisaram a influência da flexão durante o VJ com o rendimento do salto. Estes estudos indicaram que um maior impulso vertical permite uma maior altura de salto, observando, também, que a velocidade na fase descendente foi maior quando o deslocamento vertical foi maior (Ferragut et al., 2003; Sánchez-Sixto et al., 2018). Embora, Mandic et al. (2015) identifiquem que o deslocamento vertical realizado tem um efeito no resultado da força e potência realizada, determinando um impacto decisivo na eficácia do CMJ, pois este não identificou associações elevadas com o rendimento do CMJ, sugerindo que a profundidade do CMJ pode ser ignorada nos procedimentos de treino e testes.

Muitos estudos analisaram a relação dos parâmetros cinemáticos e cinéticos, com o rendimento da altura de salto, através da plataforma de força (FP) (Dowling and Vamos, 1993; Ferragut et al., 2003; González-Badillo and Marques, 2010; Mandic et al., 2015; Sánchez-Sixto et al., 2018), indicando, o impulso vertical e a potência muscular como fatores determinantes no rendimento dos saltos, permitindo compreender como aplicar este tipo de execução em treino e interpretar a informação obtida. A identificação das FPs como meio de obter a informação cinética (Dowling and Vamos, 1993; Ferragut et al., 2003; González-Badillo

and Marques, 2010; Mandic et al., 2015; Sánchez-Sixto et al., 2018), é fundamental em biomecânica, por permitir obter resultados com uma elevada precisão e validade, no entanto, os preços bastante elevados e transportes difíceis são uma grande limitação para a maioria dos utilizadores (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Buckthorpe et al., 2012; Castagna et al., 2013; Carlos-Vivas et al., 2018; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019), principalmente para treinadores cujos atletas realizam estágios e competições em diversos locais do Mundo. Novos instrumentos têm surgido para colmatar essas dificuldades, tais como as Unidades de Medição Inercial (IMU), que são dispositivos integrados de registo de acelerações lineares, velocidades angulares e do norte magnético da terra, permitindo calcular o deslocamento e direção dos movimentos através da informação recolhida. Este instrumento tem sido aplicado em estudos de validação dos VJ, nomeadamente no CMJ, indicando uma validade e consistência na determinação da altura de salto (Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011). A necessidade de utilizar instrumentos de fácil aplicabilidade no treino, justificam as seguintes questões: “Será que a aceleração obtida pela IMU tem uma associação elevada com a altura de salto, força vertical, potência vertical e impulsos na fase excêntrica e concêntrica, parâmetros obtidos pela FP?”. O objetivo deste estudo foi investigar a correlação dos parâmetros cinéticos, de força, potência e impulso, e dos parâmetros cinemáticos, de velocidade obtidos por uma FP com a aceleração vertical obtida diretamente da IMU, num grupo de atletas de elite no Atletismo.

## 6.3 Métodos

### 6.3.1 Amostra

Foram incluídos no estudo oito atletas de elite (seis masculinos e dois femininos;  $26 \pm 3,61$  anos), com representação internacional pelos seus países. Todos os sujeitos tiveram informação dos objetivos do estudo e assinaram o protocolo que foi aprovado pelo conselho de ética da Universidade de Évora e está de acordo com os princípios de ética da Declaração de Helsínquia.

### 6.3.2 Equipamento

A IMU desenvolvida neste estudo, que é constituída por um acelerómetro tridimensional (3D), um giroscópio 3D e um magnetómetro 3D, a recolher a 275 dados por segundo (275 Hz) foi aplicada. Uma FP, Bertec (Columbus, USA), de 1,2m x 0,6m, a recolher a 1000Hz, foi usada para recolher os parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos selecionados. O Qualisys Track Manager e o Spyder - Python 3.7 foram usados para recolher os dados da FP e da IMU, respetivamente.

### 6.3.3 Procedimentos

A amostra foi informada sobre os objetivos e o atleta realizou o aquecimento estipulado pelo seu treinador. Foi explicada a realização do CMJ. O atleta iniciou o movimento na posição vertical estática, realizou uma flexão do joelho a  $90^\circ$  e de seguida um salto, finalizando o movimento na posição em que iniciou, com os braços colocados à cintura, o salto foi realizado, o mais alto e rápido possível, na FP e com a IMU fixa com fita adesiva na superfície e na zona da apófise espinhosa L5, sendo referência para o Centro de Gravidade (CG) (Camomilla et al., 2018; Nielsen et al., 2019). Os atletas realizaram três CMJ cada e com um descanso de um minuto entre cada salto.



### 6.3.4 Processamento de dados

A recolha de dados foi realizada através do *Spyder 3.3.3 (Python Project Contributors)*, que exportou um ficheiro em formato *MO Excel 2018* e a análise de dados foi realizada através do *Scylab 6.0.1 (ESI Group, France, 2018)*.

Foi considerado o sistema de coordenadas definido pela Sociedade Internacional de Biomecânica (ISB) (Wu and Cavanagh, 1995). Através da IMU foram obtidos os dados da aceleração 3D ( $m/s^2$ ), no sistema de coordenadas local do IMU, e os dados do giroscópio ( $^\circ/s$ ), (Nielsen et al., 2019) através dos quais foram calculados os *quaternions* para obter a orientação do sensor relativamente ao sistema de coordenadas global da IMU (Vince, 2011). Em cada salto foi removida a aceleração da gravidade da aceleração recolhida inicialmente da IMU. Antes de iniciar a tarefa, o atleta ficou cerca de 30 segundos parado para obter a aceleração de base e realizou um salto antes para definir o critério inicial de ambos os instrumentos.

A partir da IMU foram considerados os valores tratados da aceleração no eixo vertical e calculados a aceleração vertical máxima, a aceleração vertical mínima, a amplitude da aceleração vertical, que consistiu na diferença entre o valor máximo e mínimo da aceleração e a raiz quadrada da média (RMS) da aceleração vertical.

No CMJ foram definidas as fases representadas na Figura 6.1 (Dowling and Vamos, 1993; Jidovtseff et al., 2014; Toumi et al., 2004).

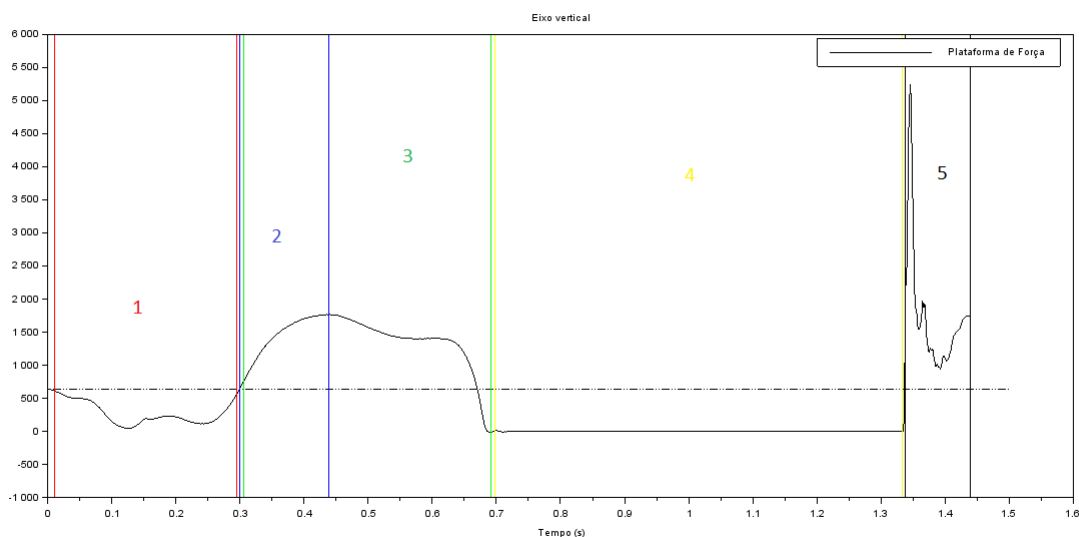


Figura 6.1: Definição das fases do CMJ;1- Fase excêntrica;2- Fase da taxa de produção de força; 3- Fase concêntrica; 4- Fase de voo; 5- Fase de queda

Nos parâmetros cinemáticos, a altura de salto foi calculada através da equação de queda livre (equação 6.1) (Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011), onde  $h$ , é a altura de salto;  $t$ , é o tempo de voo; e  $g$ , a aceleração gravítica, cujo valor foi de  $9.806 m/s^2$ , à latitude recolhida.

$$h = (t^2 \cdot g)/8 [m] \quad (6.1)$$

A velocidade vertical (equação 6.3) foi obtida através da integral da aceleração vertical, que foi determinada

através da equação 6.2 (Nielsen et al., 2019).

$$a_y = 1/BM \cdot (F_y - BW) [m/s^2] \quad (6.2)$$

$$v = v_0 + \int_{t_0}^t a_{correct} dt [m/s] \quad (6.3)$$

Os parâmetros cinéticos, a força vertical foi recolhida diretamente da FP. Para determinar a potência vertical máxima foi usada a equação 6.4, enquanto a potência vertical média foi usada a equação 6.5, onde  $P_{ymax}$  e  $P_{ymedia}$  é a potência máxima e a potência média, respetivamente, em  $W$ ;  $h$ , a altura em  $m$ ; e  $BM$ , a massa corporal em  $Kg$  (Harman et al., 1991).

$$P_{ymax} = (61.9 * (h * 100) + (36 * BM + 1,822)) [W] \quad (6.4)$$

$$P_{ymedia} = (21,2 * (h * 100) + (23 * BM + 1,393)) [W] \quad (6.5)$$

O impulso foi determinado pela equação 6.6, onde  $I$ , é o impulso;  $F_y$ , a força vertical; e  $t$ , o tempo, para determinar o impulso na fase excêntrica. A taxa de produção de força foi calculada pela equação 6.7, onde  $RFD$  é a taxa de produção de força;  $F_y$  e  $t$ , são a força vertical e o tempo realizados durante essa fase, respetivamente. Determinou-se, ainda, a taxa de produção de força absoluta máxima e a taxa de produção de força relativa, obtida através da divisão entre a taxa de produção de força absoluta máxima pela massa corporal.

$$I = F_y \cdot t [N.s] \quad (6.6)$$

$$RFD = F_y/t [N/s] \quad (6.7)$$

Os dados da IMU foram suavizados através de um filtro *Butterworth* passa baixo e a frequência de corte foi determinada pela análise da potência espectral (Winter A., 2005; Nielsen et al., 2019) e aplicado no eixo vertical uma frequência de corte de 45Hz. Os dados recolhidos pela FP, antes do atleta saltar, foram recolhidos os dados de base da FP, determinou-se a média desses valores, subtraindo esse valor médio aos dados recolhidos no CMJ, considerando desta forma o *offset* da FP.

### 6.3.5 Análise Estatística

Os testes de correlação de *Pearson* e *Spearman* foram calculados, para determinar a associação entre os parâmetros de aceleração definidos na IMU com os parâmetros determinados pela FP (González-Badillo and Marques, 2010) e foram considerados os valores de correlação sugeridos por Hopkins et al. (2009),  $r \leq 0,3$ , pequena;  $r$  entre 0,3 e 0,5, moderada; e  $r > 0,5$ , elevada (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Setuain et al., 2018).

No desenvolvimento dos modelos de predição foi usada a regressão linear com o método de *enter*. O modelo apresentado teve em consideração as correlações entre a variável dependente e as variáveis independentes cujo grau de significância foi  $\rho \leq 0,05$ .

## 6.4 Resultados

A aceleração vertical foi obtida diretamente da IMU e foi decomposta em máxima, mínima, a diferença entre a máxima e a mínima (amplitude) e a raiz quadrada média (RMS). Os valores médios para aceleração máxima foram de  $36,716 \pm 22,061 m/s^2$ , a aceleração mínima obteve  $-35,184 \pm 8,104 m/s^2$ , a sua amplitude foi de  $71,900 \pm 22,317 m/s^2$ , enquanto o RMS foi de  $10,225 \pm 1,737 m/s^2$  (Tabela 6.1). Na FP foram obtidos os valores médios para os seguintes parâmetros cinemáticos, altura de salto com  $0,545 \pm 0,065 m$ , velocidade vertical mínima com  $-3,583 \pm 0,335 m/s$ , amplitude da velocidade vertical com  $6,677 \pm 0,395 m/s$  e o RMS da velocidade vertical com  $1,697 \pm 0,134 m/s$  (Tabela 6.1). Relativamente, aos valores médios obtidos nos parâmetros cinéticos foram os seguintes, potência vertical média com  $2840,582 \pm 271,761 W$ , potência vertical máxima com  $6011,279 \pm 568,128 W$ , força vertical mínima com  $-23,691 \pm 11,205 N$ , amplitude da força vertical com  $5940,988 \pm 1641,979 N$ , a taxa de produção de força absoluta com  $14010,493 \pm 3507,142 N/s$ , e relativa com  $193,452 \pm 47,012 N/s/Kg$  e na fase excêntrica, a força mínima foi de  $193,452 \pm 47,012 N$  e o impulso foi  $-117,964 \pm 21,900 N \cdot s$  (Tabela 6.1).

Os resultados de correlação entre os parâmetros selecionados através da FP e os valores de aceleração vertical obtidos pela IMU estão representados na Tabela 6.2 para compreender a aplicação da IMU no CMJ. Na aceleração vertical máxima da IMU verificou-se um grau de associação elevado com a altura de salto ( $r = 0,527$  e  $\rho = 0,003$ ), potência máxima ( $r = 0,504$  e  $\rho = 0,005$ ), amplitude da força vertical ( $r = 0,630$ ,  $\rho = 0,000$ ) e amplitude da velocidade vertical ( $r = 0,568$  e  $\rho < 0,001$ ). A potência média obteve um valor de correlação moderado ( $r = 0,416$  e  $\rho = 0,022$ ), bem como a velocidade vertical mínima ( $r = -0,406$  e  $\rho = 0,026$ ), enquanto os restantes parâmetros não obtiveram qualquer correlação estatisticamente significativa (Tabela 6.2).

Na aceleração vertical mínima verificou-se uma associação elevada com a força vertical mínima ( $r = -0,541$  e  $\rho = 0,002$ ) e uma correlação moderada com a taxa de produção de força relativa ( $r = 0,370$  e  $\rho = 0,044$ ) e o Impulso na Fase Excêntrica ( $r = 0,369$  e  $\rho = 0,045$ ), quanto aos outros parâmetros não se verificam correlações estatisticamente significativas (Tabela 6.2).

A amplitude da aceleração vertical obteve uma associação elevada com a altura de salto ( $r = -0,595$  e  $\rho = 0,001$ ), a amplitude de força vertical ( $r = 0,608$  e  $\rho = 0,000$ ), a amplitude de velocidade vertical ( $r = 0,613$  e  $\rho = 0,000$ ). As correlações moderadas foram obtidas na potência máxima ( $r = 0,391$  e  $\rho = 0,033$ ), na velocidade vertical mínima ( $r = -0,494$  e  $\rho = 0,006$ ), no RMS da velocidade vertical ( $r = 0,389$  e  $\rho < 0,034$ ), na taxa de produção de força absoluta ( $r = 0,390$  e  $\rho = 0,033$ ) e relativa ( $r = 0,399$  e  $\rho = 0,029$ ) e na força mínima na fase excêntrica ( $r = -0,439$  e  $\rho = 0,015$ ). Sobre os outros parâmetros não se analisaram associações estatisticamente significativas (Tabela 6.2).

Na análise do RMS da aceleração vertical foram obtidas correlações elevadas com a altura de salto ( $r = 0,618$  e  $\rho = 0,000$ ), a amplitude da força vertical ( $r = 0,637$  e  $\rho = 0,000$ ), a velocidade vertical mínima ( $r = -0,537$  e  $\rho = 0,002$ ), a amplitude da velocidade vertical ( $r = 0,629$  e  $\rho = 0,000$ ). A força vertical mínima ( $r = 0,500$  e  $\rho = 0,005$ ), o RMS da velocidade vertical ( $r = 0,497$  e  $\rho = 0,005$ ), a taxa de produção de força absoluta ( $r = 0,382$  e  $\rho = 0,037$ ) e a força mínima na fase excêntrica ( $r = -0,491$  e  $\rho = 0,006$ ) obtiveram correlações moderadas. Os restantes parâmetros não obtiveram correlações estatisticamente significativas (Tabela 6.2).

Os modelos de regressão linear realizadas procuraram vários modelos cujo objetivo foi indicar variáveis preditivas com as várias acelerações obtidas através da IMU e foi considerado o modelo que melhor explica cada uma das acelerações. Na aceleração vertical máxima verificou-se que o modelo proposto (tabela 6.3) permite explicar 44,50% (figura 6.2a). A equação 6.8 representa a equação de regressão obtida através da tabela 6.3, em que  $h$ , é a altura de salto,  $P_{ymedia}$ , é a potência média,  $F_{yamp}$ , é a amplitude da força vertical,  $v_{ymin}$ , é a velocidade vertical mínima e  $v_{yamp}$ , é a amplitude da velocidade vertical. A amplitude

Tabela 6.1: Estatística descritiva dos parâmetros analisados na Unidade de Medição Inercial e na Plataforma de Força

Parâmetros analisados	IMU	FP
	Média ( $\pm$ SD)	Média ( $\pm$ SD)
<b>Aceleração Vertical Máxima</b> [ $m/s^2$ ]	36,716 ( $\pm$ 22,061)*	
<b>Aceleração Vertical Mínima</b> [ $m/s^2$ ]	-35,184 ( $\pm$ 8,104)	
<b>Aceleração Vertical - Amplitude</b> [ $m/s^2$ ]	71,900 ( $\pm$ 22,317)*	
<b>Aceleração Vertical - RMS</b> [ $m/s^2$ ]	10,225 ( $\pm$ 1,737)*	
<b>Altura de Salto</b> [ $m$ ]		0,545 ( $\pm$ 0,065)
<b>Potência Vertical Média</b> [ $W$ ]		2840,582 ( $\pm$ 271,761)*
<b>Potência Vertical Máxima</b> [ $W$ ]		6011,279 ( $\pm$ 568,128)*
<b>Força Vertical Mínima</b> [ $N$ ]		-23,691 ( $\pm$ 11,205)
<b>Força Vertical – Amplitude</b> [ $N$ ]		5940,988 ( $\pm$ 1641,979)
<b>Velocidade Vertical Mínima</b> [ $m/s$ ]		-3,583 ( $\pm$ 0,335)
<b>Velocidade Vertical – Amplitude</b> [ $m/s$ ]		6,677 ( $\pm$ 0,395)
<b>Velocidade Vertical – RMS</b> [ $m/s$ ]		1,697 ( $\pm$ 0,134)
<b>Taxa de Produção de Força absoluta</b> [ $N/s$ ]		14010,493 ( $\pm$ 3507,142)
<b>Taxa de Produção de Força relativa</b> [ $N/s/Kg$ ]		193,452 ( $\pm$ 47,012)*
<b>Força Mínima na Fase Excêntrica</b> [ $N$ ]		106,661 ( $\pm$ 121,186)*
<b>Impulso na Fase Excêntrica</b> [ $N \cdot s$ ]		-117,964 ( $\pm$ 21,900)

Acc<sub>y</sub> - Aceleração vertical; SD – Desvio Padrão; \* $\rho > 0,05$  verificou normalidade.

da força vertical foi a única variável que apresentou valores estatisticamente significativos ( $\rho = 0,024$ ).

$$acc_{y_{max}} = 188,590 + 529,986 * h + 0,004 * P_{y_{media}} + 0,006 * F_{y_{amp}} + 7,126 * v_{y_{min}} - 69,310 * v_{y_{amp}} [m/s^2] \quad (6.8)$$

O modelo proposto para a aceleração vertical mínima (tabela 6.4) permite explicar 22,49% (Figura 6.2b).

Tabela 6.2: Estatística do teste de correlação entre a aceleração vertical obtida através da Unidade de Medição Inercial e os parâmetros cinemáticos e cinéticos obtidos na Plataforma de Força

	<b>Aceleração Vertical Máxima</b> [ $m/s^2$ ]	<b>Aceleração Vertical Mínima</b> [ $m/s^2$ ]	<b>Aceleração Vertical - Amplitude</b> [ $m/s^2$ ]	<b>Aceleração Vertical - RMS</b> [ $m/s^2$ ]
<b>Altura de Salto</b> [m]	0,527**	-0,066	-0,595**	0,618**
<b>Potência Média</b> [W]	0,416*	0,225	0,241	0,179
<b>Potência Máxima</b> [W]	0,504**	0,171	0,391*	0,321
<b>Força Vertical Mínima</b> [N]	0,183	-0,541**	0,323	0,500**
<b>Força Vertical – Amplitude</b> [N]	0,630**	-0,058	0,608**	0,637**
<b>Velocidade Vertical Mínima</b> [ $m/s$ ]	-0,406*	0,141	-0,494**	-0,537**
<b>Velocidade Vertical – Amplitude</b> [ $m/s$ ]	0,568**	-0,061	0,613**	0,629**
<b>Velocidade Vertical – RMS</b> [ $m/s$ ]	0,311	-0,149	0,389*	0,497**
<b>Taxa de Produção de Força absoluta</b> [ $N/s$ ]	0,378	-0,269	0,390*	0,382*
<b>Taxa de Produção de Força relativa</b> [ $N/s$ ]	0,259	-0,370*	0,399*	-0,360
<b>Força Mínima na Fase Excêntrica</b> [N]	-0,210	0,356	-0,439*	-0,491**
<b>Impulso na Fase Excêntrica</b> [ $N \cdot s$ ]	-0,257	-0,369*	-0,296	-0,253

\* $\rho < 0,05$  e \*\* $\rho < 0,01$  – correlações significativas.

Tabela 6.3: Modelo de regressão para a aceleração vertical máxima

Variável Preditora	Aceleração Vertical Máxima		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	188,590		0,597
Altura de Salto	529,986	1,564	0,409
Potência Média	0,004	0,046	0,855
Força Vertical – Amplitude	0,006	0,463	0,024
Velocidade Vertical Mínima	7,126	0,108	0,761
Velocidade Vertical – Amplitude	-69,310	-1,242	0,528

B - Coeficientes não padronizados; -  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

A equação 6.9 representa a equação de regressão obtida através da tabela 6.4, em que a amplitude da força vertical foi a única variável que apresentou valores estatisticamente significativos ( $\rho = 0,020$ ). Na equação 6.9,  $F_{ymin}$ , é a força vertical mínima,  $RFD/Kg$ , é a taxa de produção de força relativa e o  $I_{Fexc}$ , é o impulso na fase excêntrica.

$$acc_{ymin} = -31,120 - 0,314 * F_{ymin} - 0,026 * RFD/Kg + 0,054 * I_{Fexc} [m/s^2] \quad (6.9)$$

Tabela 6.4: Modelo de regressão para a aceleração vertical mínima

Variável Preditora	Aceleração Vertical Mínima		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	-31,120		0,004
Força Vertical Mínima	-0,314	-0,434	0,020
Taxa de Produção de Força relativa	-0,026	-0,153	0,407
Impulso na Fase Excêntrica	0,054	0,147	0,425

B - Coeficientes não padronizados; -  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

A amplitude da aceleração vertical obteve uma explicação de 59,05% (Figura 6.2c) para o modelo proposto que foi realizado através da tabela 6.5. A equação de regressão 6.11 permite determinar a amplitude da aceleração vertical, através de  $h$ , que é a altura de salto, de  $P_{ymax}$ , que é a potência máxima, de  $F_{yamp}$ , que é a amplitude da força vertical, de  $v_{ymin}$ , que é a velocidade vertical mínima, de  $v_{yamp}$ , que é a amplitude da velocidade, de  $v_{yrms}$  que o RMS da velocidade vertical, de  $RFD$ , que é a taxa de produção de força absoluta, de  $RFD/Kg$ , que é a taxa de produção de força relativa e de  $I_{Fexc}$ , que é o impulso na fase excêntrica. No conjunto de variáveis que obtiveram uma correlação estatisticamente significativa  $\rho < 0,05$ , a amplitude de força vertical foi a única variável que obteve valores estatisticamente significativos ( $\rho = 0,005$ ).

$$acc_{yamp} = -70,916 - 253,744 * h + 0,061 * P_{ymax} + 0,009 * F_{yamp} - 9,933 * v_{ymin} - 5,897 * v_{yamp} - 90,215 * v_{yrms} - 0,011 * RFD + 0,954 * RFD/Kg - 0,076 * I_{Fexc} [m/s^2] \quad (6.10)$$

No RMS da aceleração vertical verificou-se que o modelo proposto (tabela 6.6) permite explicar 81,23% da variação da variável dependente (figura 6.2). A equação 6.11 representa a equação de regressão obtida

Tabela 6.5: Modelo de regressão para a amplitude da aceleração vertical

Variável Preditora	Amplitude da Aceleração Vertical		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	-70,916		0,886
Altura de Salto	-253,744	-0,740	0,802
Potência Máxima	0,061	1,563	0,503
Força Vertical – Amplitude	0,009	0,631	0,005
Velocidade Vertical Mínima	-9,933	-0,149	0,712
Velocidade Vertical - Amplitude	-5,897	-0,104	0,968
Velocidade Vertical – RMS	-90,215	-0,540	0,180
Taxa de Produção de Força absoluta	-0,011	-1,777	0,480
Taxa de Produção de Força relativa	0,954	2,010	0,451
Impulso na Fase Excêntrica	-0,076	-0,415	0,209

B - Coeficientes não padronizados;  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

através da tabela 6.6, em que  $h$ , é a altura de salto,  $F_{ymin}$ , é a força vertical mínima,  $F_{yamp}$ , é a amplitude da força vertical,  $v_{ymin}$ , é a velocidade vertical mínima,  $v_{yamp}$ , é a amplitude da velocidade vertical,  $v_{yrms}$  é o RMS da velocidade vertical e  $F_{Fexc}$  é a força mínima na fase excêntrica. A amplitude da força vertical foi o único parâmetros que apresentou valores estatisticamente significativos ( $\rho = 0,000$ ).

A figura 6.3 representa as curvas de aceleração obtidas pela IMU e pela FP, para realizar uma análise qualitativa dos resultados obtidos.

$$acc_{yrms} = 11,575 + 13,015 * h + 0,025 * F_{ymin} + 0,001 * F_{yamp} - 1,168 * v_{ymin} - 1,011 * v_{yamp} - 5,753 * v_{yrms} - 0,005 * F_{Fexc} [m/s^2] \quad (6.11)$$

Tabela 6.6: Modelo de regressão para a raiz quadrada média da aceleração vertical

Variável Preditora	RMS da Aceleração Vertical		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	11,575		0,568
Altura de Salto	13,015	0,488	0,724
Força Vertical Mínima	0,025	0,158	0,214
Força Vertical – Amplitude	0,001	0,600	0,000
Velocidade Vertical Mínima	-1,168	-0,225	0,338
Velocidade Vertical - Amplitude	-1,011	-0,230	0,874
Velocidade Vertical – RMS	-5,753	-0,443	0,064
Taxa de Produção de Força relativa	0,000	0,177	0,273
Força Mínima na Fase Excêntrica	-0,005	-0,350	0,038

B - Coeficientes não padronizados;  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

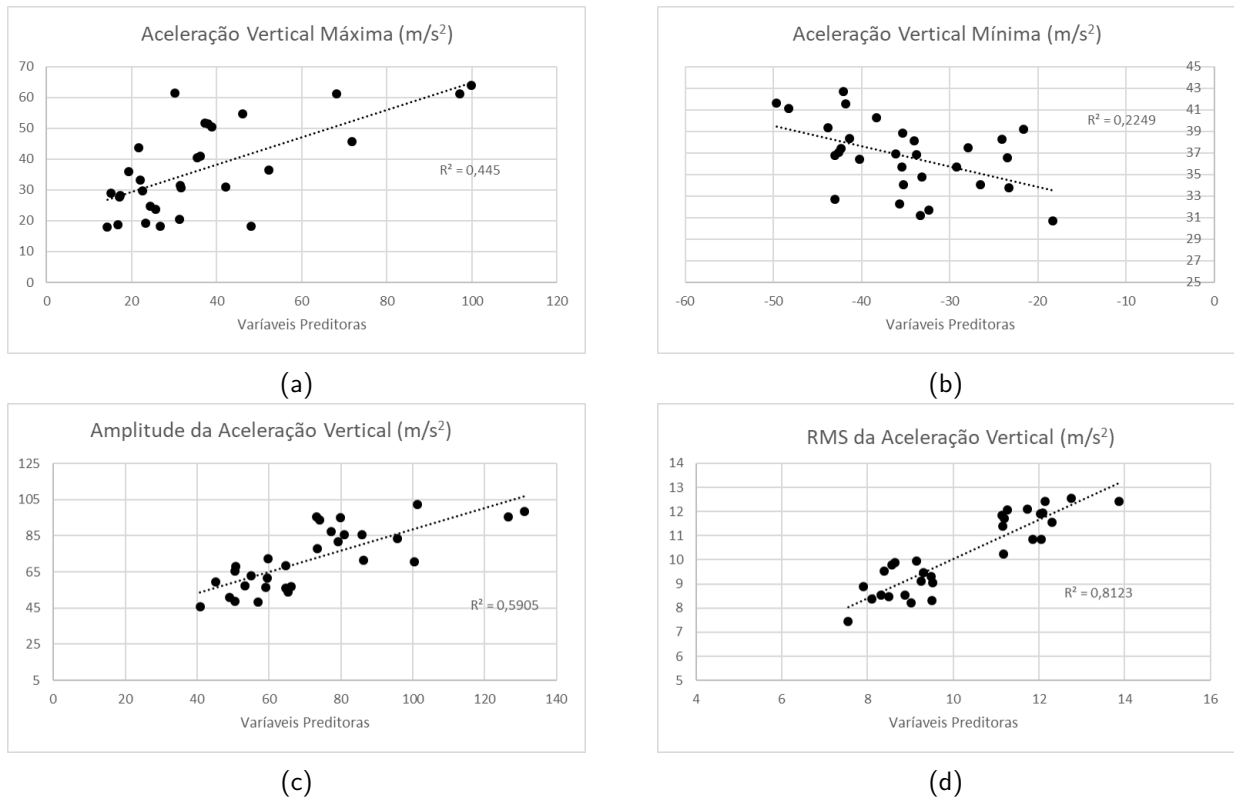


Figura 6.2: Gráficos dispersão e linhas de regressão dos modelos preditivos da aceleração vertical

## 6.5 Discussão

O objetivo deste estudo foi investigar a associação da aceleração vertical obtida através da IMU colocada na apófise espinhosa L5 com os parâmetros cinemáticos e cinéticos obtidos através de uma FP, num grupo de atletas de elite no Atletismo. Esta associação tem como objetivo analisar as diferentes fases do CMJ, bem como a interpretação das características físicas dos atletas, quando analisadas as acelerações obtidas pela IMU no CMJ.

Segundo os resultados obtidos, podemos afirmar que a aceleração vertical obtida através da IMU tem uma associação elevada com os parâmetros cinemáticos, de altura de salto e de velocidade vertical e os parâmetros cinéticos, de força vertical, potência vertical e os impulsos na fase excêntrica.

A altura de salto um dos parâmetros mais estudados no CMJ tem indicado que uma maior altura de salto depende de maiores acelerações verticais (Ferragut et al., 2003). Considerando a elevada associação entre a aceleração vertical máxima, a amplitude da aceleração vertical e o RMS da aceleração vertical com a altura de salto, podemos indicar que as maiores acelerações obtidas pela IMU, indica maiores valores de altura de salto. Sendo a aceleração vertical proporcional à força vertical, este resultado permite indicar, também que uma maior altura de salto, está associado a maiores forças realizadas (Dowling and Vamos, 1993; Mandic et al., 2015).

Um das características físicas que o CMJ tem permitido compreender é a potência muscular realizada pelos membros inferiores e diversos estudos indicam que maiores alturas de salto sugerem uma elevada potência muscular dos membros inferiores (Aragón-Vargas and Melissa Gross, 1997; Dowling and Vamos, 1993; González-Badillo and Marques, 2010; Mandic et al., 2015). O cálculo da potência vertical média e máxima foi proposta e através das associações obtidas com os valores de aceleração vertical da IMU,



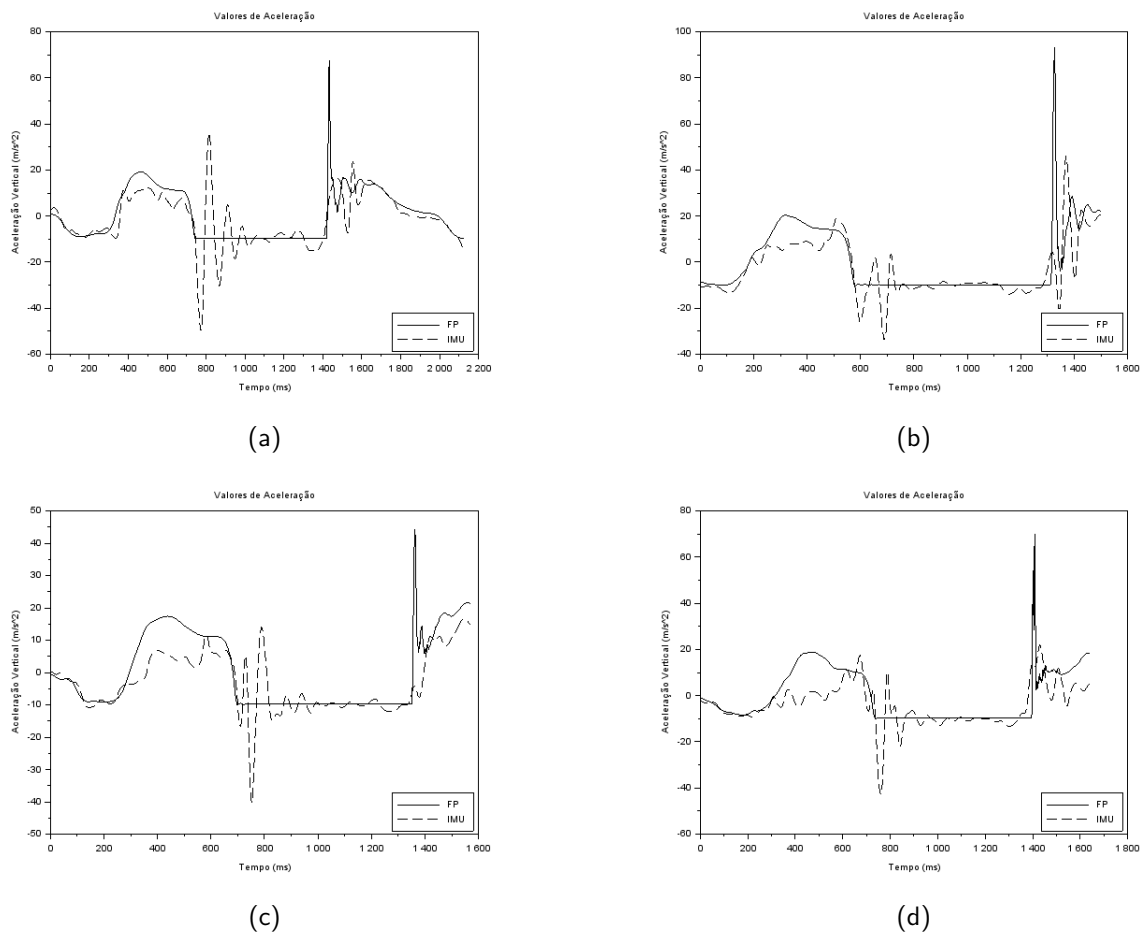


Figura 6.3: Gráficos de representação das curvas de aceleração obtidas por uma Unidade de Medição Inercial e uma Plataforma de Força

podemos sugerir que ao obter maiores acelerações através da IMU, associa-se, também, uma maior potência muscular nos membros inferiores.

Associado à potência vertical está a velocidade de execução realizada durante o CMJ e é indicado que maiores velocidades de execução no CMJ é realizada uma maior altura de salto (Dowling and Vamos, 1993), este estudo foi ao encontro do mesmo indicador, obtendo associações elevadas entre a aceleração vertical da IMU e o valor da amplitude da velocidade vertical obtida pela FP. Foram determinadas associações negativas com a velocidade vertical mínima, tal como, Dowling and Vamos (1993), González-Badillo and Marques (2010) e Sánchez-Sixto et al. (2018) que obtiveram uma correlação negativa com a altura de salto, indicando que melhores velocidades na fase excêntrica, permitem realizar uma maior altura de salto. Ferragut et al. (2003) verificaram que o impulso realizado nesta fase não é um forte preditor da altura do salto. Neste estudo as associações encontradas foram moderadas para a aceleração vertical mínima e RMS da aceleração vertical, indicando, também, que o impulso não é um forte preditor de rendimento no CMJ. Foi possível obter elevadas associações entre o RMS da aceleração vertical e a força mínima realizada nesta fase, indicando que maiores forças realizadas durante a fase excêntrica permitem obter melhores alturas de salto. Ferragut et al. (2003) verificaram que uma força gerada nesta fase influencia o impulso realizado durante o CMJ e a altura de salto obtida. Neste estudo foi possível obter uma associação elevada entre a aceleração vertical máxima, o RMS da aceleração vertical e a amplitude da aceleração vertical com a amplitude da força vertical. Considerando que a amplitude da força vertical é a diferença entre o maior

e o menor valor de força e que a estes valores estão associados as forças realizadas na fase excêntrica e concêntrica, podemos sugerir que maiores valores de aceleração vertical, estão associados à realização de melhores transições no CMJ, corroborando com González-Badillo and Marques (2010), que obteve a elevadas correlações com a força produzida na fase excêntrica e na fase concêntrica, permitindo a melhor compreensão na transição entre as fases excêntricas e concêntricas realizada durante a execução do CMJ. O RMS da aceleração vertical obteve uma associação moderada com a taxa produção de força sugerindo que os atletas que atingem o pico de força máxima mais rapidamente conseguem maiores resultados de aceleração vertical.

Foram aplicados diversos modelos de regressão linear nos parâmetros de aceleração estudado e através dos resultados obtidos foi possível identificar que a variável RMS da aceleração vertical é a que melhor explica o rendimento do CMJ. O modelo reforça o indicado anteriormente, pois através da equação 6.11 é possível identificar que melhores rendimentos no CMJ estão associados os parâmetros da altura de salto (Ferragut et al., 2003), das forças verticais (Dowling and Vamos, 1993; Mandic et al., 2015), das velocidades verticais (Dowling and Vamos, 1993; González-Badillo and Marques, 2010; Sánchez-Sixto et al., 2018) e da execução mais aprimorada na fase excêntrica (González-Badillo and Marques, 2010). Analisando os resultados no ponto de vista do treinador, este estudo permite indicar que o RMS da aceleração vertical pode ser utilizado na análise mais detalhada do CMJ, como pode ser confirmado na equação 6.11. A análise deste parâmetro pode ser considerado porque um atleta para saltar mais alto tem de “sair” rapidamente do chão, considerando a 3ª Lei de Newton (Ação-Reação) e que o RMS considera a raiz quadrada do quadrado do valor média das acelerações, considerando assim o valor em módulo das acelerações positivas e negativas, tornando o RMS da aceleração um parâmetro relevante no estudo realizado.

Este estudo de investigação permite indicar que podemos aplicar a IMU no CMJ, pela obtenção de uma informação similar quando analisada a altura de salto obtida por uma FP e a aceleração vertical recolhida por uma IMU. No ponto de vista prático cada vez mais os treinadores têm procurado compreender de que forma é que o atleta se comporta nos diferentes saltos realizados, numa sessão de treino, ou ao longo de uma época. Esta explicação deve-se aos atletas saltarem menos, mais ou até o mesmo por razões diferentes, ou por ter realizado mais força máxima, mais força na fase excêntrica, mais potência, ou simplesmente o atleta foi mais rápido a executar o CMJ. Desta forma, cada vez mais é fundamental observar a execução de todo o salto e através da figura 6.3 conseguimos observar que tanto pela FP e pela IMU conseguimos definir muito bem as diferentes fases do CMJ. Se observarmos o declive da curva, nos instantes que antecedem a fase de voo, verificamos que estas são coincidentes, indicando que a velocidade obtida pela IMU e pela FP são semelhantes. Embora na fase de voo na IMU, não é verificada a mesma estabilidade da curva que a FP, isto sucede devido à IMU respeitar os conceitos da Física, pois a média entre o valor máximo e mínimo é de  $9,806m/s^2$ , correspondente à aceleração gravítica na terra, à latitude de recolha. Considerando estes aspetos e tendo as FPs, ainda, preços bastante elevados e de difícil portabilidade (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Buckthorpe et al., 2012; Castagna et al., 2013; Carlos-Vivas et al., 2018; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019), limitando a sua aplicação ao longo de uma época e nos diferentes locais de treino realizados por um atleta de alto rendimento, podemos indicar que o treinador ao utilizar a IMU na avaliação do CMJ, terá um instrumento de baixo custo, de fácil portabilidade, de fácil aplicação e que obtém dados ricos e detalhados em tempo real.

## 6.6 Conclusões

Este estudo permitiu determinar associações entre a aceleração obtida pela IMU e os parâmetros cinemáticos, de altura de salto e de velocidade e os parâmetros cinéticos, de força vertical, potência vertical e impulsos da fase excêntrica determinados pela FP, durante a execução CMJ. Desta forma, foi possível

interpretar a aceleração nas diferentes fases do CMJ e qual a sua associação nas diferentes características físicas dos atletas.

A correlação realizada indicou que maiores acelerações verticais estão associadas aos atletas que realizam uma maior altura de salto, que têm uma grande potência muscular nos membros inferiores e que executam grandes forças máxima e as maiores forças na fase excêntrica. Para além desta informação foi possível analisar que a IMU permite caracterizar o CMJ nas diferentes fases do movimento, bem como obter velocidades iguais e que o comportamento da curva na fase de voo, respeita as Leis da Física.

Para além disso, este estudo permitiu determinar modelos de regressão linear e assim compreender quais as variáveis que permitem explicar melhor os parâmetros obtidos pela IMU.

Toda esta informação foi possível obter através da IMU, que permite obter informação detalhada quando comparada com a FP, com um baixo custo, de fácil aplicabilidade e portabilidade e com resultados obtidos, em tempo real, permitindo desta forma ao treinador aplicar o mesmo instrumento, os mesmos parâmetros em qualquer local de treino e/ou competição.

## 6.7 Referências Bibliográficas

- Aragón-Vargas, L. F. and Melissa Gross, M. (1997). Kinesiological factors in vertical jump performance: Differences among individuals. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(1):24–44.
- Balsalobre-Fernández, C., Glaister, M., and Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(15):1574–1579.
- Buckthorpe, M., Morris, J., and Folland, J. P. (2012). Validity of vertical jump measurement devices. *Journal of Sports Sciences*, 30(1):63–69.
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., and Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors (Switzerland)*, 18(3).
- Carlos-Vivas, J., Martin-Martinez, J. P., Hernandez-Mocholi, M. A., and Perez-Gomez, J. (2018). Validation of the iPhone app using the force platform to estimate vertical jump height. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 58(3):227–232.
- Castagna, C., Ganzetti, M., Ditroilo, M., Giovannelli, M., Rocchetti, A., and Manzi, V. (2013). Concurrent Validity of Vertical Jump Performance Assessment Systems. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(3).
- Cravinel-Cabral, R. M., Oliveira-Silva, I., Medeiros, A. R., Claudino, J. G., Jiménez-Reyes, P., and Boullosa, D. A. (2018). The validity and reliability of the “ My Jump App ” for measuring jump height of the elderly . *PeerJ*, 6:e5804.
- Dowling, J. J. and Vamos, L. (1993). Identification of Kinetic and Temporal Factors Related to Vertical jump Performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 9:95–110.
- Ferragut, C., Arteaga-ortiz, R., and Calbet, J. A. (2003). Predicción de la altura de salto vertical : importancia del impulso mecánico y de la masa muscular de las extremidades inferiores. *Revista Motricidad*, 10:7–22.
- Glatthorn, J. F., Gouge, S., Nussbaumer, S., Stauffacher, S., Impellizzeri, F. M., and Maffiuletti, N. A. (2011). Validity and Reliability of Optojump Photoelectric Cells for Estimating Vertical Jump Height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2).
- González-Badillo, J. J. and Marques, M. C. (2010). Relationship Between Kinematic Factors and Counter-movement Jump Height in Trained Track and Field Athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(12):3443–3447.
- Harman, E. A., Rosenstein, M. T., Frykman, P. N., Rosenstein, R. M., and Kraemer, W. J. (1991). Estimation of Human Power Output from Vertical Jump. *Journal of Applied Sport Science Research*, 5(3):116–220.
- Hopkins, W., a.M. Batterham, Marshall, S., and Hanin, J. (2009). Progressive Statistics. *Sportsci.org*, 2009:55–70.
- Jidovtseff, B., Quievre, J., Harris, N. K., and Cronin, J. B. (2014). Influence of jumping strategy on kinetic and kinematic variables. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 54(2):129–138.
- Kenneally-Dabrowski, C. J., Serpell, B. G., and Spratford, W. (2018). Are accelerometers a valid tool for measuring overground sprinting symmetry? *International Journal of Sports Science and Coaching*, 13(2):270–277.

- Mandic, R., Jakovljevic, S., and Jaric, S. (2015). Effects of countermovement depth on kinematic and kinetic patterns of maximum vertical jumps. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 25(2):265–272.
- Nielsen, E. T., Jørgensen, P. B., Mechlenburg, I., and Sørensen, H. (2019). Validation of an inertial measurement unit to determine countermovement jump height. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 16:8–13.
- Picerno, P., Camomilla, V., and Capranica, L. (2011). Countermovement jump performance assessment using a wearable 3D inertial measurement unit. *Journal of sports sciences*, 29(2):139–46.
- Rogers, S. A., Hassmén, P., Hunter, A., Alcock, A., Crewe, S. T., Strauts, J. A., Gilleard, W. L., and Weissensteiner, J. R. (2019). The Validity and Reliability of the MyJump2 Application to Assess Vertical Jumps in Trained Junior Athletes. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 23(1):69–77.
- Sánchez-Sixto, A., Harrison, A., and Floría, P. (2018). Larger Countermovement Increases the Jump Height of Countermovement Jump. *Sports*, 6(4):131.
- Setuain, I., Lecumberri, P., Ahtiainen, J. P., Mero, A. A., Häkkinen, K., and Izquierdo, M. (2018). Sprint mechanics evaluation using inertial sensor-based technology: A laboratory validation study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(2):463–472.
- Toumi, H., Best, T. M., Martin, A., F'Guyer, S., and Poumarat, G. (2004). Effects of eccentric phase velocity of plyometric training on the vertical jump. *International Journal of Sports Medicine*, 25(5):391–398.
- Vince, J. (2011). *Quaternions for Computer Graphics*, volume 53. Springer-Verlag London, Bournemouth, UK, 1 edition.
- Winter A., D. (2005). *Biomechanics and motor control of human movement*. 3rd edition.
- Wu, G. and Cavanagh, P. R. (1995). ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, 28(10):1257–1261.



# 7

Interpretação da aceleração no teste de velocidade de 40m, através da aplicação da IMU, em atletas de elite, no Atletismo

## 7.1 Resumo

Introdução: A corrida de velocidade dos 100m tem como objetivo percorrer uma distância no menor tempo possível. Com vista a compreender os melhores rendimentos no teste de corrida de velocidade este estudo propôs a aplicação da IMU no teste de velocidade de 40m, com atletas de elite de Atletismo, para interpretar de que forma a altura de salto e a aceleração obtidas através da IMU, na realização do CMJ permite associar-se com os parâmetros temporais obtidos pelas células fotoelétricas e associar os valores de aceleração obtidos pela IMU na corrida de velocidade de 40m com os tempos obtidos através de células fotoelétricas e compreender a influência das acelerações na corrida realizada.

Métodos: Seis atletas ( $26 \pm 3,72$ anos) de elite realizaram, três CMJ e três corridas no teste de velocidade de 40m, com a IMU colocada na apófise espinhosa da L5 e foram obtidos os tempos através das células fotoelétricas de duplo corte. Foram realizados os testes estatísticos de correlação de *Pearson* e a de *Spearman*. Os modelos de regressão linear foram aplicados para a identificação de variáveis preditoras.

Resultados: Os resultados de correlação identificaram que a aceleração ântero-posterior obteve um elevado nível de associação com os parciais 0-10m, 10-20m, 20-30m e 30-40m. Para além disso no parcial 10-20m e 30-40m foram identificados elevados níveis de correlação com a aceleração médio-lateral. A aceleração vertical apresentou níveis de associação elevada no parcial 10-20m. Foram apresentados quatro modelos de regressão linear com elevado nível de explicação dos parâmetros temporais estudados (0-10m, 10-20m, 20-30m e 30-40m).

Conclusões: A IMU permitiu quantificar a potência muscular dos membros inferiores, através do CMJ. No teste de velocidade de 40m permitiu compreender a influência da aceleração no comportamento do atleta ao longo de 40m. Os modelos de regressão linear permitiram identificar variáveis preditoras para os parciais de 0-10m, 10-20m, 20-30m e 30-40m, com elevado nível de explicação.

**Palavras-chaves:** Sensores; Aceleração; Velocidade;



## 7.2 Introdução

A corrida de velocidade dos 100m, no Atletismo pode ser dividida em três componentes, a fase de aceleração, a fase de velocidade máxima aproximadamente constante e a fase de desaceleração (Morin et al., 2011) e tem como objetivo percorrer uma distância no menor tempo possível (Colyer et al., 2018; Morin et al., 2012). Estudar a fase de aceleração da corrida de velocidade tem sido determinante para compreender os índices de velocidade máxima e fatores determinantes de otimização do rendimento desportivo dos atletas (Colyer et al., 2018; Haugen et al., 2019; Morin et al., 2015). Para além disto, maiores velocidades estão associadas a maiores níveis de força realizados pelos atletas, assim compreender os índices de força realizados durante a corrida de velocidade tem sido objeto de estudo. O salto de contramovimento (CMJ) permite obter informação sobre a potência realizada nos membros inferiores, através da altura de salto (Aragón-Vargas and Melissa Gross, 1997; Balsalobre-Fernández et al., 2015; Buckthorpe et al., 2012; Carlos-Vivas et al., 2018; Castagna et al., 2013; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Dowling and Vamos, 1993; González-Badillo and Marques, 2010; Mandic et al., 2015; Glatthorn et al., 2011; Leard et al., 2007; Picerno et al., 2011; Nielsen et al., 2019; Rogers et al., 2019) A correlação entre a altura de salto do CMJ com o tempo das células fotoelétricas tem permitido analisar os índices de força e o rendimento desportivo dos atletas. Struzik et al. (2017) tiveram como objetivo avaliar a correlação entre as variáveis de salto vertical com braços e o tempo aos 30m e indicaram que a altura de salto é uma variável determinante na eficiência do salto vertical e permite prever o rendimento da corrida de velocidade. Markström and Olsson (2013) determinaram a associação entre a altura de salto e a performance da corrida de velocidade num teste de 60m e obtiveram correlações significativas na velocidade máxima e no tempo aos 60m. López-Segovia et al. (2011) verificaram o nível de associação entre as variáveis de potência do salto vertical e do agachamento completo, com o rendimento da velocidade durante 30m e sugeriram que os parâmetros de potência do salto vertical com carga de 20Kg e do agachamento completo com 70Kg tiveram uma elevada correlação com a corrida de velocidade de 30m.

A medição da altura de salto no teste de CMJ é um método indireto e somente indicativo da potência dos membros inferiores, então estudos com passadeiras instrumentadas têm surgido com o objetivo de compreender a força realizada em cada um dos apoios durante a corrida (Morin et al., 2012, 2011; Morin and Sève, 2011). Morin et al. (2011) validaram uma passadeira instrumentada na quantificação da taxa de produção de força e desta forma perceber quais as alterações ocorridas com o aumento da velocidade na fase de aceleração. Para além disso, analisaram as associações entre as características técnicas do movimento de velocidade com o rendimento da corrida em pista durante a velocidade de 100m. Os autores indicaram que a passadeira instrumentada permite determinar a taxa de produção de força e que este obteve uma elevada correlação com o rendimento dos 100m. Morin and Sève (2011) compararam a corrida de velocidade entre uma passadeira instrumentada e a corrida realizada em pista através das variáveis derivadas das relações velocidade-tempo e velocidade-distância e as características da fase de aceleração e desaceleração. Os autores sugeriram que as passadeiras instrumentadas permitem analisar o rendimento desportivo e a mecânica da corrida, bem como avaliar as capacidades físicas dos atletas. Morin et al. (2012) pretenderam analisar as variáveis mecânicas associadas com o rendimento dos 100m e verificaram que maiores níveis de aceleração estão associados aos maiores rendimentos nos 100m. Para além disso, os autores sugeriram que a velocidade orientada no perfil de velocidade-força pode ser explicada por uma maior habilidade em aplicar a força resultante dos apoios no chão, aumentando a frequência de passo e conseqüente menor tempo de apoio. As passadeiras instrumentadas têm permitido obter informações relevantes da corrida de velocidade, no entanto, a determinação das características mecânicas na corrida de velocidade em pista levou a realização de estudos em ambiente laboratorial, onde estavam colocadas plataformas de força (FP) ao longo de um corredor, possibilitando determinar as forças realizadas de todos os apoios realizados durante a fase de aceleração (Colyer et al., 2018; Nagahara et al., 2018; Rabita et al., 2015). Colyer et al. (2018) tiveram como objetivo correlacionar as curvas de forças de reação de cada

apoio, ao longo de 52m, com o rendimento ao longo do tempo de contacto com o solo durante a fase de aceleração e indicaram que a força ântero-posterior foi determinante para o melhor rendimento desta fase. Nagahara et al. (2018) pretenderam analisar os aspetos mecânicos determinantes no rendimento da corrida de velocidade da fase de aceleração e da fase de velocidade máxima, em termos das forças de reação do apoio durante a corrida, ao longo de 52m. Este indicou que na fase de aceleração foram realizadas maiores forças propulsivas e que durante a fase de velocidade máxima verificaram as maiores forças verticais, fator este, determinante para a otimização do rendimento da fase de velocidade máxima. Rabita et al. (2015) descreveram a mecânica da fase de aceleração em atletas de elite e subelite e verificaram a associação dos parâmetros estudados com o rendimento da fase de aceleração na corrida de velocidade. Os autores identificaram que a amplitude de passo vai aumentando, enquanto a frequência é a máxima possível nos atletas de elite ao longo da corrida. Os modelos lineares e quadráticos explicaram da melhor forma a força e a potência-velocidade, respetivamente. Ainda, verificaram que o modo de aplicação da força é responsável pela diferença do desempenho dos atletas altamente treinados.

Estes instrumentos que têm associadas as FPs permitem obter resultados válidos, mas de preço elevado, de difícil transporte e de aplicação laboratorial (Bailey and Harle, 2014, 2016; Schmidt et al., 2016; Wixted et al., 2010). Para colmatar estes aspetos, novos instrumentos têm surgido (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Setuain et al., 2018), nomeadamente as Unidades de Medição Inercial (IMU), as quais, através de estudos de validação, têm demonstrado ser uma alternativa às FPs (Raper et al., 2018; Setuain et al., 2018) e aos sistemas de análise de movimento (Bailey and Harle, 2014; Kuznietsov, 2012; Lee et al., 2010; Wixted et al., 2010), pela sua obtenção de parâmetros cinemáticos e cinéticos, pelo baixo custo, pelo fácil transporte e aplicabilidade no atleta, pela versatilidade em todos os ambientes de treino e competição e pela possibilidade de obter resultados em tempo real (Alexander et al., 2016; Bailey and Harle, 2014; Kuznietsov, 2012; Lee et al., 2010; Schmidt et al., 2016; Wixted et al., 2010). Para além de estudos de validação, a IMU tem sido aplicada e interpretada em alguns desportos. Marsland et al. (2015) quantificaram cinematicamente diversas técnicas clássicas do ski de cross country, tendo como referência algoritmos desenvolvidos. Uma câmara e um micro sensor foram usados em simultâneo para capturar os movimentos propostos. Os autores conseguiram verificar que o micro sensor detetou as diferentes técnicas utilizadas no ski de cross country. Na corrida de velocidade verificaram-se estudos de validação da IMU, contudo aplicação e interpretação do parâmetro de aceleração obtido por estes sensores não se verificou na corrida de velocidade. Desta forma, algumas questões surgiram: “Será que a altura de salto e a aceleração vertical obtidas pela IMU no CMJ têm correlação com o tempo medido através das células fotoelétricas?”; “De que forma é que a aceleração obtida através da IMU permite associar-se aos tempos obtidos através das células fotoelétricas?”; e “Será que o comportamento da aceleração permite explicar a influência das acelerações na corrida de velocidade?”. Desta forma, foi proposto aplicar a IMU no teste de velocidade de 40m, com atletas de elite de Atletismo. Primeiro para interpretar de que forma é que a altura de salto e a aceleração obtidas através da IMU, na realização do CMJ permite associar-se com os parâmetros temporais obtidos pelas células fotoelétricas. Segundo para associar os valores de aceleração obtidos com uma IMU na corrida de velocidade de 40m com os tempos obtidos através de células fotoelétricas e compreender a influência das acelerações na corrida realizada.

### 7.3 Métodos

O estudo realizado é um estudo transversal de aplicação de uma IMU no CMJ e no teste de velocidade de 40m, com o objetivo de compreender a influência das acelerações na corrida de velocidade de 40m, através da correlação dos parâmetros propostos com os tempos das células fotoelétricas.

### 7.3.1 Amostra

Foram incluídos no estudo seis atletas de elite (quatro masculinos e dois femininos;  $26 \pm 3,72$  anos; massa corporal:  $73,01 \pm 9,97$  Kg; e estatura:  $1,76 \pm 0,08$  m), com representação internacional pelos seus países. Todos os sujeitos tiveram informação dos objetivos do estudo e assinaram o protocolo que foi aprovado pelo conselho de ética da Universidade de Évora e está de acordo com os princípios de ética da Declaração de Helsínquia.

### 7.3.2 Equipamento

A IMU desenvolvida neste estudo, que é constituída por um acelerómetro tridimensional (3D), um giroscópio 3D e um magnetómetro 3D, a recolher a 275 dados por segundo (275 Hz) foi aplicada. Quatro pares de células fotoelétricas de duplo corte da Microgate foram usadas para determinar o tempo realizado a cada 10 metros num total de 40m.

### 7.3.3 Procedimentos

A amostra foi informada sobre os objetivos e o atleta realizou o aquecimento estipulado pelo seu treinador. Foi explicada a realização do CMJ. O atleta iniciou o movimento na posição ereta estática, realizou uma flexão do joelho a  $90^\circ$  e de seguida um salto, finalizando o movimento na posição em que iniciou, com os braços colocados à cintura, o salto foi realizado na FP e com a IMU colocada na zona da L5 (IMU-CG), sendo referência para o Centro de Gravidade (CG) (Camomilla et al., 2018; Nielsen et al., 2019). O instrumento foi fixado com fita adesiva na superfície e zona da apófise espinhosa na 5ª vértebra lombar (L5). Os atletas realizaram três CMJ cada e com um descanso de um minuto entre cada salto. De seguida, foi explicada a realização do teste de 40m, isto é, o atleta realiza um CMJ para sincronizar os quatro instrumentos propostos. Inicia a tarefa de três apoios e corre na máxima velocidade durante 40 metros. Cada atleta realizou três corridas de velocidade e com um descanso de dez minutos entre cada tarefa.

### 7.3.4 Processamento de dados

Na IMU, a recolha de dados foi realizada através do *Spyder 3.3.3 (Python Project Contributors)*, que exportou um ficheiro em formato *MO Excel 2018* e a análise de dados foi realizada através do *Scylab 6.0.1 (ESI Group, France, 2018)*.

Foi considerado o sistema de coordenadas definido pela Sociedade Internacional de Biomecânica (ISB) (Wu and Cavanagh, 1995). Para cada corrida foi necessário remover a gravidade da aceleração obtida do acelerómetro 3D e considerar a inclinação do sensor. Assim, foram obtidos os dados da aceleração 3D ( $m/s^2$ ), no sistema de coordenadas local da IMU, e os dados do giroscópio ( $^\circ/s$ ) (Nielsen et al., 2019) através dos quais foram calculados os *quaternions* para obter a orientação do sensor relativamente ao sistema de coordenadas global da IMU (Vince, 2011). Antes de iniciar a tarefa, o atleta ficou cerca de 30 segundos estático para obter a aceleração de base e realizou um salto antes de iniciar a corrida para definir o critério inicial de ambos os instrumentos.

A partir da IMU foram determinados os parâmetros no teste de 40m e no teste de CMJ. No CMJ foi determinado o RMS da aceleração vertical e a altura de salto, obtidos através da IMU, em que a altura foi calculada através da equação de queda livre (equação 7.1) (Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011), onde  $h$ , é a altura de salto;  $t$ , é o tempo de voo; e  $g$ , a aceleração gravítica, cujo valor foi de  $9.806 m/s^2$ , à

latitude recolhida. No teste de 40m foram considerados os valores da aceleração no eixo ântero-posterior, médio-lateral e vertical. Os valores de aceleração foram decompostos em taxa de aceleração, determinada pela equação 7.2 (Morin et al., 2012), em que  $Racc$  é a taxa de aceleração,  $Acc_{xmax}$  são as acelerações máximas realizadas no sentido médio-lateral,  $Acc_{zmax}$  são as acelerações máximas ocorridas no sentido vertical e  $Acc_{zmax}$  são as acelerações máximas obtidas para o eixo ântero-posterior. Ainda foi determinada a aceleração máxima, a aceleração mínima, a amplitude da aceleração, que consistiu na diferença entre o valor máximo e mínimo da aceleração e a raiz quadrada da média (RMS) da aceleração.

$$h = (t^2 \cdot g)/8 [m] \quad (7.1)$$

$$Racc = Acc_{zmax} / \sqrt{Acc_{xmax}^2 + Acc_{ymax}^2 + Acc_{zmax}^2} \quad (7.2)$$

Os dados obtidos através da IMU foram suavizados através de um filtro *Butterworth* passa-baixo, com uma frequência de corte determinada tendo em consideração a análise da potência espectral (Winter A., 2005), com valores compreendidos nos 12Hz. No CMJ foi aplicado no eixo vertical uma frequência de corte de 45Hz.

Os dados das células fotoelétricas foram obtidos diretamente do sistema de cronometragem e os parâmetros temporais obtidos foram organizados por parciais (0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m) e colocados em base de dados.

### 7.3.5 Análise Estatística

As análises estatísticas foram conduzidas para determinar a correlação dos parâmetros obtidos pela IMU posicionada na zona do CG e compreender a sua influência na corrida de velocidade, usando o programa SPSS - versão 22 (IBM SPSS Inc., Chicago, IL, USA). A normalidade foi verificada através do *Teste de Shapiro-Wilk* ( $\rho \leq 0,05$ ). Os dados foram apresentados em média e em desvio padrão, para um nível de significância de  $\rho \leq 0,05$  (Alexander et al., 2016; Romero-Franco et al., 2017).

Os testes de correlação de *Pearson* e *Spearman* foram aplicados para determinar a correlação entre os resultados de altura de salto e aceleração máxima no teste de CMJ e a taxa de aceleração, a aceleração máxima, a aceleração mínima, a raiz quadrada média da aceleração e a amplitude da aceleração nos diferentes parciais do teste de velocidade de 40m obtidos pela IMU e os parciais de 0-10m, 10-20m, 20-30m e 30-40m obtidos pelas células fotoelétricas de duplo corte. Foram considerados os valores de correlação sugeridos por Hopkins et al. (2009),  $r \leq 0,3$ , pequena;  $r$  entre 0,3 e 0,5, moderada; e  $r > 0,5$ , elevada (Kenneally-Dabrowski et al., 2018; Setuain et al., 2018).

No desenvolvimento dos modelos de predição foi usada a regressão linear com o método de *enter*. O modelo apresentado teve em consideração as correlações entre a variável dependente e as variáveis independentes cujo grau de significância foi  $\rho \leq 0,05$ .

## 7.4 Resultados

A altura de salto e o RMS da aceleração vertical foi determinada no CMJ e obteve valores médios de  $0,534 \pm 0,033m$  e  $9,518 \pm 1,514m/s^2$ , respetivamente. As células fotoelétricas permitiram obter os parciais temporais para os 0-10m, 10-20m, 20-30m e 30-40m. Os valores médios nos 0-10m foram de  $1,909 \pm 0,056s$ ,

nos 10-20m foram de  $1,213 \pm 0,037s$ , os 20-30m obteve  $1,126 \pm 0,042s$  e nos 30-40m foram de  $1,102 \pm 0,046s$  (Tabela 7.1).

A estatística inferencial na correlação dos resultados da altura de salto e da aceleração vertical máxima obtidos pela IMU com os parciais obtidos, através das células fotoelétricas estão representadas na Tabela 7.1. Os resultados obtidos para a altura de salto verificaram associações altas e estatisticamente significativas no tempo parcial dos 0-10m ( $r = -0,863$ ,  $\rho = 0,027$ ). Nos restantes parâmetros analisados não se verificaram correlações estatisticamente significativas. Relativamente, ao RMS da aceleração vertical não se verificaram associações estatisticamente significativas. Foi proposto o desenvolvimento do modelo de regressão linear entre a altura de salto do CMJ e o parcial dos 0-10m. O modelo proposto indica que a altura de salto permite explicar 74,39% da variação da variável dependente (Figura 7.1). A equação 7.3 representa a equação de regressão obtida através da Tabela 7.2, em que  $T_{0-10m}$  é tempo entre os 0m e os 10m e  $h$ , é a altura de salto.

$$T_{0-10m}[s] = 2,784 - 1,597 * h \quad (7.3)$$

Tabela 7.1: Estatística descritiva e de correlação entre altura de salto e a raiz quadrada média da aceleração obtida pela Unidade de Medição Inercial e os parâmetros temporais obtidos pelas células em cada parcial

	CMJ (m)	CMJ ( $m/s^2$ )	Tempos (s)			
			0-10m	10-20m	20-30m	30-40m
<b>Médias</b>	0,539	11,030	1,924	1,228	1,130	1,108
<b>(<math>\pm SD</math>)</b>	( $\pm 0,080$ )	( $\pm 1,127$ )	( $\pm 0,147$ )	( $\pm 0,102$ )	( $\pm 0,107$ )*	( $\pm 0,121$ )
<b>r1</b>			-0,863#	-0,595	-0,714	-0,609
<b>r2</b>			-0,352	0,077	-0,029	0,085

\* $\rho > 0,05$  verificou normalidade; r1 – relação entre a altura do CMJ e os parciais de tempo no teste de velocidade; r2 - relação entre o RMS da aceleração do CMJ e os parciais de tempo no teste de velocidade; # $\rho \leq 0,05$  – correlações significativas.

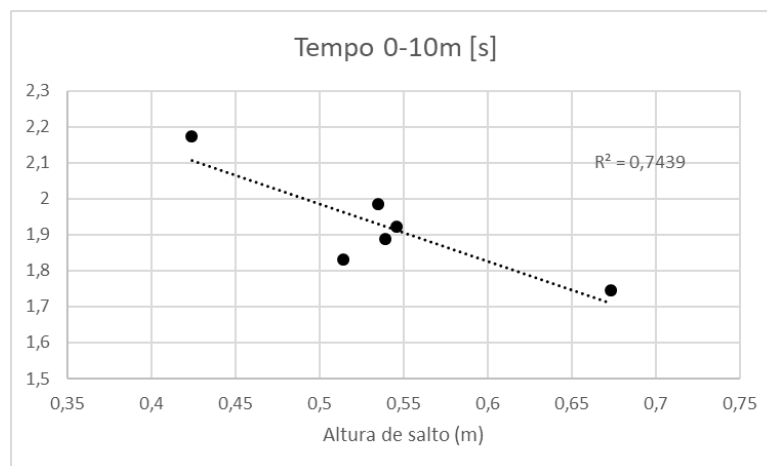


Figura 7.1: Gráfico de dispersão e linha de regressão do modelo preditivo entre o tempo parcial 0-10m e o CMJ

A estatística descritiva dos parâmetros de aceleração obtidos pela IMU estudados estão representados na Tabela 7.3 e apresentados em média e desvio padrão. Os resultados da correlação entre os resultados de aceleração obtidos pela IMU com os parciais estudados dos 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m, 0-30m e

Tabela 7.2: Modelo de regressão para o tempo 0-10m associado com a altura de salto obtida através da Unidade de Medição Inercial

Variável Preditora	Células 0-10m		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	2,784		0,000
CMJ (m)	-1,597	-0,863	0,027

B - Coeficientes não padronizados;  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

0-40m, através das células fotoelétricas estão representadas na Tabela 7.3. Nos resultados de correlação de aceleração com o parcial de 0-10m obtiveram correlações elevadas significativas, na aceleração máxima no eixo ântero-posterior ( $r = -0,538$ ,  $\rho = 0,037$ ). No parcial 10-20m verificaram-se associações significativas elevadas nos parâmetros de aceleração máxima médio-lateral ( $r = -0,600$ ,  $\rho = 0,023$ ), no RMS da aceleração médio-lateral ( $r = -0,534$ ,  $\rho = 0,049$ ), na aceleração vertical máxima ( $r = -0,591$ ,  $\rho = 0,026$ ), no RMS da aceleração vertical máxima ( $r = -0,653$ ,  $\rho = 0,011$ ), na amplitude da aceleração vertical ( $r = -0,591$ ,  $\rho = 0,026$ ), na aceleração ântero-posterior máxima ( $r = -0,644$ ,  $\rho = 0,013$ ), no RMS da aceleração ântero-posterior ( $r = -0,582$ ,  $\rho = 0,029$ ) e na amplitude da aceleração ântero-posterior ( $r = -0,851$ ,  $\rho = 0,000$ ). Entro os 20m e os 30m foram identificadas correlações significativas elevadas na aceleração ântero-posterior máxima ( $r = -0,644$ ,  $\rho = 0,013$ ), no RMS da aceleração ântero-posterior ( $r = -0,789$ ,  $\rho = 0,001$ ) e na amplitude da aceleração ântero-posterior ( $r = -0,635$ ,  $\rho = 0,015$ ). No último parcial, entre os 30m e os 40m foram obtidas correlações significativas elevadas com a taxa de aceleração ( $r = -0,574$ ,  $\rho = 0,032$ ), na aceleração médio-lateral mínima ( $r = 0,815$ ,  $\rho = 0,000$ ), no RMS da aceleração médio-lateral ( $r = -0,749$ ,  $\rho = 0,002$ ) e na amplitude da aceleração médio-lateral ( $r = -0,543$ ,  $\rho = 0,045$ ), na aceleração ântero-posterior máxima ( $r = -0,618$ ,  $\rho = 0,019$ ), na aceleração ântero-posterior mínima ( $r = 0,754$ ,  $\rho = 0,002$ ), no RMS da aceleração ântero-posterior ( $r = -0,670$ ,  $\rho = 0,009$ ) e na amplitude da aceleração ântero-posterior ( $r = -0,710$ ,  $\rho = 0,004$ ).

Os modelos de regressão linear permitiram compreender de que forma a variável aceleração explica os tempos parciais obtidos na corrida. No modelo proposto para o parcial dos 0-10m (Tabela 7.4) indica que a amplitude da aceleração ântero-posterior permite explicar 13,67% da variação da variável dependente (Figura 7.2a). A equação 7.4 representa a equação de regressão obtida através da tabela ??, em que  $T_{0-10m}$  é tempo entre os 0m e os 10m e  $AccZ_{amp-0-10m}$ , é a amplitude da aceleração ântero-posterior.

$$T_{0-10m}[s] = 2,132 - 0,003 * AccZ_{amp-0-10m} \quad (7.4)$$

As variáveis de aceleração propostas permitiram explicar 89,72% da variação do tempo do parcial entre os 10-20m (Figura 7.2b). Com a Tabela 7.5 foi possível desenvolver a equação de regressão 7.5. Em que  $T_{10-20m}$  é tempo entre os 10m e os 20m,  $AccXRMS-10-20m$  é o RMS da aceleração médio-lateral,  $AccY_{max-10-20m}$  é a aceleração vertical máxima,  $AccY_{RMS-10-20m}$  é o RMS da aceleração vertical,  $AccY_{amp-10-20m}$  é a amplitude da aceleração vertical,  $AccZ_{max-10-20m}$  é a aceleração ântero-posterior máxima,  $AccZRMS-10-20m$  é o RMS da aceleração ântero-posterior e  $AccZ_{amp-10-20m}$  é a amplitude da aceleração ântero-posterior.

$$T_{10-20m}[s] = 2,051 + 0,003 * AccXRMS-10-20m + 0,012 * AccY_{max-10-20m} - 0,017 * AccY_{RMS-10-20m} - 0,008 * AccY_{amp-10-20m} + 0,001 * AccZ_{max-10-20m} - 0,018 * AccZRMS-10-20m - 0,001 * AccZ_{amp-10-20m} \quad (7.5)$$

Tabela 7.3: Estatística descritiva e de correlação entre os parâmetros de aceleração obtidos pela Unidade de Medição Inercial e os parâmetros temporais obtidos pelas células em cada parcial

	0-10m Média (±SD)	r1	10-20m Média (±SD)	r2	20-30m Média (±SD)	r3	30-40m Média (±SD)	r4
<b>Taxa de Aceleração</b>	0,689 (±0,110)*	0,033	0,762 (±0,089)*	-0,073	0,814 (±0,048)*	-0,244	0,799 (±0,067)*	-
<b>Aceleração máxima em X</b> [m/s <sup>2</sup> ]	47,511 (±15,961)	-0,128	46,605 (±10,313)*	-	46,463 (±15,776)*	-0,253	46,288 (±7,698)*	-0,086
<b>Aceleração mínima em X</b> [m/s <sup>2</sup> ]	-49,845 (±18,096)	0,277	-59,042 (±21,893)*	0,512	-59,321 (±27,203)*	0,521	-57,827 (±24,682)*	0,815##
<b>RMS da aceleração em X</b> [m/s <sup>2</sup> ]	15,872 (±3,806)	-0,326	19,453 (±4,956)*	-0,534#	15,704 (±7,107)*	-0,411	19,119 (±5,041)*	-
<b>Aceleração X - Amplitude</b> [m/s <sup>2</sup> ]	97,356 (±31,725)	-0,222	105,947 (±30,944)*	-0,495	105,784 (±40,645)*	-0,420	104,115 (±30,198)*	-
<b>Aceleração máxima em Y</b> [m/s <sup>2</sup> ]	45,418 (±19,643)	-0,373	48,788 (±15,914)*	-	36,707 (±14,780)*	-0,437	44,288 (±15,944)*	-0,376
<b>Aceleração mínima em Y</b> [m/s <sup>2</sup> ]	-29,898 (±5,136)	0,466	-28,319 (±5,244)*	0,530	-31,449 (±8,578)*	0,433	-31,481 (±8,562)*	0,407
<b>RMS da aceleração em Y</b> [m/s <sup>2</sup> ]	15,770 (±3,532)	-0,426	16,765 (±4,642)*	-	16,564 (±4,573)*	-0,468	16,414 (±4,641)*	-0,385
<b>Aceleração Y - Amplitude</b> [m/s <sup>2</sup> ]	75,317 (±21,305)	-0,456	77,107 (±19,722)*	-	76,690 (±20,988)*	-0,455	75,769 (±23,692)*	-0,385
<b>Aceleração máxima em Z</b> [m/s <sup>2</sup> ]	61,376 (±14,186)*	-	83,063 (±26,675)*	-	94,963 (±25,019)*	-	91,761 (±26,415)*	-
<b>Aceleração mínima em Z</b> [m/s <sup>2</sup> ]	-44,227 (±11,547)	0,508	-51,078 (±12,905)*	0,495	-52,888 (±11,374)*	0,451	-55,793 (±15,466)*	0,754##
<b>RMS da aceleração em Z</b> [m/s <sup>2</sup> ]	20,367 (±2,860)	-0,391	28,324 (±4,635)*	-	30,564 (±4,949)*	-	30,463 (±5,074)*	-
<b>Aceleração Z - Amplitude</b> [m/s <sup>2</sup> ]	105,603 (±23,275)	-0,478	134,141 (±30,326)*	-	147,851 (±33,613)*	-	147,554 (±38,392)*	-

SD – Desvio Padrão; \* $\rho > 0,05$  verificou normalidade; r1 – relação entre a aceleração obtida pela IMU e o parcial de tempo 0-10m no teste de 40m; r2 – relação entre a aceleração obtida pela IMU e o parcial de tempo 10-20m no teste de 40m; r3 – relação entre a aceleração obtida pela IMU e o parcial de tempo 20-30m no teste de 40m; r4 – relação entre a aceleração obtida pela IMU e o parcial de tempo 30-40m no teste de 40m; # $\rho \leq 0,05$  e ## $\rho \leq 0,01$  – correlações significativas.

Tabela 7.4: Modelo de regressão para o parcial entre os 0m e os 10m

Variável Preditora	Células 0-10m		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	2,132		0,000
Aceleração ântero-posterior – Amplitude	-0,003	-0,370	0,193

B - Coeficientes não padronizados; -  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

Tabela 7.5: Modelo de regressão para o parcial entre os 10m e os 20m

Variável Preditora	Células 10-20m		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	2,051		0,000
RMS da aceleração médio-lateral	0,003	0,157	0,746
Aceleração vertical máxima	0,012	2,051	0,213
RMS da aceleração vertical	-0,017	-0,840	0,378
Aceleração vertical - Amplitude	-0,008	-1,586	0,389
Aceleração ântero-posterior máxima	0,001	0,323	0,591
RMS da Aceleração ântero-posterior	-0,018	-0,872	0,092
Aceleração ântero-posterior – Amplitude	-0,001	-0,463	0,471

B - Coeficientes não padronizados; -  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

No parcial dos 20-30m, o modelo proposto (Tabela 7.6 ) permitiu explicar 74,35% da variação da variável dependente (Figura 7.2c ). A equação de regressão foi desenvolvida através da Tabela 7.6. Onde,  $T_{20-30m}$  é tempo entre os 20m e os 30m,  $AccZ_{max-20-30m}$  é a aceleração ântero-posterior máxima,  $AccZRMS-20-30m$  é o RMS da aceleração ântero-posterior e  $AccZ_{amp-20-30m}$  é a amplitude da aceleração ântero-posterior. O RMS da aceleração ântero-posterior foi a única variável que apresentou valores estatisticamente significativos ( $\rho < 0,05$ ).

$$T_{20-30m}[s] = 1,588 - 0,003 * AccZ_{max-20-30m} - 0,016 * AccZRMS-20-30m + 0,002 * AccZ_{amp-20-30m} \quad (7.6)$$

As variáveis de aceleração propostas para o modelo do parcial 30-40m, explicaram 90,34% da variação da variável dependente (Figura 7.5). A equação 7.7 representa a equação de regressão proposta através da Tabela 7.7 e  $T_{30-40m}$  é o tempo entre os 30m e os 40m,  $Racc_{30-40m}$  é a taxa de aceleração,  $AccX_{min-30-40m}$  é a aceleração médio-lateral mínima,  $AccXRMS-30-40m$  é o RMS da aceleração médio-lateral,  $AccX_{amp-30-40m}$  é a amplitude da aceleração médio-lateral,  $AccZ_{max-30-40m}$  é a aceleração ântero-posterior máxima,  $AccZRMS-30-40m$ , é o RMS da aceleração ântero-posterior e  $AccZ_{amp-30-40m}$ , é a amplitude da aceleração ântero-posterior. A aceleração médio-lateral mínima, a amplitude da aceleração médio-lateral e o RMS da aceleração ântero-posterior foram as únicas variáveis que apresentaram valores estatisticamente significativos ( $\rho < 0,05$ ).



Tabela 7.6: Modelo de regressão para o parcial entre os 20m e os 30m

Variável Preditora	Células 20-30m		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	1,588		0,000
Aceleração ântero-posterior máxima	-0,003	-0,869	0,198
RMS da aceleração ântero-posterior	-0,016	-0,837	0,026
Aceleração ântero-posterior - Amplitude	0,002	0,836	0,262

B - Coeficientes não padronizados; -  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

$$\begin{aligned}
 T_{30-40m}[s] = & 1,395 + 0,022 * R_{acc30-40m} + 0,110 * Acc_{Xmin-30-40m} \\
 & - 0,003 * Acc_{XRMS-30-40m} + 0,008 * Acc_{Xamp-30-40m} + 0,001 * Acc_{Zmax-30-40m} \\
 & - 0,020 * Acc_{ZRMS-30-40m} + 0,001 * Acc_{Zamp-30-40m} \quad (7.7)
 \end{aligned}$$

Tabela 7.7: Modelo de regressão para o parcial entre os 30m e os 40m

Variável Preditora	Células 30-40m		
	B	$\beta$	$\rho$
Constante	1,395		0,011
Taxa da Aceleração	0,022	0,013	0,971
Aceleração médio-lateral mínima	0,110	2,338	0,030
RMS da Aceleração médio-lateral	-0,003	-0,125	0,846
Aceleração médio-lateral - Amplitude	0,008	2,211	0,033
Aceleração ântero-posterior máxima	0,001	0,158	0,726
RMS da Aceleração ântero-posterior	-0,020	-0,930	0,019
Aceleração ântero-posterior - Amplitude	0,001	0,430	0,555

B - Coeficientes não padronizados; -  $\beta$  - Coeficientes padronizados;  $\rho$  - sig

## 7.5 Discussão

Este estudo teve como objetivo aplicar a IMU no teste de velocidade de 40m, com atletas de elite de Atletismo, para interpretar de que forma é que a altura de salto e a aceleração obtidas através da IMU, na realização do CMJ permite associar-se com os parâmetros temporais obtidos pelas células fotoelétricas e associar os valores de aceleração obtidos com uma IMU na corrida de velocidade de 40m com os tempos obtidos através de células fotoelétricas e compreender a influência das acelerações na corrida realizada.

Os resultados obtidos na correlação da altura de salto do CMJ obtida pela IMU com os tempos das células fotoelétricas obteve associações elevadas com o primeiro parcial da corrida (0-10m). Este resultado

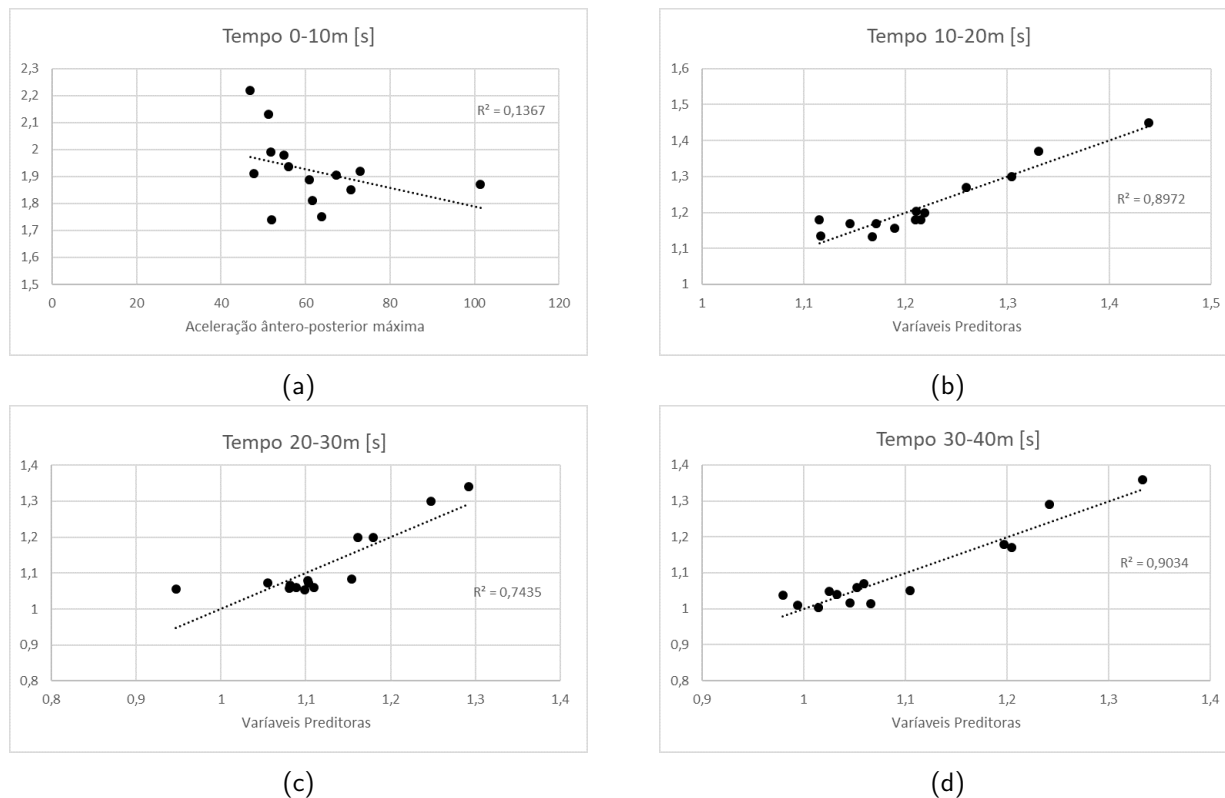


Figura 7.2: Gráficos dispersão e linhas de regressão dos modelos preditivos dos tempos parciais do teste de velocidade de 40m

demonstra que os atletas mais rápidos nos primeiros 10m são os que têm maiores indicadores de potência nos membros inferiores. Maulder et al. (2006) verificaram uma associação significativa entre a altura de salto no CMJ e o tempo aos 0-10m sugerindo, também, que os atletas mais rápidos neste parcial apresentam elevados valores de potência nos membros inferiores. O modelo de regressão linear foi desenvolvido e permitiu identificar a altura de salto como variável preditiva do tempo aos 10m. No ponto de vista prático, esta informação para além de permitir ao treinador identificar o nível físico e neuromuscular do atleta, poderá auxiliar no ajuste do seu plano de treino, quando pretendido realizar trabalho específico nos 10m.

Na análise da corrida de velocidade realizada durante 40m, quando analisado o parcial dos 0-10m verificou-se uma associação significativa com aceleração ântero-posterior máxima. O resultado apresentado permite sugerir que os atletas mais rápidos nesta fase são os que criam maiores desequilíbrios, aumentando as acelerações no sentido da corrida.

No parcial temporal entre os 10m e os 20m foi possível analisar correlações significativas nas diferentes direções da corrida, no parâmetro de aceleração máxima e no RMS da aceleração. As maiores acelerações nos diferentes sentidos do movimento indicaram que os atletas para recuperar o equilíbrio criado no primeiro parcial necessitaram de realizar maiores oscilações médio-laterais e assim, obter o menor tempo no parcial em estudo. Embora, Rabita et al. (2015) indicaram que as forças médio-laterais podem ser desprezadas no estudo da corrida de velocidade, este estudo realça a importância do estudo dos movimentos médio-laterais. Considerando este aspeto é possível indicar ao treinador que o instrumento aplicado permite avaliar as oscilações laterais e assim compreender e otimizar este aspeto mecânico dos atletas. Neste parcial ainda, a elevada correlação na aceleração vertical sugere que o atleta está a posicionar-se na corrida, ou seja, a realizar a transição da fase de aceleração para a fase de velocidade máxima, mantendo os elevados níveis de aceleração ântero-posterior. A regressão linear permitiu prever este parcial com

as variáveis de aceleração associadas no sentido médio-lateral, vertical e ântero-posterior com elevada explicação, reforçando o indicado anteriormente.

Entre os 20m e os 30m, a aceleração ântero-posterior apresentaram associações significativas reforçando que a aceleração produzida neste sentido é a que permite os atletas correrem mais rápido. Sendo a aceleração proporcionalmente direta com a Força, considerar que as corridas com melhor rendimento são as que produzem maiores forças ântero-posteriores permitindo a realização de uma melhor fase de aceleração, pela superação do impulso da fase propulsiva no movimento, perante a fase de travagem (Colyer et al., 2018; Nagahara et al., 2018; Haugen et al., 2019), provocando assim, uma maior produção de potência horizontal média produzida por cada um dos apoios (Colyer et al., 2018). A análise da regressão linear indicou que a o RMS da aceleração ântero-posterior é a que melhor explica o modelo apresentado.

Por último, o parcial entre os 30m e os 40m foi analisado e identificou que os atletas que provocaram menores acelerações mínimas médio-laterais foram os que realizaram melhor rendimento, contrariando Rabita et al. (2015) que indica que as forças médio-laterais podem ser desprezadas no estudo da corrida de velocidade. Este parcial reforça, também, o indicado por Colyer et al. (2018); Nagahara et al. (2018); Haugen et al. (2019), que maiores forças no sentido ântero-posteriores, melhores rendimentos são obtidos na corrida. Esta análise obteve maiores acelerações ântero-posteriores máximas e menores acelerações ântero-posteriores mínimas. No desenvolvimento do modelo de regressão linear foi possível identificar que a aceleração mediolateral mínima e o RMS da aceleração ântero-posterior são as variáveis que melhor explicam o parcial temporal em estudo (30-40m), contrariando Rabita et al. (2015) e reforçando o indicado por Colyer et al. (2018); Nagahara et al. (2018); Haugen et al. (2019), respetivamente. De uma forma geral, a aplicação da IMU na corrida de velocidade e interpretação da aceleração permitiram analisar como as acelerações ocorridas no sentido ântero-posterior são as que melhor explicam a corrida e assim, indicar que o RMS da aceleração ântero-posterior. A análise deste parâmetro pode ser considerado porque um atleta para correr mais depressa tem de realizar apoios com a máxima força, no menor tempo possível, considerando a 3ª Lei de Newton (Ação-Reação) e que a raiz quadrada do quadrado do valor média das acelerações, considerando assim o valor em módulo das acelerações positivas e negativas, tornando o RMS da aceleração um parâmetro relevante no estudo.

A capacidade de orientar o vetor de força no sentido horizontal da corrida de velocidade com maiores valores estiveram associados a maiores valores de velocidade (Morin et al., 2012). Morin et al. (2012) identifica o estudo da taxa de força, para compreender a inclinação do vetor força ao longo da corrida. Devido à 2ª Lei de Newton, a aceleração e a força são diretamente proporcionais e com a mesma perspetiva, este estudo analisou a taxa de aceleração produzida pelos atletas ao longo do teste de 40m. Os resultados obtidos verificaram que a taxa de aceleração aumenta até aos 30m e que dos 30m para os 40m, a taxa de aceleração diminuiu, indicando que vetor de aceleração horizontal variou o seu declive. Este aspeto pode explicar algumas razões técnicas pela qual os atletas alteram o seu comportamento relativamente à aceleração produzida, como por exemplo, a necessidade de chegar rapidamente à meta, provocando um desequilíbrio inesperado na corrida. Os atletas, também, têm a tendência em diminuir a aceleração antes do final do teste, então podemos sugerir a realização da análise do teste de corrida de velocidade de 60m, para compreender numa fase mais avançada de velocidade máxima o comportamento mecânico das forças verticais, pois estas têm estado associadas a melhores rendimento no teste de velocidade, menores tempos de apoio realizados e conseqüente maior rigidez do apoio (Čoh et al., 2018; Haugen et al., 2019).

## 7.6 Conclusões

Este estudo permitiu correlacionar a altura de salto obtida pela IMU com os tempos parciais e totais obtidos pelas células fotoelétricas, indicando que os atletas que geram maior potência nos membros inferiores são

os que realizam melhores tempos nos parciais 0-10m.

Na aplicação da IMU no teste de velocidade de 40m permitiu associar a aceleração com o rendimento da corrida de velocidade de 40m e assim, compreender melhor os aspetos biomecânicos da corrida de velocidade em estudo. Para a amostra em estudo verificou-se que o atleta realizou ao longo dos 40m maiores acelerações ântero-posteriores, tal como indicado por Colyer et al. (2018); Nagahara et al. (2018); Rabita et al. (2015) que identificaram maiores forças ântero-posteriores, nos melhores rendimentos na corrida de velocidade. As acelerações mediolaterais tiveram uma associação significativa com os parciais dos 10-20m e nos 30-40m. Para além de compreender mecanicamente a corrida, permitiu realizar igual compreensão da taxa de aceleração, permitindo perceber quando é que o atleta está a perder capacidade horizontal na corrida de velocidade.

No ponto de vista prático podemos indicar ao treinador a possibilidade de utilização de um instrumento que permite igualmente monitorizar a potência muscular dos membros inferiores, indicando a capacidade física e neuromuscular dos atletas e identificar que estes níveis estão associados aos tempos do parcial entre os 0-10m. A análise detalhada da corrida de velocidade de 40m, permite, também, auxiliar o treinador na análise de pormenores técnicos, tendo em vista a otimização do rendimento desportivo. Através dos modelos de regressão linear identificaram-se as variáveis preditoras em cada parcial, ao longo de 40m e verificou-se a importância do estudo das acelerações ântero-posteriores durante o teste de velocidade de 40m.

## 7.7 Referências Bibliográficas

- Alexander, J. P., Hopkinson, T. L., Wundersitz, D. W., Serpell, B. G., Mara, J. K., and Ball, N. B. (2016). Validity of a Wearable Accelerometer Device to Measure Average Acceleration Values during High-Speed Running. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(11):3007–3013.
- Aragón-Vargas, L. F. and Melissa Gross, M. (1997). Kinesiological factors in vertical jump performance: Differences among individuals. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(1):24–44.
- Bailey, G. P. and Harle, R. (2014). Assessment of Foot Kinematics During Steady State Running Using a Foot-mounted IMU. *Procedia Engineering*, 72:32–37.
- Bailey, G. P. and Harle, R. k. (2016). A Portable, Inexpensive Point-Tracking System for Validation of Wearable Biomechanics Sensors. *Proceedings of the 4th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support*, (icSPORTS):115–123.
- Balsalobre-Fernández, C., Glaister, M., and Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(15):1574–1579.
- Buckthorpe, M., Morris, J., and Folland, J. P. (2012). Validity of vertical jump measurement devices. *Journal of Sports Sciences*, 30(1):63–69.
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., and Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors (Switzerland)*, 18(3).
- Carlos-Vivas, J., Martin-Martinez, J. P., Hernandez-Mocholi, M. A., and Perez-Gomez, J. (2018). Validation of the iPhone app using the force platform to estimate vertical jump height. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 58(3):227–232.
- Castagna, C., Ganzetti, M., Ditroilo, M., Giovannelli, M., Rocchetti, A., and Manzi, V. (2013). Concurrent Validity of Vertical Jump Performance Assessment Systems. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(3).
- Čoh, M., Hébert-Losier, K., Štuhec, S., Babić, V., and Supej, M. (2018). Kinematics of Usain Bolt's maximal sprint velocity. *Kinesiology*, 50(2):172–180.
- Colyer, S. L., Nagahara, R., and Salo, A. I. (2018). Kinetic demands of sprinting shift across the acceleration phase: Novel analysis of entire force waveforms. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 28(7):1784–1792.
- Cruvinel-Cabral, R. M., Oliveira-Silva, I., Medeiros, A. R., Claudino, J. G., Jiménez-Reyes, P., and Boullosa, D. A. (2018). The validity and reliability of the “ My Jump App ” for measuring jump height of the elderly . *PeerJ*, 6:e5804.
- Dowling, J. J. and Vamos, L. (1993). Identification of Kinetic and Temporal Factors Related to Vertical jump Performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 9:95–110.
- Glatthorn, J. F., Gouge, S., Nussbaumer, S., Stauffacher, S., Impellizzeri, F. M., and Maffiuletti, N. A. (2011). Validity and Reliability of Optojump Photoelectric Cells for Estimating Vertical Jump Height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2).
- González-Badillo, J. J. and Marques, M. C. (2010). Relationship Between Kinematic Factors and Counter-movement Jump Height in Trained Track and Field Athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(12):3443–3447.

- Haugen, T., McGhie, D., and Ettema, G. (2019). Sprint running: from fundamental mechanics to practice—a review. *European Journal of Applied Physiology*, 119(6):1273–1287.
- Hopkins, W., a.M. Batterham, Marshall, S., and Hanin, J. (2009). Progressive Statistics. *Sportsci.org*, 2009:55–70.
- Kenneally-Dabrowski, C. J., Serpell, B. G., and Spratford, W. (2018). Are accelerometers a valid tool for measuring overground sprinting symmetry? *International Journal of Sports Science and Coaching*, 13(2):270–277.
- Kuznietsov, A. (2012). Inertial measurement system for performance evaluation of track and field sprinters. In *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, pages 1681–1686.
- Leard, J. S., Cirillo, M. A., Katsnelson, E., Kimiatek, D. A., Miller, T. W., Trebincevic, K., and Garbalosa, J. C. (2007). Validity of Two Alternative Systems for Measuring Vertical Jump Height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(4).
- Lee, J. B., Mellifont, R. B., and Burkett, B. J. (2010). The use of a single inertial sensor to identify stride, step, and stance durations of running gait. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2):270–273.
- López-Segovia, M., Marques, M. C., Van Den Tillaar, R., and González-Badillo, J. J. (2011). Relationships between vertical jump and full squat power outputs with sprint times in U21 soccer players. *Journal of Human Kinetics*, 30(1):135–144.
- Mandic, R., Jakovljevic, S., and Jaric, S. (2015). Effects of countermovement depth on kinematic and kinetic patterns of maximum vertical jumps. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 25(2):265–272.
- Markström, J. L. and Olsson, C.-J. (2013). Countermovement Jump Peak Force Relative to Body Weight and Jump Weight as Predictors for Sprint Running Performances: (In)homogeneity of Track and Field Athletes? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(4):944–953.
- Marsland, F., Mackintosh, C., Anson, J., Lyons, K., Waddington, G., and Chapman, D. W. (2015). Using micro-sensor data to quantify macro kinematics of classical cross-country skiing during on-snow training. *Sports Biomechanics*, 14(4):435–447.
- Maulder, P. S., Bradshaw, E. J., and Keogh, J. (2006). Jump kinetic determinants of sprint acceleration performance from starting blocks in male sprinters. *Journal of Sports Science and Medicine*, 5(June):359–366.
- Morin, J. B., Bourdin, M., Edouard, P., Peyrot, N., Samozino, P., and Lacour, J. R. (2012). Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 112(11):3921–3930.
- Morin, J. B., Edouard, P., and Samozino, P. (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 43(9):1680–1688.
- Morin, J. B., Gimenez, P., Edouard, P., Arnal, P., Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Brughelli, M., and Mendiguchia, J. (2015). Sprint acceleration mechanics: The major role of hamstrings in horizontal force production. *Frontiers in Physiology*, 6(DEC):1–14.
- Morin, J. B. and Sève, P. (2011). Sprint running performance: Comparison between treadmill and field conditions. *European Journal of Applied Physiology*, 111(8):1695–1703.

- Nagahara, R., Mizutani, M., Matsuo, A., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2018). Association of sprint performance with ground reaction forces during acceleration and maximal speed phases in a single sprint. *Journal of Applied Biomechanics*, 34(2):104–110.
- Nielsen, E. T., Jørgensen, P. B., Mechlenburg, I., and Sørensen, H. (2019). Validation of an inertial measurement unit to determine countermovement jump height. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 16:8–13.
- Picerno, P., Camomilla, V., and Capranica, L. (2011). Countermovement jump performance assessment using a wearable 3D inertial measurement unit. *Journal of sports sciences*, 29(2):139–46.
- Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Sàez-de Villarreal, E., Couturier, A., Samozino, P., and Morin, J. B. (2015). Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25(5):583–594.
- Raper, D. P., Witchalls, J., Philips, E. J., Knight, E., Drew, M. K., and Waddington, G. (2018). Use of a tibial accelerometer to measure ground reaction force in running: A reliability and validity comparison with force plates. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(1):84–88.
- Rogers, S. A., Hassmén, P., Hunter, A., Alcock, A., Crewe, S. T., Strauts, J. A., Gilleard, W. L., and Weissensteiner, J. R. (2019). The Validity and Reliability of the MyJump2 Application to Assess Vertical Jumps in Trained Junior Athletes. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 23(1):69–77.
- Romero-Franco, N., Jiménez-Reyes, P., Castaño-Zambudio, A., Capelo-Ramírez, F., Rodríguez-Juan, J. J., González-Hernández, J., Toscano-Bendala, F. J., Cuadrado-Peñañiel, V., and Balsalobre-Fernández, C. (2017). Sprint performance and mechanical outputs computed with an iPhone app: Comparison with existing reference methods. *European Journal of Sport Science*, 17(4):386–392.
- Schmidt, M., Rheinländer, C., Nolte, K. F., Wille, S., Wehn, N., and Jaitner, T. (2016). IMU- based Determination of Stance Duration During Sprinting. *Procedia Engineering*, 147:747–752.
- Setuain, I., Lecumberri, P., Ahtiainen, J. P., Mero, A. A., Häkkinen, K., and Izquierdo, M. (2018). Sprint mechanics evaluation using inertial sensor-based technology: A laboratory validation study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(2):463–472.
- Struzik, A., Winiarski, S., Popowczak, M., and Rokita, A. (2017). Relationships between variables describing vertical jump and sprint time. *South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation*, 39(1):177–188.
- Vince, J. (2011). *Quaternions for Computer Graphics*, volume 53. Springer-Verlag London, Bournemouth, UK, 1 edition.
- Winter A., D. (2005). *Biomechanics and motor control of human movement*. 3rd edition.
- Wixted, A. J., Billing, D. C., and James, D. A. (2010). Validation of trunk mounted inertial sensors for analysing running biomechanics under field conditions, using synchronously collected foot contact data. *Sports Engineering*, 12(4):207–212.
- Wu, G. and Cavanagh, P. R. (1995). ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, 28(10):1257–1261.





# 8

## Considerações Finais

## 8.1 Considerações Finais

Os relatórios técnicos de análise biomecânica aplicados em grandes competições, como o Campeonato do Mundo de Atletismo permitiram identificar um conjunto de métodos implementados na obtenção de parâmetros relevantes para o treinador, auxiliando-o a compreender e a otimizar o rendimento desportivo dos atletas. A procura de estudos científicos com objetivo de validar a informação identificada nos relatórios técnicos é fundamental. A revisão sistemática analisou o número de estudos desenvolvidos com atletas de elite, no Atletismo e que tipo de métodos foram aplicados na sua realização. Poucos estudos foram identificados e os métodos de análise cinemática foram utilizados, excluindo a análise cinética. Embora, poucos estudos tenham sido apresentados, a informação obtida tem permitido a compreensão de gestos técnicos e a otimização do rendimento desportivo dos atletas de elite, no Atletismo. Estes resultados sugerem a necessidade de encontrar alternativas de monitorizar os atletas no seu ambiente natural, isto é, em treino ou competição, de forma regular, e com validade e consistência.

Na análise dos instrumentos aplicados no método de análise cinemática foram identificados desenhos experimentais diferentes, bem como a aplicação de diferentes tipos de material. Na medição direta aplicaram-se células fotoelétricas na obtenção da velocidade de saída do dardo (Viitasalo et al., 2003) e na obtenção da velocidade média de uma determinada distância na corrida (Bezodis et al., 2018; Kratky and Müller, 2013). Para além disso, utilizou-se um sistema Optojump-next (Microgate, Bolzano, Italy, 1000Hz) na obtenção da amplitude de passo, tempo de passo e conseqüente frequência de passo (Kratky et al., 2016; Kratky and Müller, 2013). Relativamente, à medição indireta verificou-se a aplicação das câmaras digitais com uma frequência de captura de 50Hz para análise cinemática 2D (Bezodis et al., 2018) e 3D (Hanley et al., 2014). Ainda na análise cinemática 3D, Kratky et al. (2016) utilizaram câmaras de infravermelhos (Kratky et al., 2016). Este tipo de instrumentos permitiu determinar a velocidade média do CG, a amplitude de passo, a frequência de passo e estudar o comportamento dos diferentes segmentos para o rendimento desportivo. Esta metodologia permitiu identificar uma grande variedade de instrumentos aplicados na análise de atletas, sugerindo, cuidados na comparação e análise de resultados entre os diferentes estudos, pois é necessário ter em consideração o erro de cada instrumento, quando se pretende comparar os resultados entre estudos. Os instrumentos aplicados evoluíram na procura de obter resultados rapidamente e embora os estudos com atletas de elite sejam mais ecológicos, os protocolos ainda são aplicados em ambiente laboratorial. Sobre os métodos aplicados na videografia tem como base os métodos DLT (Abdel-Aziz et al., 2015), que se mantém atualizados na avaliação, embora exigindo um tratamento matemático elevado.

Na procura de otimizar os métodos de análise cinemática e aplicar os métodos de análise cinética na análise de atletas de elite, no Atletismo foi proposto o desenvolvimento de um instrumento, especificamente, uma IMU, com o objetivo de fácil transportabilidade e aplicação, bem como a recolha contínua, em tempo real de dados e no ambiente natural dos atletas (Camomilla et al., 2018; MacDonald et al., 2017; Bailey and Harle, 2016; Setuain et al., 2018; Wixted et al., 2010). O instrumento proposto foi desenvolvido tendo por base um conjunto de componentes eletrónicos e de baixo custo. As pequenas dimensões do instrumento, torna-o atrativo, cómodo e de fácil aplicação, indicando a possibilidade de aplicar a IMU em atletas de elite, no Atletismo, em treino e em competição, tendo como objetivo a monitorização regular do treino e da competição.

Para além do desenvolvimento do instrumento foi proposto o desenvolvimento de algoritmos que permita a obtenção de parâmetros cinemáticos, neste caso, a aceleração e a partir de cálculos obter os restantes parâmetros cinemáticos e parâmetros cinéticos. O primeiro passo considerou a remoção da gravidade da aceleração e tal como analisado, esta manifesta-se no vetor vertical da IMU (Figura 3.4). Teoricamente, esta remoção poderia ser feita pela subtração da gravidade nos dados inicialmente obtidos, no entanto, a complexidade dos dados inerciais estão associados pelo não conhecimento da orientação da IMU. Desta forma, foi proposta a aplicação dos *quaternions*, possibilitando realizar a remoção da aceleração (Wang

et al., 2015; Yi et al., 2018; Vince, 2011). No passo seguinte foi determinada a força, considerando as Leis de Newton, e identificaram-se sinais similares entre a IMU e a FP, nomeadamente na força que se manifesta na direção vertical. As forças que se manifestam no eixo ântero-posterior e no eixo médio-lateral verificaram maior variância, estes valores podem estar associado à colocação do sensor na zona lombar e à sensibilidade do mesmo e assim, detetar maiores oscilações que na FP. Além de ser possível obter parâmetros cinemáticos e cinéticos, a aplicação informática desenvolvida permitiu obter e visualizar os dados em tempo real.

O desenvolvimento do instrumento foi importante, no entanto, foi necessário garantir que o instrumento media o que realmente pretendíamos. A validade critério foi realizada em duas tarefas determinantes no controlo e avaliação do treino dos atletas, de Atletismo, o CMJ e o teste de velocidade de 40m, tendo como base *golden standards*. No CMJ, a determinação da altura de salto pelo tempo de voo é um dos métodos que tem permitido os treinadores interpretar o rendimento dos atletas. Para atletas de elite com o instrumento na posição da apófise espinhosa L5 e no calcâneo obteve validade quando comparado com a FP, tal como analisado nos estudos de validação do CMJ com a IMU (Castagna et al., 2013; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011). Ao compararmos os resultados obtidos com a IMU-CG com FP e a IMU-Foot com FP identificou-se que os resultados para o tempo de voo e altura de salto são similares, permitindo indicar um instrumento que obtém resultados idênticos ao estudo de Picerno et al. (2011).

Na análise do erro sistemático e do grau de concordância dos instrumentos, para o tempo de voo e altura de salto identificou-se um erro pequeno, representando um elevado nível de concordância ligeiramente superiores para a IMU colocada no calcâneo. Os resultados obtidos pela IMU-CG apresentaram um erro não proporcional (gráficos *Bland-Altman*), enquanto na IMU-Pé foi obtido um erro proporcional, nos resultados obtidos para a altura de salto e tempo de voo. Em ambas as posições da IMU verificou que os resultados obtidos pela FP foram ligeiramente superiores. As frequências de captura diferentes e inferiores na IMU são umas das possíveis razões para os resultados da FP serem ligeiramente superiores, pois há estudos que indicam que uma frequência de captura menor pode influenciar os resultados obtidos em menos 2% na altura de salto, pela menor precisão na definição do critério inicial e final do salto (Cruvinel-Cabral et al., 2018). Outra razão para estas diferenças podem estar associadas ao sensor estar colocado na pele e ocorrer oscilações que podem alterar os resultados obtidos (Nielsen et al., 2019). Os testes de correlação foram determinados para analisar a associação entre os instrumentos. Ao associar o tempo de voo e altura de salto entre a IMU-CG e a IMU-Pé, com a FP analisaram-se associações superiores a 0.80, tal como Picerno et al. (2011) e Castagna et al. (2013). Em suma, o instrumento desenvolvido é válido com uma boa concordância quando é pretendido avaliar o tempo de voo e, conseqüente, altura de salto. Esta análise permite indicar a IMU na avaliação do CMJ, através do tempo de voo e altura de salto, pois os resultados entre a IMU e o *golden standard* foram similares.

Os parâmetros da altura de salto têm permitido indicar a potência muscular dos membros inferiores dos atletas, no entanto, houve a necessidade de avaliar a validade de outros parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos. Os resultados obtidos para estes parâmetros indicaram que a amplitude (aceleração, velocidade e força vertical) e o RMS verificam que em termos absolutos são diferentes, indicando que a posição do sensor no corpo humano permite obter valores diferentes, mas de amplitude similar. Para além disso, estes resultados indicaram, também, que quanto mais afastada do solo for calculada a força, menor o seu valor máximo. Na IMU na zona do calcâneo, os parâmetros temporais que não obtiveram diferenças estatisticamente significativas foi o tempo da taxa de produção de força e com um elevado nível de concordância, embora não tenha obtido associações estatisticamente significativas. Os parâmetros cinemáticos demonstraram que a aceleração vertical e velocidade vertical máxima, a velocidade vertical mínima e o RMS da velocidade não apresentam diferenças estatisticamente significativas e com um elevado nível de concordância, embora o erro sistemático seja proporcional (análise *Bland-Altman*) e os resultados de correlação não tenham sido estatisticamente significativas.

Na validação da IMU no teste de velocidade de 40m, foram determinados os tempos parciais 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m e 0-40m. Na comparação entre a IMU com as células fotoelétricas, as câmaras de alta velocidade e o radar os valores obtidos foram similares, à exceção do parcial 0-10m, entre a IMU e o radar. Estes resultados indicam que podemos utilizar a IMU na medição temporal dos parciais sugeridos. Uma das razões para as diferenças entre o radar e a IMU no parcial 0-10m pode estar associada ao retorno de equilíbrio que o atleta realiza no primeiro metro da corrida, ou seja, houve necessidade de aplicar métodos de extrapolação para obter os valores de deslocamento da posição zero à posição que o instrumento volta a obter dados do atleta. Na correlação entre os instrumentos de referência e a IMU, à exceção do parcial 20-30m, para as células fotoelétricas e o radar foram obtidas correlações altas. Com um objetivo similar, o estudo de Romero-Franco et al. (2017) apresentaram associações quase perfeitas nos resultados de correlação, sem diferenças estatisticamente significativas para os parciais estudados, no entanto, pretendiam validar uma aplicação de telemóvel que utiliza a sua câmara de vídeo com um radar.

Na comparação dos resultados obtidos através da câmara de alta velocidade com a IMU, o tempo da fase de apoio e o tempo da fase de balanço foi possível verificar diferenças estatisticamente significativas, enquanto, o tempo de passo obteve valores similares. Lee et al. (2010) não apresentou diferenças significativas no tempo de apoio, tempo de passo e tempo do ciclo da passada. Nos testes de correlação obtivemos associações elevadas para o tempo de apoio e de passo, tal como Lee et al. (2010) para valores de tempo da fase de apoio e tempo de passo. Na determinação dos intervalos de confiança para o tempo da fase de apoio, o tempo da fase de balanço e o tempo de passo obteve-se valores próximos ao de Lee et al. (2010), indicando que o instrumento (IMU) pode ser aplicada na zona da apófise espinhosa L5 e obter resultados de confiança para o tempo de passo (Lee et al., 2010). Desta forma, será possível realizar avaliações da corrida durante 40m fora do laboratório, em tempo-real, de forma contínua e obter um dos parâmetros mais estudados na velocidade e no Atletismo, a frequência de passo (Kratky et al., 2016; Kratky and Müller, 2013).

Na comparação entre os parâmetros propostos para a aceleração obtida pela IMU e pelo radar foram verificados valores similares da aceleração mínima, do RMS da aceleração e na amplitude de aceleração, enquanto, na aceleração máxima foram detetadas diferenças estatisticamente significativas entre a IMU e o radar. Uma das razões para a obtenção destes resultados pode estar associada ao radar não estar em contacto permanente com o atleta, enquanto a IMU está colocada na zona da apófise espinhosa L5 do atleta e desta forma ocorrerem maiores valores de aceleração máxima, associado ainda, que os valores máximos de aceleração ocorrem durante a fase de apoio do atleta. Esta indicação, também, está associada aos valores mínimos de aceleração, pois esta ocorre na fase de voo e em ambos os instrumentos não há ocorrência de impactos, obtendo, assim valores semelhantes para os instrumentos estudados. No parâmetro da aceleração máxima obtida entre a IMU e o radar foram obtidas diferenças estatisticamente significativas e associações elevadas, indicando que embora os valores máximos sejam diferentes, há uma tendência convergente na interpretação deste valor. Na amplitude de aceleração foram obtidas correlações elevadas indicando que a amplitude média entre a aceleração mínima e máxima têm um comportamento idêntico entre instrumentos. Nos restantes parâmetros analisados entre a IMU e o radar foram obtidas correlações pequenas, não se verificando uma tendência entre os instrumentos analisados.

A validação do instrumento foi fundamental para compreender através de *golden standards*, se o instrumento desenvolvido mede o que realmente pretendemos. Contudo, este estudo, também, pretendeu compreender de que forma é que o parâmetro aceleração se manifesta nas tarefas estudadas. Nos resultados obtidos no CMJ, verificamos que a aceleração vertical máxima, a amplitude da aceleração vertical e o RMS da aceleração vertical obtiveram uma elevada associação com a altura de salto, sugerindo que maiores acelerações obtidas pela IMU, indicam maiores valores de altura de salto, indicando que a altura de salto depende de maiores acelerações verticais (Ferragut et al., 2003). Sendo a aceleração vertical proporcional à força vertical, este resultado permite indicar, também, que uma maior altura de salto, está associado a maiores

forças realizadas (Dowling and Vamos, 1993; Mandic et al., 2015).

Um das características físicas que o CMJ tem permitido compreender é a potência muscular realizada pelos membros inferiores e diversos estudos indicaram que maiores alturas de salto sugerem uma elevada potência muscular nos membros inferiores (Aragón-Vargas and Melissa Gross, 1997; Dowling and Vamos, 1993; González-Badillo and Marques, 2010; Mandic et al., 2015). A potência vertical média e máxima obteve associações elevadas com os valores de aceleração vertical da IMU, tal como foi indicado na altura de salto, podemos sugerir que ao obter maiores acelerações através da IMU, também, estamos a indicar maior potência nos membros inferiores.

Associado à potência vertical está a velocidade de execução realizada durante o CMJ, indicando que uma maior velocidade de execução no salto está associada uma maior altura de salto (Dowling and Vamos, 1993), este estudo foi ao encontro do mesmo indicador, obtendo associações elevadas entre a aceleração vertical da IMU e a amplitude da velocidade vertical obtida pela FP. Para além da amplitude da velocidade vertical foram encontradas associações negativas com a velocidade vertical mínima, tal como, Dowling and Vamos (1993), González-Badillo and Marques (2010) e Sánchez-Sixto et al. (2018) obtiveram uma correlação negativa com a altura de salto, indicando que melhores velocidades na fase excêntrica, permitem realizar uma maior altura de salto.

Ferragut et al. (2003) verificaram que o impulso realizado nesta fase não é um forte preditor da altura do salto, neste estudo verificaram-se associações moderadas nos parâmetros de aceleração, indicando, também, que o impulso não é um forte indicador para compreender os melhores resultados de altura de salto. No entanto, o RMS da aceleração vertical teve altas associações com a força mínima realizada nesta fase, indicando que maiores forças realizadas durante esta fase permitem obter um melhor rendimento no CMJ. Ferragut et al. (2003) verificaram que uma força gerada nesta fase influencia o impulso realizado e a altura de salto, durante o CMJ.

A aceleração obteve uma elevada associação com a amplitude da força vertical, considerando que a amplitude da força vertical é a diferença entre o maior e o menor valor de força e que a estes valores estão associados as forças realizadas na fase excêntrica e concêntrica, então podemos sugerir que maiores valores de aceleração vertical máxima, de amplitude de aceleração vertical e de RMS da aceleração vertical estão associados à realização de melhores transições no CMJ, corroborando com González-Badillo and Marques (2010).

Foram aplicados diversos modelos de regressão linear nos parâmetros de aceleração estudados e através dos resultados obtidos foi possível identificar que a variável RMS da aceleração vertical é a que melhor explica o rendimento do CMJ. Para além disso, este modelo reforça o indicado anteriormente, pois através da equação 6.11 é possível identificar que melhores rendimentos no CMJ estão associados os parâmetros da altura de salto (Ferragut et al., 2003), das forças verticais (Dowling and Vamos, 1993; Mandic et al., 2015), das velocidades verticais (Dowling and Vamos, 1993; González-Badillo and Marques, 2010; Sánchez-Sixto et al., 2018) e da execução mais aprimorada na fase excêntrica (González-Badillo and Marques, 2010). Analisando os resultados no ponto de vista do treinador, este estudo permite indicar que o RMS da aceleração vertical pode ser utilizado pelo treinador na análise do CMJ.

No CMJ, a IMU obtém uma informação similar quando analisada a altura de salto obtida por uma FP e a aceleração vertical recolhida por uma IMU. No ponto de vista prático cada vez mais os treinadores têm procurado compreender de que forma o atleta se comporta nos diferentes saltos realizados, numa sessão de treino, ou ao longo de uma época. Esta explicação deve-se aos atletas saltarem menos, mais ou até o mesmo por razões diferentes, ou por ter realizado mais força máxima, mais força na fase excêntrica, mais potência, ou simplesmente o atleta foi mais rápido a executar o CMJ. Desta forma, cada vez mais é fundamental observar a execução de todo o salto e este estudo permitiu identificar curvas de aceleração similares entre a FP e a IMU, permitindo definir as diferentes fases do CMJ. Na interpretação do sinal

confirmou-se que o declive da curva, no instante antes da fase de voo, são coincidentes, indicando que a velocidade obtida pela IMU e pela FP são iguais (Capítulo 6). Embora na fase de voo na IMU, não é verificada a mesma estabilidade da curva que a FP, isto sucede devido à IMU respeitar os conceitos da Física, pois a média entre o valor máximo e mínimo é de  $9,806m/s^2$ , correspondente à aceleração gravítica na terra, à latitude de recolha. Considerando estes aspetos e tendo as FP, ainda, preços bastante elevados e de difícil portabilidade (Balsalobre-Fernández et al., 2015; Buckthorpe et al., 2012; Castagna et al., 2013; Carlos-Vivas et al., 2018; Cruvinel-Cabral et al., 2018; Glatthorn et al., 2011; Nielsen et al., 2019; Picerno et al., 2011; Rogers et al., 2019), limitando a sua aplicação ao longo de uma época e nos diferentes locais de treino realizados por um atleta de alto rendimento, podemos indicar que o treinador ao utilizar a IMU na avaliação do CMJ, terá um instrumento de baixo custo, de fácil portabilidade, de fácil aplicação e que obtém dados ricos e detalhados em tempo real.

Para além de interpretar a aceleração no CMJ, a aceleração foi testada no teste de velocidade de 40m. Na análise do indicador de força dos membros inferiores, através do salto do CMJ obtida pela IMU com os tempos das células fotoelétricas verificaram-se associações elevadas com o primeiro parcial da corrida (0-10m). Este resultado indica que os atletas mais rápidos nos primeiros 10m são os que têm maiores indicadores de potência nos membros inferiores (Maulder et al., 2006). No ponto de visto prático, esta informação para além de permitir ao treinador identificar o nível físico e neuromuscular do atleta, poderá auxiliar no ajuste do seu plano de treino, quando pretendido realizar trabalho específico nos primeiros 10m. Ainda na análise do parcial 0-10m verificou-se uma associação significativa com aceleração ântero-posterior máxima. O resultado apresentado permite sugerir que os atletas mais rápidos nesta fase são os que criam maiores desequilíbrios, aumentando as acelerações no sentido da corrida.

No parcial temporal entre os 10m e os 20m foi possível analisar correlações significativas nas diferentes direções da corrida, no parâmetro de aceleração máxima e no RMS da aceleração. As maiores acelerações nos diferentes sentidos do movimento indicaram que os atletas para manter o desequilíbrio criado no primeiro parcial necessitaram de realizar maiores oscilações médio-laterais obtendo um menor tempo no parcial em estudo. Rabita et al. (2015) indicaram que as forças médio-laterais podem ser desprezadas no estudo da corrida de velocidade, no entanto, este estudo sugere que o estudo dos movimentos médio-laterais são importantes na corrida. Neste parcial verificou-se a elevada correlação na aceleração vertical sugerindo que o atleta está a posicionar-se na corrida, ou seja, a realizar a transição da fase de aceleração para a fase de velocidade máxima, mantendo os elevados níveis de aceleração ântero-posterior, ou seja, está a deslocar-se no sentido horizontal da corrida. A regressão linear permitiu predizer este parcial como as variáveis associadas no sentido médio-lateral, vertical e ântero-posterior com elevada explicação, reforçando o indicado anteriormente. Considerando estes aspetos é possível indicar ao treinador que o instrumento aplicado permite avaliar as oscilações médio-laterais e interpretar o deslocamento horizontal e vertical dos atletas, e assim compreender e otimizar mecanicamente os atletas.

Este estudo demonstrou que entre os 20m e os 30m, a aceleração ântero-posterior é a mais importante na análise da corrida de velocidade. Sendo a aceleração e a força diretamente proporcional podemos considerar que as corridas com melhor rendimento são as que produzem maiores forças ântero-posteriores permitindo a realização de uma melhor fase de aceleração, pela superação do impulso da fase propulsiva no movimento, perante a fase de travagem Colyer et al. (2018); Nagahara et al. (2018); Haugen et al. (2019), provocando assim, uma maior produção de potência horizontal média produzida por cada um dos apoios (Colyer et al., 2018). A análise da regressão linear indicou que a o RMS da aceleração ântero-posterior é o parâmetro que melhor explica o modelo apresentado.

O parcial entre os 30m e os 40m foi analisado e permitiu verificar que os atletas que provocaram menores acelerações médio-laterais foram os que realizaram melhor rendimento, contrariamente a Rabita et al. (2015) que afirma que as forças médio-laterais podem ser desprezadas. Este parcial reforça, também, o indicado por Colyer et al. (2018); Nagahara et al. (2018); Haugen et al. (2019), que maiores forças no sentido

ântero-posteriores, melhores rendimentos são obtidos na corrida. Esta análise obteve maiores acelerações ântero-posteriores máximas e menores acelerações ântero-posteriores mínimas. No desenvolvimento do modelo de regressão linear foi possível identificar que a aceleração médio-lateral mínima e o RMS da aceleração ântero-posterior são as variáveis que melhor explicam o parcial temporal em estudo (30-40m) (Colyer et al., 2018; Nagahara et al., 2018; Haugen et al., 2019). De uma forma geral, a aplicação da IMU na corrida de velocidade e a interpretação da aceleração permitiram analisar como as acelerações ocorridas no sentido ântero-posterior são as que melhor explicam a corrida e assim, indicar que o RMS da aceleração ântero-posterior pode ser o parâmetro a interpretar na análise do rendimento da corrida de velocidade e facilitar a leitura de dados por parte do treinador, para além de ser possível predizer resultados temporais através dos valores de aceleração calculados.

A capacidade de orientar o vetor de força no sentido horizontal da corrida de velocidade está associado a maiores rendimentos de velocidade (Morin et al., 2012). Morin et al. (2012) reforçam a importância do estudo da taxa de produção de força, para compreender a inclinação do vetor força ao longo da corrida. Neste estudo, foi analisada a taxa de aceleração produzida pelos atletas ao longo do teste de 40m, pela relação direta entre a aceleração e a força. Os resultados obtidos verificaram um aumento até aos 30m e dos 30m para os 40m, a taxa de aceleração diminuiu. Os resultados indicaram que vetor de aceleração horizontal variou o seu declive. Este aspeto pode explicar algumas razões técnicas pela qual os atletas alteram o seu comportamento relativamente à aceleração produzida, como por exemplo, a necessidade de chegar rapidamente à meta, provocando um desequilíbrio inesperado na corrida. Os atletas, também, têm a tendência em diminuir a aceleração antes do final do teste, então podemos sugerir a realização da análise do teste de corrida de velocidade de 60m, para compreender numa fase mais avançada de velocidade máxima o comportamento biomecânico das forças verticais, porque estas estão associadas a melhores rendimento no teste de velocidade, menores tempos de apoio realizados e consequente maior rigidez do apoio (Čoh et al., 2018; Haugen et al., 2019).

## 8.2 Limitações

Todas as limitações desta Tese de Doutoramento são atribuídas a aspetos metodológicos. A definição da unidade de medição inercial a usar no instrumento e a evolução dos mesmos considerou vários estudos pilotos, com o objetivo de definir as suas vantagens e desvantagens, bem como compreender os sinais obtidos pelos sensores e analisar se o padrão dos sinais eram similares aos conhecidos em tarefas bem definidas.

As aplicações informáticas utilizados, em diferentes plataformas de programação tornou este trabalho mais moroso e que numa fase posterior devemos de garantir uma aplicação mais usuária ao utilizador. Neste instrumento, numa primeira plataforma de programação há a necessidade de definir os parâmetros a recolher, a rede a conectar, bem como definir as características a utilizar do sensor. A segunda plataforma de programação permitiu recolher e visualizar os dados em tempo real, organizar os dados em ficheiro com o tempo, aceleração linear, velocidade angular e as características magnéticas em tempo real.

As recolhas com o instrumento desenvolvido foram realizadas à máxima frequência de captura, em que obtivemos valores superiores a 250Hz. Embora os resultados tenham sido muito satisfatórios, há a necessidade de criar uma variável para definir a frequência de captura.

O revestimento do equipamento deve ser mais maleável e semelhantes às bandas de frequência cardíaca, permitindo uma utilização mais confortável ao atleta.

O número de atletas testados deve ser maior para reforçar os resultados obtidos. Aconselha-se a utilização dos instrumentos em diferentes contextos de treino.

### 8.3 Perspetivas Futuras

O estudo realizado providenciou um conjunto de informação pertinente de como desenvolver, validar e aplicar uma IMU na avaliação de atletas de elite, no entanto, este estudo foi o início de um conjunto de investigações que se pretende realizar no futuro.

- 1) Este estudo aplicou um filtro digital passa baixo que permitiu obter parâmetros temporais, cinemáticos e cinéticos válidos. No entanto, este trabalho de investigação indica que deve ser desenvolvida uma revisão sistemática sobre os filtros aplicados com estes instrumentos, nas tarefas desportivas. Após a pesquisa, devem ser testados os diferentes tipos de filtros sugeridos pela literatura, em diferentes tarefas desportivas e compreender qual o melhor tipo de filtro a aplicar no desporto, com este tipo de instrumentos, sem perder qualidade na informação a partilhar com o treinador.
- 2) O dado da aceleração foi o analisado, por ser o parâmetro a obter imediatamente, embora a similaridade de resultados da aceleração obtidas pelo radar permite indicar futuros estudos de validação da posição da IMU, tendo como referência o radar, a videografia, e. g., Qualisys ou Xsens.
- 3) A validade critério do instrumento foi realizada, no entanto, este estudo indica a análise da validade concorrente, isto é, analisar, também, a consistência dos resultados, através da replicação deste instrumento com os mesmos atletas e nas mesmas tarefas, diferentes dias.
- 4) No teste de corrida de velocidade de 40m, a validação dos parâmetros cinéticos não ocorreu devido à dificuldade de encontrar FP com uma extensão significativa (mais de 10m), no entanto, este estudo indica a necessidade de validar os parâmetros cinéticos, na tarefa proposta (Raper et al., 2018; Setuain et al., 2018).
- 5) Na compreensão da análise cinética, este estudo sugere a aplicação dos conceitos da dinâmica inversa na corrida e compreender o comportamento segmentar do atleta, através de proposta de modelos biomecânicos.
- 6) As tarefas de CMJ e de velocidade foram as usadas, mas o estudo sugere a aplicação destes instrumentos, em atletas de elite, mas de outras disciplinas no Atletismo, como nos lançamentos, nas corridas meio fundo ou em outras modalidades, como e.g., a canoagem ou ciclismo.
- 7) O aplicação deste sensor em estudos com métodos de análise não linear pode ser determinante para compreender outros indicadores de performance.
- 8) Para além do sentido de investigação, este instrumento pode permitir o desenvolvimento de projetos informáticos no desenvolvimento de uma aplicação para telemóvel ou *tablet*, para que a receção dos dados seja mais acessível e atrativa para os treinadores e atletas.

### 8.4 Implicações Práticas

A pouca evolução dos instrumentos, principalmente, na obtenção dos dados instantâneos, em tempo real e de preferência adaptável em qualquer evento do Atletismo, competição e treino, permitiu desenvolver estudos de desenvolvimento, de validação e de aplicação de instrumentos na análise de algumas técnicas envolvidas no treino de atletas, de Atletismo.

O instrumento devido às suas pequenas dimensões, torna-o atrativo, pelo seu fácil transporte e aplicação nos atletas. Através do instrumento proposto, a informação obtida é detalhada e aplicável em tarefas distintas. Desta forma, este instrumento poderá substituir um conjunto de instrumentos que são usados para avaliar os atletas, tendo a vantagem de obter esses mesmos parâmetros de forma contínua e com maior



detalhe. A visualização da informação obtida continuamente e em tempo-real, numa primeira fase permite obter informação relevante e imediata e numa segunda fase, realizar uma análise detalhada, colmatando as necessidades dos atletas e treinadores, dos diferentes eventos do Atletismo (Picerno et al., 2011; Nielsen et al., 2019; Alexander et al., 2016; Bailey and Harle, 2014; Kuznietsov, 2012; Lee et al., 2010; Schmidt et al., 2016; Wixted et al., 2010).

Para além das suas características atrativas, a possibilidade no CMJ de determinar a altura de salto e no teste de velocidade de 40m identificar o número de apoios durante um período de tempo e a obtenção do tempo de passo e respetiva frequência de passo, torna o instrumento bastante útil na monitorização sistemática do treino e competição. A aplicação da aceleração obtida com a IMU foi estudada e indicou que o RMS da aceleração, no CMJ, é um parâmetro que é explicado através da altura de salto, da força vertical, da velocidade vertical, da taxa de produção de força e do impulso na fase excêntrica, características determinantes a estudar no CMJ (Ferragut et al., 2003; Dowling and Vamos, 1993; Mandic et al., 2015; González-Badillo and Marques, 2010; Sánchez-Sixto et al., 2018). No teste de velocidade de 40m podemos indicar ao treinador a possibilidade de utilização de um instrumento que permite igualmente monitorizar a potência muscular dos membros inferiores, indicando a capacidade física e neuromuscular dos atletas e identificar que estes níveis estão associados aos tempos do parcial entre os 0-10m. Permiteu, ainda, compreender mecanicamente a corrida ao longo dos 40m e desta forma auxiliar o treinador na análise de pormenores técnicos, tendo em vista a otimização do rendimento desportivo. Por último, os modelos de regressão linear são uma ótima ferramenta teórica porque permite identificar as variáveis mais explicativas ao longo dos parciais estão associados às acelerações ântero-posteriores, reforçando a versatilidade do instrumento e a importância de utilizar este novo instrumento na monitorização e avaliação sistemática dos atletas.

## 8.5 Conclusão Final

O instrumento desenvolvido (IMU) demonstrou ser um ótimo instrumento para o controlo e avaliação do treino e da competição, e permitiu responder às questões do estudo, como apresentamos resumidamente na Tabela 8.1.

Tabela 8.1: Tabela resumo das questões levantadas nos estudos propostos e as conclusões obtidas

	Questões	Conclusões
<b>Estudo 1 (Capítulo 2)</b>	<p>Quantos estudos, realmente, científicos foram desenvolvidos no Atletismo, com atletas de elite?</p> <p>Nesses estudos, que tipo de métodos foram aplicados?</p> <p>Em contexto de treino e competição?</p> <p>Quais os instrumentos aplicados?</p> <p>Que parâmetros foram analisados?</p>	<p>Cinco estudos</p> <p>Métodos de análise cinemática</p> <p>Aplicados em Treino e Competição</p> <p>Células fotoelétricas, Optojump-next e câmaras digitais e de infravermelhos</p> <p>Parâmetros cinemáticos lineares e angulares, com maior foco no estudo da velocidade</p>
<b>Estudo 2 (Capítulo 3)</b>	<p>Será possível desenvolver uma IMU de baixo custo?</p> <p>Será possível aplicar a IMU em treino e em competição, de atletas de elite, no Atletismo?</p> <p>É possível obter parâmetros cinemáticos e cinéticos?</p> <p>Em tempo-real?</p>	<p>Um instrumento com um custo inferior a 100\euro foi desenvolvido</p> <p>Pelas dimensões atrativas sugeriu-se a aplicação do instrumento em treino e competição</p> <p>Obteve o parâmetros cinemático de aceleração, diretamente, e através de cálculos foram determinados os restantes parâmetros cinemáticos e os parâmetros cinéticos</p> <p>O instrumento permite visualizar os resultados em tempo-real.</p>
<b>Estudo 3 (Capítulo 4)</b>	<p>Que parâmetros cinemáticos estão mais associados à FP?</p> <p>Será possível utilizar a IMU para determinar parâmetros cinéticos?</p>	<p>Os parâmetros de tempo de voo e altura de salto foram válidos, para a IMU. A IMU colocada em posições diferentes obtém valores absolutos diferentes, mas de amplitude igual para os parâmetros cinemáticos analisados.</p> <p>A IMU colocada em posições diferentes obtém valores absolutos diferentes, mas de amplitude igual para parâmetros cinéticos. A IMU-CG obteve resultados significativos no estudo de parâmetros cinéticos.</p>
<b>Estudo 4 (Capítulo 5)</b>	<p>A IMU permite determinar o tempo da fase de apoio, da fase de balanço e do tempo de passo?</p> <p>Que parâmetros cinemáticos e cinéticos podemos obter através da IMU no teste de velocidade?</p>	<p>A IMU obteve resultados válidos no tempo de passo e respetiva frequência de passo no teste de velocidade de 40m. Na avaliação dos parâmetros entre os 0m e os 40m apresentou resultados válidos.</p> <p>A IMU indicou que os valores de aceleração obtidos são válidos, se for aplicado o tratamento de dados correto. Nos parâmetros cinéticos não foi possível determinar validade.</p>
<b>Estudo 5 (Capítulo 6)</b>	<p>Será que a aceleração obtida pela IMU tem uma associação elevada com a altura de salto, força vertical, potência vertical e impulsos na fase excêntrica e concêntrica, parâmetros obtidos pela FP?</p>	<p>A associação entre a aceleração obtida na IMU e a altura de salto, a velocidade, a força vertical a potência vertical e os impulsos da fase excêntrica determinados pela FP, durante a execução CMJ foi significativa, permitindo interpretar a aceleração nas diferentes fases do CMJ.</p>
<b>Estudo 6 (Capítulo 7)</b>	<p>Será que a altura de salto e a aceleração vertical obtidas pela IMU no CMJ têm correlação com o tempo medido através das células fotoelétricas?</p> <p>De que forma é que a aceleração obtida através da IMU permite associar-se aos tempos obtidos através das células fotoelétricas?</p> <p>Será que o comportamento da aceleração permite explicar mecanicamente a corrida de velocidade?</p>	<p>A correlação entre a altura de salto obtida pela IMU com os tempos parciais obtidos nas células fotoelétricas indicam que os atletas que geraram maior potência nos membros inferiores são os que realizam melhores tempos nos parciais 0-10m.</p> <p>Na aplicação da IMU no teste de velocidade de 40m associações significativas entre a aceleração e a corrida de velocidade de 40m.</p> <p>O estudo identificou que ao longo dos 40m maiores acelerações ântero-posteriores foram realizadas. Analisar que as acelerações médio-laterais obtiveram associação com os parciais dos 10-20m e nos 30-40m.</p>

## 8.6 Referências Bibliográficas

- Abdel-Aziz, Y. I., Karara, H. M., and Hauck, M. (2015). Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry\*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(2):103–107.
- Alexander, J. P., Hopkinson, T. L., Wundersitz, D. W., Serpell, B. G., Mara, J. K., and Ball, N. B. (2016). Validity of a Wearable Accelerometer Device to Measure Average Acceleration Values during High-Speed Running. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(11):3007–3013.
- Aragón-Vargas, L. F. and Melissa Gross, M. (1997). Kinesiological factors in vertical jump performance: Differences among individuals. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(1):24–44.
- Bailey, G. P. and Harle, R. (2014). Assessment of Foot Kinematics During Steady State Running Using a Foot-mounted IMU. *Procedia Engineering*, 72:32–37.
- Bailey, G. P. and Harle, R. k. (2016). A Portable, Inexpensive Point-Tracking System for Validation of Wearable Biomechanics Sensors. *Proceedings of the 4th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support, (icSPORTS)*:115–123.
- Balsalobre-Fernández, C., Glaister, M., and Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(15):1574–1579.
- Bezodis, I. N., Kerwin, D. G., Cooper, S.-M., and Salo, A. I. T. (2018). Sprint Running Performance and Technique Changes in Athletes During Periodized Training: An Elite Training Group Case Study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(6):755–762.
- Buckthorpe, M., Morris, J., and Folland, J. P. (2012). Validity of vertical jump measurement devices. *Journal of Sports Sciences*, 30(1):63–69.
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., and Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review. *Sensors (Switzerland)*, 18(3).
- Carlos-Vivas, J., Martin-Martinez, J. P., Hernandez-Mocholi, M. A., and Perez-Gomez, J. (2018). Validation of the iPhone app using the force platform to estimate vertical jump height. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 58(3):227–232.
- Castagna, C., Ganzetti, M., Ditroilo, M., Giovannelli, M., Rocchetti, A., and Manzi, V. (2013). Concurrent Validity of Vertical Jump Performance Assessment Systems. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(3).
- Čoh, M., Hébert-Losier, K., Štuhec, S., Babić, V., and Supej, M. (2018). Kinematics of Usain Bolt's maximal sprint velocity. *Kinesiology*, 50(2):172–180.
- Colyer, S. L., Nagahara, R., and Salo, A. I. (2018). Kinetic demands of sprinting shift across the acceleration phase: Novel analysis of entire force waveforms. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 28(7):1784–1792.
- Cruvinel-Cabral, R. M., Oliveira-Silva, I., Medeiros, A. R., Claudino, J. G., Jiménez-Reyes, P., and Boullosa, D. A. (2018). The validity and reliability of the “ My Jump App ” for measuring jump height of the elderly . *PeerJ*, 6:e5804.
- Dowling, J. J. and Vamos, L. (1993). Identification of Kinetic and Temporal Factors Related to Vertical jump Performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 9:95–110.

- Ferragut, C., Arteaga-ortiz, R., and Calbet, J. A. (2003). Predicción de la altura de salto vertical : importancia del impulso mecánico y de la masa muscular de las extremidades inferiores. *Revista Motricidad*, 10:7–22.
- Glatthorn, J. F., Gouge, S., Nussbaumer, S., Stauffacher, S., Impellizzeri, F. M., and Maffiuletti, N. A. (2011). Validity and Reliability of Optojump Photoelectric Cells for Estimating Vertical Jump Height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2).
- González-Badillo, J. J. and Marques, M. C. (2010). Relationship Between Kinematic Factors and Counter-movement Jump Height in Trained Track and Field Athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(12):3443–3447.
- Hanley, B., Bissas, A., and Drake, A. (2014). Technical characteristics of elite junior men and women race walkers. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 54(6):700–707.
- Haugen, T., McGhie, D., and Ettema, G. (2019). Sprint running: from fundamental mechanics to practice—a review. *European Journal of Applied Physiology*, 119(6):1273–1287.
- Kratky, S., Buchecker, M., Pfusterschmied, J., Szekely, C., and Müller, E. (2016). Effects of a Body-Weight Supporting Kite on Sprint Running Kinematics in Well-Trained Sprinters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(1).
- Kratky, S. and Müller, E. (2013). Sprint Running With a Body-Weight Supporting Kite Reduces Ground Contact Time in Well-Trained Sprinters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(5).
- Kuznietsov, A. (2012). Inertial measurement system for performance evaluation of track and field sprinters. In *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, pages 1681–1686.
- Lee, J. B., Mellifont, R. B., and Burkett, B. J. (2010). The use of a single inertial sensor to identify stride, step, and stance durations of running gait. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2):270–273.
- MacDonald, K., Bahr, R., Baltich, J., Whittaker, J. L., and Meeuwisse, W. H. (2017). Validation of an inertial measurement unit for the measurement of jump count and height. *Physical Therapy in Sport*, 25:15–19.
- Mandic, R., Jakovljevic, S., and Jaric, S. (2015). Effects of countermovement depth on kinematic and kinetic patterns of maximum vertical jumps. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 25(2):265–272.
- Maulder, P. S., Bradshaw, E. J., and Keogh, J. (2006). Jump kinetic determinants of sprint acceleration performance from starting blocks in male sprinters. *Journal of Sports Science and Medicine*, 5(June):359–366.
- Morin, J. B., Bourdin, M., Edouard, P., Peyrot, N., Samozino, P., and Lacour, J. R. (2012). Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 112(11):3921–3930.
- Nagahara, R., Mizutani, M., Matsuo, A., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. (2018). Association of sprint performance with ground reaction forces during acceleration and maximal speed phases in a single sprint. *Journal of Applied Biomechanics*, 34(2):104–110.
- Nielsen, E. T., Jørgensen, P. B., Mechlenburg, I., and Sørensen, H. (2019). Validation of an inertial measurement unit to determine countermovement jump height. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 16:8–13.

- Picerno, P., Camomilla, V., and Capranica, L. (2011). Countermovement jump performance assessment using a wearable 3D inertial measurement unit. *Journal of sports sciences*, 29(2):139–46.
- Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Sàez-de Villarreal, E., Couturier, A., Samozino, P., and Morin, J. B. (2015). Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25(5):583–594.
- Raper, D. P., Witchalls, J., Philips, E. J., Knight, E., Drew, M. K., and Waddington, G. (2018). Use of a tibial accelerometer to measure ground reaction force in running: A reliability and validity comparison with force plates. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(1):84–88.
- Rogers, S. A., Hassmén, P., Hunter, A., Alcock, A., Crewe, S. T., Strauts, J. A., Gilleard, W. L., and Weissensteiner, J. R. (2019). The Validity and Reliability of the MyJump2 Application to Assess Vertical Jumps in Trained Junior Athletes. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 23(1):69–77.
- Romero-Franco, N., Jiménez-Reyes, P., Castaño-Zambudio, A., Capelo-Ramírez, F., Rodríguez-Juan, J. J., González-Hernández, J., Toscano-Bendala, F. J., Cuadrado-Peñafiel, V., and Balsalobre-Fernández, C. (2017). Sprint performance and mechanical outputs computed with an iPhone app: Comparison with existing reference methods. *European Journal of Sport Science*, 17(4):386–392.
- Sánchez-Sixto, A., Harrison, A., and Floría, P. (2018). Larger Countermovement Increases the Jump Height of Countermovement Jump. *Sports*, 6(4):131.
- Schmidt, M., Rheinländer, C., Nolte, K. F., Wille, S., Wehn, N., and Jaitner, T. (2016). IMU- based Determination of Stance Duration During Sprinting. *Procedia Engineering*, 147:747–752.
- Setuain, I., Lecumberri, P., Ahtiainen, J. P., Mero, A. A., Häkkinen, K., and Izquierdo, M. (2018). Sprint mechanics evaluation using inertial sensor-based technology: A laboratory validation study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(2):463–472.
- Viitasalo, J., Mononen, H., and Norvapalo, K. (2003). Athletics: Release parameters at the foul line and the official result in javelin throwing. *Sports Biomechanics*, 2(1):15–34.
- Vince, J. (2011). *Quaternions for Computer Graphics*, volume 53. Springer-Verlag London, Bournemouth, UK, 1 edition.
- Wang, L., Zhang, Z., and Sun, P. (2015). Quaternion-Based Kalman Filter for AHRS Using an Adaptive-Step Gradient Descent Algorithm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(9):1–12.
- Wixted, A. J., Billing, D. C., and James, D. A. (2010). Validation of trunk mounted inertial sensors for analysing running biomechanics under field conditions, using synchronously collected foot contact data. *Sports Engineering*, 12(4):207–212.
- Yi, C., Ma, J., Guo, H., Han, J., Gao, H., Jiang, F., and Yang, C. (2018). Estimating three-dimensional body orientation based on an improved complementary filter for human motion tracking. *Sensors (Switzerland)*, 18(11).



# A

Consentimento da Comissão de Ética

# CONSELHO DE ÉTICA DA UNIVERSIDADE DE ÉVORA

## CONSENTIMENTO INFORMADO LIVRE E ESCLARECIDO PARA INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA COM SERES HUMANOS

**Título do projeto:**

Contribuição da Biomecânica para a Melhoria do Rendimento Desportivo, em Atletismo

**Pessoa responsável pelo projeto:**

Paulo Ricardo Miranda Oliveira

**Instituição de acolhimento:**

Universidade de Évora

Este documento, designado **Consentimento, Informado, Livre e Esclarecido**, contém informação importante em relação ao estudo para o qual foi abordado/a, bem como o que esperar se decidir participar no mesmo. Leia atentamente toda a informação aqui contida. Deve sentir-se inteiramente livre para colocar qualquer questão, assim como para discutir com terceiros (amigos, familiares) a decisão da sua participação neste estudo.

Informação geral
<b>Qual a duração esperada da minha participação?</b>
A sua participação está prevista em 1 ou 2 momentos, com um espaço máximo de 6 meses.
<b>Quais os procedimentos do estudo em que vou participar?</b>
A amostra é informada sobre os objetivos e o atleta realiza o aquecimento estipulado pelo seu treinador. Foi explicada a realização do (CMJ), isto é, o atleta inicia o movimento na posição de pé, realiza um agachamento, e de seguida um salto, finalizando o movimento na posição em que iniciou, com os braços colocados na cintura, em cima de PF e com a IMU colocada na L5, sendo referência para o Centro de Gravidade e calcâneo, por ser o ponto de referência mais próximo com a PF. Colocaram-se os instrumentos sincronizados, na L5 e no calcâneo, com fita adesiva. Cada atleta realiza 3 a 4 CMJ (dependendo do seu plano de treino) e com um descanso de um minuto entre cada salto.
A amostra é informada sobre os objetivos e o atleta realiza o aquecimento estipulado pelo seu treinador. Foi explicada a realização do teste de velocidade máxima, isto é, o atleta inicia de 3 apoios, realiza a corrida na máxima velocidade, e os resultados estão a ser obtidos através do



radar de velocidade (velocidade instantânea), células fotoelétricas (velocidade média), IMU (aceleração instantânea) e câmara de alta velocidade (tempos de apoio e de voo). A IMU é colocada na L5, sendo referência para o Centro de Gravidade e calcâneo. Colocaram-se as IMU sincronizadas, na L5 e no calcâneo, com fita adesiva. Cada atleta realiza 2 a 3 corridas (dependendo do seu plano de treino) e com um descanso de dez minutos entre cada corrida. Os instrumentos são sincronizados com um salto, antes de iniciar a corrida.

**A minha participação é voluntária?**

A sua participação é voluntária e pode recusar-se a participar. Caso decida participar neste estudo é importante ter conhecimento que pode desistir a qualquer momento, sem qualquer tipo de consequência para si. No caso de decidir abandonar o estudo, a sua relação com a Universidade de Évora não será afetada. Se for o caso, o seu estatuto enquanto estudante ou funcionário da UE será mantido e não sofrerá nenhuma consequência da sua não-participação ou desistência.

**Quais os possíveis benefícios da minha participação?**

Segundo a minha base de revisão, a aplicação deste tipo de instrumentos poderá quantificar o movimento humano e rendimentos humano, de uma forma fácil, simples e em tempo-real.

**Quais os possíveis riscos da minha participação?**

As tarefas de velocidade máxima e saltos de contramovimento (CMJ) são tarefas recorrentes do treino de atletas de Alto Rendimento de Atletismo, no entanto, no teste de velocidade poderá ocorrer algum tipo de lesão ao nível muscular.

**Quem assume a responsabilidade, no caso de um evento negativo?**

No caso de um evento negativo a responsabilidade será sua.

**Há cobertura por uma companhia de seguros?**

Não existe cobertura por nenhuma companhia de seguros.

**Como é assegurada a confidencialidade dos dados?**

A informação será arquivada em papel e em formato eletrónico, sendo atribuído a cada participante um número de código com o intuito de proteger a respetiva privacidade. Assim, mesmo que os resultados do estudo venham a ser publicados, a identidade de cada um permanecerá confidencial.

**Como irão os resultados do estudo ser divulgados e com que finalidades?**

Os resultados do estudo serão divulgados em forma de Tese de Doutoramento e artigos científicos, isto é, finalidade académica e de investigação.

**Em caso de dúvidas quem devo contactar?**

Para qualquer questão relacionada com a sua participação neste estudo, por favor, contactar: (Paulo Oliveira, 919761503)

## **Assinatura do Consentimento Informado, Livre e Esclarecido**

Li (ou alguém leu para mim) o presente documento e estou consciente do que esperar quanto à minha participação no estudo Avaliação dos efeitos de um programa de treino de electroestimulação nos ganhos de força muscular e nas consequências renais que possam trazer em sujeitos do sexo feminino. Tive a oportunidade de colocar todas as questões e as respostas esclareceram todas as minhas dúvidas. Assim, aceito voluntariamente participar neste estudo. Foi-me dada uma cópia deste documento.

---

**Nome do participante**

**Assinatura do participante**

---

**Data**

---

**Nome do representante legal do participante**  
(se aplicável)

---

**Grau de relação com o participante**

**Investigador/Equipa de Investigação**

Os aspetos mais importantes deste estudo foram explicados ao participante ou ao seu representante, antes de solicitar a sua assinatura. Uma cópia deste documento ser-lhe-á fornecida.

---

**Nome da pessoa que obtém o consentimento**

**Assinatura da pessoa que obtém o consentimento**

---

**Data**

# B

Anexo B - Instituto Nacional da  
Propriedade Industrial

## Resumo

### **Dispositivo para determinar parâmetros cinemáticos e cinéticos, em tempo-real, em atletas de Alta Rendimento**

O invento é composto por um microprocessador e Unidade de Medição Inercia (IMU) para obter parâmetros cinemáticos e cinéticos, em tempo real, com o objetivo de aplicar em atletas de diversas modalidades, de Alto Rendimento. A aplicação do invento na posição teórica do Centro de Massa, punho e calcâneo tem como objetivo permitir a aplicação nas diversas modalidades desportivas, devido à versatilidade do invento. As dimensões propostas de 30mm (comprimento) x 28mm (altura) x 13mm (espessura) têm como objetivo a aplicação rápida, discreta e cómoda do atleta para permitir a realização do gesto técnico de forma natural. A ligação wireless e de longo alcance permitirá uma comunicação em qualquer local, em tempo-real e comparável ao longo de uma época, possibilitando ao treinador uma leitura continua e mais rápida dos parâmetros obtidos e assim, aumentar o rendimento desportivo do atleta.

## **Descrição**

### **Dispositivo para determinar parâmetros cinemáticos e cinéticos em atletas de Alta Competição**

#### **Domínio técnico**

[0001] A presente invenção refere-se a um dispositivo que através de um microprocessador e de um sensor inercial (Unidade de Medição Inercial - IMU) permita quantificar o rendimento desportivo de atletas de Alto Rendimento, através de parâmetros cinemáticos e cinéticos. O dispositivo apresenta uma adaptação adequada, através de dimensões atrativas, com o intuito de tornar-se discreta e não invasiva no atleta. A invenção apresenta, igualmente, uma comunicação de dados sem fios (Wireless), estável e com um alcance de pelo menos de 400 metros entre a invenção e um dispositivo de recolha (tablet, portátil ou telemóvel). Tornando a informação imediata, útil e atrativa entre o utilizador, o treinador e o atleta. Este tipo de comunicação permite à invenção obter os dados propostos com frequências de captura altas - superiores a 200Hz, isto porque, o desporto de Alto Rendimento é caracterizado por diversos movimentos explosivos.

#### **Estado da técnica**

[0002] O processo de avaliação dos atletas em contexto de treino e de competição é uma das preocupações dos treinadores durante o seu planeamento de época. Muitos tipos de métodos e equipamentos são possíveis de aplicar. Um dos métodos possíveis de aplicar em treino e em competição são os métodos Biomecânicos que através dos seus diversos instrumentos e

métodos, obtém-se dados cinemáticos - deslocamento, velocidade e aceleração e cinéticos - Força, Momentos, Potência e Energia.

[0003] Vários equipamentos com métodos de cálculo associados são identificados na avaliação de diversas características físicas e técnicas, durante o processo de treino e competitivo dos atletas de Alto de Rendimento. Na determinação de índices de força, podemos utilizar, por exemplo, tapetes de contacto - o mais simples ou plataformas de força - o mais informativo, mas não permite a sua aplicação em momentos de competição pela necessidade de um espaço apropriado e condições específicas.

[0004] Na determinação da velocidade é identificado, por exemplo, as células fotoelétricas - mais simples e rápido, mas indica somente um valor de velocidade média durante uma determinada distância ou o medidor de deslocamento a laser (radar) - mais complexo no tratamento de dados, mas que permite obter a velocidade instantânea de todo um percurso.

[0005] No processo de avaliação técnico, podemos utilizar câmaras de alta velocidade - processo de avaliação mais rápido e natural, mas com um erro associado maior. As câmaras optoelétricas são um equipamento mais preciso e com um menor erro associado, mas necessita de procedimentos mais complexos para o tratamento de dados e de um meio ambiente apropriado, não sendo possível a sua aplicação em competição.

[0006] A maioria destes equipamentos são possíveis de implementar no contexto de treino e de competição, no entanto, ocorrem sempre mais restrições quando estes são aplicados em Competição. Por exemplo, no caso das câmaras de alta velocidade é necessário um espaço para filmar um determinado movimento técnico, que em competições de maior relevo é um constrangimento devido às burocracias exigentes das instituições que tutelam as diversas modalidades. Neste

caso ainda, a necessidade de cerca de 1 hora para obter os dados cinemáticos de um gesto técnico, torna a comunicação entre o treinador e o técnico de apoio limitada. A falta de informação de parâmetros cinéticos, também, tem sido uma limitação, pois a Força é o parâmetro que realiza o movimento humano.

[0007] Novos equipamentos têm sido testados para colmatar estas limitações. As Unidades de Medição Inercial - IMU têm sido validadas em tarefas de treino pelas suas dimensões mais ajustadas.

[0008] Associado a este tipo de sensor - IMU - identificamos o invento já patenteado "Motion Tracking system with inertial-based sensing units - US9642572B2" que visa a monitorização de uma articulação, através da colocação destes sensores em dois segmentos.

[0009] Outro invento patenteado foi identificado "Systems and methods for injury prevention and rehabilitation - WO2018232266A2" e refere-se a um sistema de treino físico para prevenção e reabilitação física. Este invento identifica um dispositivo com a IMU, localizado numa posição relativa a uma articulação de um atleta para medir um deslocamento inercial da articulação, com um sensor ótico, e assim, medir o ângulo da articulação, através de uma comunicação sem fios.

[0010] Os inventos enumerados preveem, um atleta conectado em um ou dois segmentos, o que não permitirá o atleta realizar movimentos de forma natural.

[0011] Dispositivos com um sensor inercial (IMU) têm sido aplicados, mas as suas dimensões embora mais pequenas, ainda são inadequadas a desportos de Alto Rendimento.

[0012] As baixas frequências de captura utilizadas por este tipo de sensor, também, são uma limitação na aplicação em

desportos de Alto Rendimento, pois a realização de movimentos balísticos, necessitam de frequências de captura superiores.

### **Descrição Geral**

[0013] No treino - local mais controlado identifica-se evolução nos equipamentos utilizados, mas a sua dimensão, transportabilidade e a necessidade de um ambiente controlado tem dificultado a transferência destes novos equipamentos e métodos para a competição. O tipo de avaliações em competição tem estado associado a uma grande quantidade de equipamentos - câmaras de alta-velocidade e de alta-definição, medidores de deslocamento e células fotoelétricas. As Unidades de Medição Inercial (IMU) existem associados a outros dispositivos, mas as suas dimensões inapropriadas ao desporto de Alto Rendimento, frequências de captura baixas e conseqüente possível perda de informação importante para a otimização do rendimento desportivo do atleta, e uma comunicação de dados entre o dispositivo e o recetor dos dados limitado por comunicações com fios ou de ligações sem fios com pouco alcance, tem impossibilitado a sua aplicação de forma correta e eficiente no contexto de desporto de Alto Rendimento.

[0014] As IMU que estão associados a outros dispositivos e a sua aplicação no desporto de Alto Rendimento, ainda não estão devidamente descritas, relativamente, às frequências de captura a aplicar, às dimensões a usar ou outros tipos de comunicação com maior alcance e maior estabilidade de conexão.

[0015] O presente invento pretende avaliar o atleta com o mesmo tipo de dispositivo e métodos iguais, de forma a aplicá-los em treino e em competição e obter parâmetros biomecânicos comparáveis de forma sistematizada.



[0016] Referem-se como parâmetros biomecânicos associados a este dispositivo, os parâmetros cinemáticos - deslocamento, velocidade e aceleração e os parâmetros cinéticos - Força, Potência, Momentos e Energia.

[0017] O presente invento visa um dispositivo com um microprocessador (Figura 4 - 4a) com o objetivo de programar o sensor IMU (Figura 4 - 4b) e realizar a comunicação sem fios via wireless.

[0018] O sensor IMU (Figura 4 - 4b) é constituído por um acelerómetro tridimensional, um giroscópio tridimensional e um magnetómetro tridimensional. O sensor é de baixa potência permitindo baixos consumos e colocação de baterias com autonomia de pelo menos 3 horas e com um tamanho de 28mm (comprimento) x 27mm (largura) x 5.8mm (espessura). O sensor tem capacidade de obter altas frequências de captura, superiores a 200Hz.

[0019] O circuito integrado apresenta as dimensões com o objetivo de tornar a aplicação apropriada, atrativa, discreta e não invasiva no atleta.

[0020] A comunicação de dados é realizada sem fios - via wireless, estável e com um alcance de pelo menos de 400m entre o dispositivo e o dispositivo de recolha - tablet, portátil ou telemóvel.

[0021] A comunicação sem fios permitirá a receção dos dados em tempo real em qualquer meio envolvente, tornando a informação imediata, útil e atrativa entre o utilizador, o treinador e o atleta.

[0022] A aplicação do invento nas zonas indicadas (Figura 1, 2 e 3) tem o objetivo de tornar a informação objetiva e informativa considerando as necessidades do treinador e atleta.

[0023] Os resultados em bruto obtido por este invento é a aceleração gravítica - através do acelerómetro, aceleração angular - através do giroscópio e intensidade, direção e sentido dos campos magnéticos - através do magnetómetro.

[0024] A aceleração gravítica obtida através do acelerómetro da IMU considera a gravidade e não considera a inclinação do sensor. Portanto, é necessário transformar a aceleração gravítica em aceleração linear, ou seja, retirar a aceleração gravítica e considerar a inclinação do sensor. Esta transformação é realizada tendo em consideração os resultados obtidos pelo giroscópio e o magnetómetro.

[0025] Após este processo de cálculo, podemos obter os outros parâmetros cinemáticos. Através da integração da aceleração, obtemos a velocidade e através da integração da velocidade, obtemos a posição.

[0026] Relativamente, aos parâmetros cinéticos, podemos obter por exemplo a Força (Fórmula 1) e a Potência (Fórmula 2).

Fórmula (1)  $F=m*a$ , onde  $F$ , é a força determinada;  $m$ , a massa do sujeito; e  $a$ , a aceleração linear.

Fórmula (2) mesmo  $P=m*v$ , onde  $P$ , é a Potência;  $m$ , a massa do sujeito; e  $v$ , é a velocidade.

### **Breve descrição das figuras**

[0027] Para mais fácil compreensão, juntam-se em anexo as figuras, as quais representam as propostas indicadas.

[0028] A Figura 1 identifica a posição do invento no Centro de Massa, através de três propostas:

1. CM1 - Na zona lombar L3;
2. CM2 - Na zona do umbigo;

### 3. CM3 - Na zona do externo.

[0029] A Figura 2 identifica a posição do invento no punho.

[0030] A Figura 3 identifica a posição do invento no calcâneo.

[0031] A Figura 4 representa o invento na vista de baixo.

[0032] A Figura 5 representa o invento na vista de cima.

#### **Descrição detalhada**

[0033] A Figura (1, 2 e 3) mostram a representação de aplicação do invento para o Centro de Massa, Punho e Pé, respetivamente. As Figura (4, 5) permitem mostrar o invento detalhadamente.

[0034] O desenvolvimento desta invenção prevê a inserção do sensor numa zona próxima ao Centro de Massa teórico, através de uma banda (Figura 1) para obter valores cinemáticos e cinéticos comparáveis com os normalmente avaliados no desporto de Alto Rendimento.

[0035] Prevê, também, a aplicação para os membros superiores, como por exemplo, para a articulação do punho (Figura 2) - analisar os movimentos realizados por lançadores, no Atletismo ou canoístas, dando uma aplicação variada em todos os desportos de relevância Mundial.

[0036] Esta invenção prevê, também, uma aplicação no calcâneo (Figura 3) para obter os impactos reais do movimento técnico realizado, com o objetivo de analisar a absorção dos impactos realizados no calcâneo e na zona próxima do Centro de Massa verificando que ocorre a absorção dos valores cinéticos, tal como é descrito nos métodos de Dinâmica Inversa.

[0037] O invento visa a aplicação do mesmo em articulações muito específicas no corpo humano e obter informação muito

pertinente para o aumento do rendimento desportivo dos atletas, envolvidos na maioria dos desportos de relevância mundial.

[0038] A colocação do invento numa localização próxima do Centro de Massa (Figura 1) permitirá obter parâmetros cinemáticos (aceleração, velocidade e deslocamento) e cinéticos (Força realizada ou Potência) importantes para compreender o desempenho desportivo dos atletas.

[0039] A colocação do invento no punho (Figura 2) permitirá obter parâmetros cinemáticos e cinéticos importantes, para compreender a aceleração, velocidade e deslocamento de por exemplo, um engenho na mão, em lançadores no atletismo, ou mesmo a força realizada em cada pagaiada, na canoagem.

[0040] A colocação do invento no pé (Figura 3) permitirá obter parâmetros cinemáticos e cinéticos importantes, para compreender os impactos ou tempos dos apoios. Os impactos podem ser analisados pelos parâmetros cinéticos - Forças.

[0041] O invento a aplicar na banda representada na Figura (1, 2 e 3) está representado detalhadamente na Figura (4 e 5) representado a vista de baixo e de cima, respetivamente.

[0042] As dimensões propostas de 30mm (comprimento) x 28mm (altura) x 13mm (espessura) têm o objetivo de uma aplicação rápida, discreta e cómoda do atleta, isto é, permitir a realização do gesto técnico de forma natural. Para além disso, permite colocar o dispositivo em qualquer articulação do corpo humano de uma forma discreta.

[0043] A utilização do invento de forma versátil e cómoda permitirá uma aplicação regular ao longo de uma época de forma a comparar os parâmetros obtidos e em diferentes contextos, isto é, em treino e em competição. Esta regular aplicação e em desportos diferentes permitirá, também,

detetar e direccionar jovens atletas nos diferentes desportos mundiais.

[0044] A Figura 4 e 5 representam um esquema possível para o invento pretendido. Na Figura 4 é possível visualizar o plano de baixo e cada componente é descrito detalhadamente nesta secção.

2a, 2b, 2c, 2d, 2e, 2f, 2g, 2h, 2i, 2j, 2k, 2l, 2m, 2n, 2o e 2p são condensadores cerâmicos para desacoplamento e filtragem de sinal.

6a é um diodo de *Shottky* utilizado no circuito de alimentação.

4a é o circuito integrado que converte os sinais da UART do microprocessador para USB.

4b é o circuito integrado, associado à Unidade de Medição Inercial (IMU), de baixa potência que permitirá um maior tempo de utilização no terreno, devido a um maior aproveitamento da bateria, e de alta frequência de amostragem (>200Hz), para obter um maior detalhe dos movimentos balísticos realizados pelos atletas de Alta Competição. A IMU é tridimensional e constituída por um acelerómetro, giroscópio e magnetómetro e tem como objetivo obter os parâmetros cinemáticos e cinéticos.

1a, 1c, 1e, 1h, 1i, 1j, 1k, 1l, 1m, 1n, 1o, 1p e 1q, 1r e 1s são resistências para divisores de tensão ou resistências de carga.

5a e 5b são transístores que permitem colocar o microprocessador em modo de programação

3a é um conversor DC/DC para converter a tensão de entrada (5VDC) na tensão de utilizada na placa (3.3VDC).

3c é o integrado de controlo da carga da bateria.

[0045] Na Figura 5 é possível visualizar o plano de cima e cada componente é descrito detalhadamente nesta secção.

6b, 6c e 6d são LEDs para realizar o diagnóstico ao invento.

7a é um fusível *resettable* de proteção do circuito de alimentação.

8a é um o conector para a bateria, com o objetivo de tornar o invento autónomo.

8c é uma saída USB para carregar e realizar transmissão de dados.

1b, 1d, 1f e 1g são resistências para divisores de tensão ou resistências de carga.

9a é um interruptor genérico que funcionará como diagnóstico da placa.

9b é um interruptor que permite fazer *reset* à placa.

9c é um interruptor que permite ligar e desligar a placa.

3e é microprocessador com um módulo programável para definir os dados a receber pela IMU e que os transmite via wireless. A transmissão de dados é feita através de um protocolo UDP para realizar uma taxa de transferência mais alta e transmitir mais dados em menos tempo. Este componente permite, também, realizar a interface entre o invento e um tablet, portátil ou telemóvel, visualizando os parâmetros a estudar em tempo real.

[0046] A quantidade de componentes é representativa ao exemplo, caso ocorra a alteração da IMU, do microprocessador ou algum circuito integrado, a quantidade de componentes pode alterar.

Lisboa, 24 de outubro de 2019

**DESENHOS**

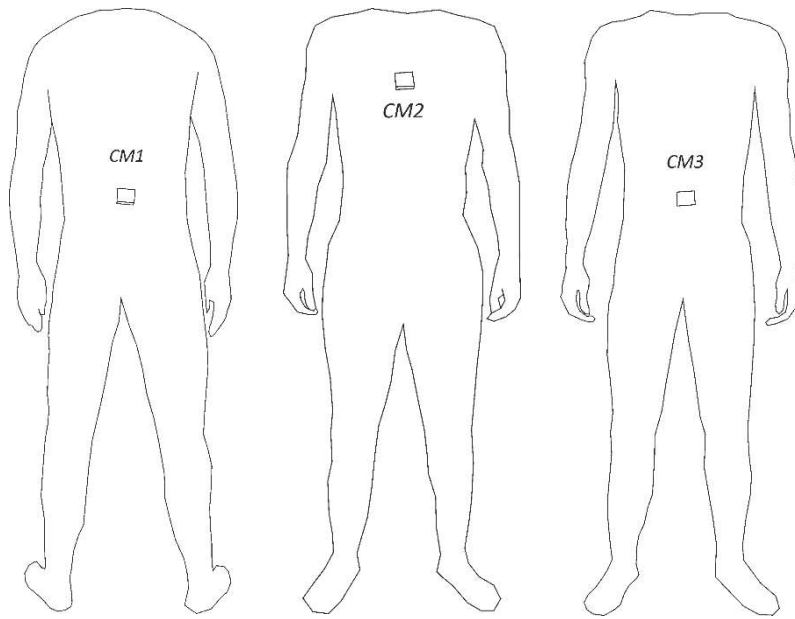


Figura 1

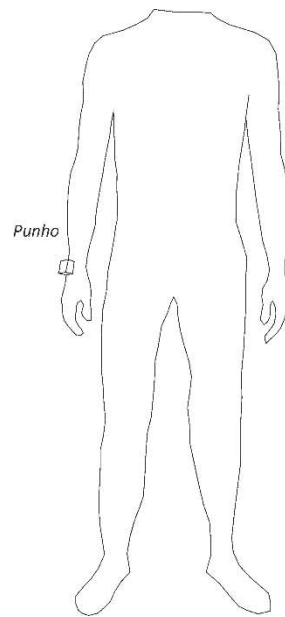


Figura 2



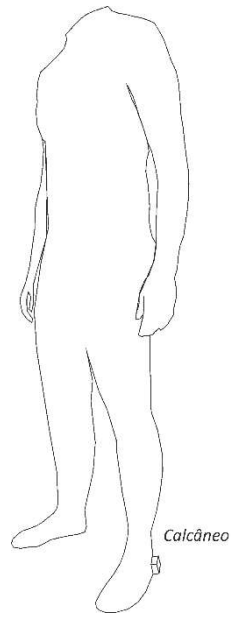


Figura 3

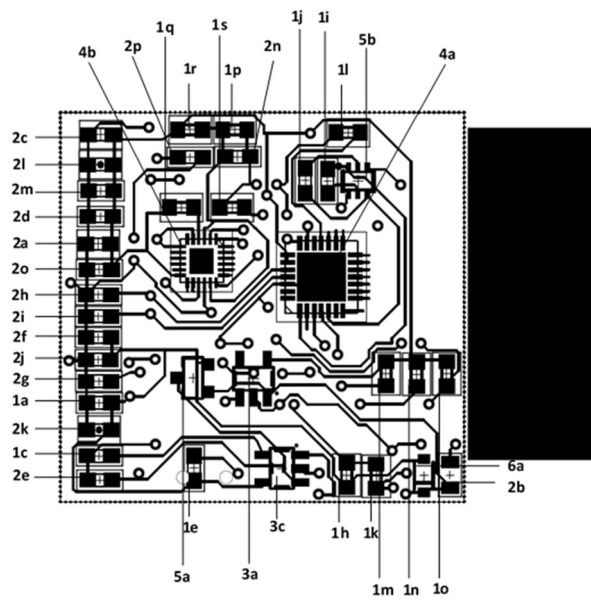


Figura 4

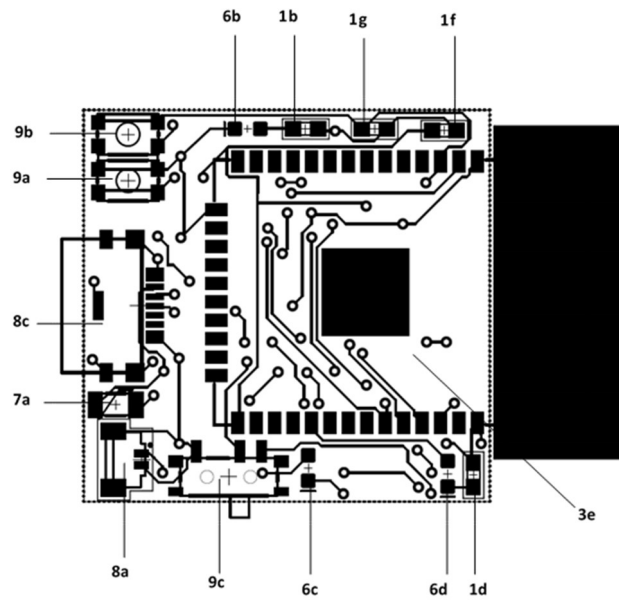


Figura 5

## Revindicações

1. Dispositivo para determinar parâmetros cinemáticos e cinéticos, em atletas de Alto Rendimento, caracterizado por compreender uma Unidade de Medição Inercial (IMU) (Figura 4 - 4b e um microprocessador (Figura 5 - 3e).
2. Dispositivo de acordo com a reivindicação n.º 1 em que o microprocessador (Figura 5 - 3e) compreende uma placa wireless que transmite os dados via wireless com um alcance de pelo menos de 400 metros.
3. Dispositivo de acordo com a reivindicação n.º 2 em que a transmissão de dados é realizada via protocolo UDP.
4. Dispositivo de acordo com a reivindicação n.º 3 em que Transmissão de dados é caracterizada pela leitura de dados em tempo-real.
5. Dispositivo de acordo com a reivindicação n.º 1 em que O microprocessador (Figura 5 - 3e) é caracterizado por compreender um módulo programável de modo a definir os dados a recolher pela Unidade de Medição Inercial (IMU).
6. Dispositivo de acordo com a reivindicação n.º 1 em que a Unidade de Medição Inercial (IMU) (Figura 4 - 4b) compreende um acelerómetro tridimensional, um giroscópio tridimensional e um magnetómetro tridimensional.

7. Dispositivo de acordo com a reivindicação n.º 1 em que a Unidade de Medição Inercial (IMU) (Figura 4 - 4b) compreende consumos de 2.5mW e uma frequência de amostragem superior a 200Hz.
8. Dispositivo de acordo com a reivindicação n.º 7 em que a IMU de baixa potência compreende baterias com autonomia de pelo menos 3 horas e com um tamanho de 28mm (comprimento) x 27mm (largura) x 5.8mm (espessura).
9. Dispositivo para determinar parâmetros cinemáticos e cinético, em atletas de Alto Rendimento caracterizado por compreender condensadores cerâmicos (Figura 4 - C1 a C16), um diodo de *Shottky* (Figura 4 - 6a), circuitos integrados (Figura 4 - 4a e 4b), resistências (Figura 4 - 1a, 1c, 1e, 1h a 1s e Figura 5 - 1b, 1d, 1f e 1g), transístores (Figura 4 - 5a e 5b), conversor DC/DC (Figura 4 - 3a), integrado de controlo da carga da bateria (Figura 4 - 3c), LEDs (Figura 5 - 6b, 6c e 6d), fusível *resettable* (Figura 5 - 7a), conector para a bateria (Figura 5 - 8a), saída USB (Figura 5 - 8c), interruptores (Figura 5 - 9a, 9b e 9c) e um microprocessador (Figura 5 - 3e).
10. Dispositivo de acordo com as reivindicações anteriores caracterizado pelo seu tamanho copilado, cujas dimensões são de 30mm (comprimento) x 28mm (altura) x 13mm (espessura).
11. Utilização do Dispositivo reivindicado nas reivindicações anteriores, caracterizado por se posicionar no Centro de Massa (Figura 1), no punho (Figura 2) e/ou no calcâneo (Figura 3) do atleta.

Lisboa, 24 de outubro de 2019



UNIVERSIDADE DE ÉVORA  
INSTITUTO DE INVESTIGAÇÃO  
E FORMAÇÃO AVANÇADA

**Contactos:**

Universidade de Évora  
**Instituto de Investigação e Formação Avançada — IIFA**  
Palácio do Vimioso | Largo Marquês de Marialva, Apart. 94  
7002 - 554 Évora | Portugal  
Tel: (+351) 266 706 581  
Fax: (+351) 266 744 677  
email: [iifa@uevora.pt](mailto:iifa@uevora.pt)