



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

# Universidade Técnica de Lisboa

## Instituto Superior Técnico



### **Caminhar no Lugar: Novas Abordagens de Controlo da Velocidade e da Direção do Deslocamento Virtual**

Luís Carlos da Silva Bruno

**Orientador:** Doutor João António Madeiras Pereira

**Co-Orientador:** Doutor Joaquim Armando Pires Jorge

**Tese aprovada em provas públicas para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Informática e de Computadores**

**Qualificação atribuída pelo Júri: Aprovado com Muito Bom**

#### **Júri**

**Presidente:** Presidente do Conselho Científico do IST

#### **Vogais:**

Doutor Nuno Manuel de Carvalho Ferreira Guimarães

Doutor Joaquim Armando Pires Jorge

Doutor João Manuel Gonçalves Duarte Cunha

Doutor João António Madeiras Pereira

Doutor Carlos António Roque Martinho

**2013**

# Universidade Técnica de Lisboa

## Instituto Superior Técnico

### **Caminhar no Lugar: Novas Abordagens de Controlo da Velocidade e da Direção do Deslocamento Virtual**

Luís Carlos da Silva Bruno

**Orientador:** Doutor João António Madeiras Pereira

**Co-Orientador:** Doutor Joaquim Armando Pires Jorge

**Tese aprovada em provas públicas para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Informática e de Computadores**

**Qualificação atribuída pelo Júri: Aprovado com Muito Bom**

#### **Júri**

**Presidente:** Presidente do Conselho Científico do IST

#### **Vogais:**

Doutor Nuno Manuel de Carvalho Ferreira Guimarães, Professor Catedrático do Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa, do Instituto Universitário de Lisboa

Doutor Joaquim Armando Pires Jorge, Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa

Doutor João Manuel Gonçalves Duarte Cunha, Investigador Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Doutor João António Madeiras Pereira, Professor Associado do Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa

Doutor Carlos António Roque Martinho, Professor auxiliar do Instituto Superior Técnico, da Universidade Técnica de Lisboa



## Resumo

A técnica de locomoção virtual “Caminhar no Lugar” (CNL) permite ao utilizador controlar o seu deslocamento em ambientes virtuais, através da realização de passos no lugar. Esta tese levanta a questão do mapeamento do movimento dos pés na determinação da velocidade e da direção virtual. Apresentamos uma abordagem CNL inovadora de controlo da velocidade, denominada SAS-WIP (Speed-Amplitude-Supported Walking-in-Place), inspirada em duas características do movimento vertical dos pés: a amplitude e a velocidade. Um estudo com participantes demonstrou consistência entre estas duas métricas, e o valor da velocidade virtual simulada. A nossa técnica de controlo da direção, mapeia o valor da rotação vertical dos pés, num valor de velocidade angular, que calcula a orientação do vetor direção. Com base nesta premissa foram desenvolvidas duas abordagens, uma suportada na velocidade angular constante e outra na velocidade angular variável.

Foi efetuada uma experiência com vinte participantes, que comparou o desempenho proporcionado pela abordagem SAS-WIP, com o estado da arte da técnica CNL, e com o joystick do dispositivo Wii Nunchuck<sup>tm</sup>, em tarefas comuns de locomoção virtual. Os resultados mostram que a SAS-WIP disponibiliza maior rapidez e eficiência do que o estado da arte, em distâncias longas, sendo também mais eficaz e preciso em distâncias curtas. Embora o joystick apresenta resultados superiores nessas métricas, relativamente às duas interfaces CNL, os participantes preferiram globalmente o SAS-WIP, reportando que sentiram menos fadiga, maior divertimento e maior controlo quando usaram a nossa abordagem relativamente ao estado da arte. Os resultados sugerem que o conceito suportado na rotação dos pés, permite desenhar uma abordagem viável para controlar a direção do deslocamento.



## **Palavras Chave**

Interação Pessoa Computador

Interfaces de locomoção virtual

Técnica Caminhar no Lugar

Controlo de velocidade e de direção

Ambientes Virtuais

Controlo motor



# **Abstract**

Walking-in-Place (WIP) allows users to control their travel in Virtual Environments by taking steps in place. This thesis addresses the problem of mapping feet movements to virtual speed and direction. We present an innovative WIP approach, called SAS-WIP (Speed-Amplitude-Supported Walking-in-Place), supported in two features of feet vertical motion: amplitude and vertical speed. A study with participants suggested consistency between these two metrics and the simulated virtual speed. Our innovative control direction technique maps feet vertical rotation to angular speed, in order to compute the direction vector. Based on this concept we developed two approaches. One uses constant angular speed while the other uses variable angular speed.

An in-depth user evaluation with twenty participants compared the performance provided by our approach to the state of the art and to Wii Nunchuck™ joystick, on common travel tasks. The results show that SAS-WIP provides both more efficiency and faster than the state of the art when walking long distances while being more accurate and precise over short distances. While the joystick presented better results in these metrics than either WIP interface, the participants preferred SAS-WIP, and reported they experienced less fatigue, had more fun and exerting more control when using our approach relatively to the state of the art. The results suggest that the concept supported on feet rotation provides a viable approach to controlling travel direction.





## **Keywords**

Human Computer Interaction

Virtual locomotion interfaces

Walking-in-place technique

Speed and direction control

Virtual environments

Motor control



## **Agradecimentos**

Esta tese é o corolário de um programa de doutoramento desafiante e enriquecedor tanto a nível pessoal como profissional.

Agradeço, antes de mais, o privilégio de ter sido orientado pelos Professor Doutor João Madeiras Pereira e Professor Doutor Joaquim Armando Jorge, que com a sábia orientação e apoio que me disponibilizaram, tornou possível percorrer esta longa e gratificante caminhada. A ambos estou eternamente grato. Aqui fica o meu mais profundo reconhecimento.

Quero partilhar com os meus colegas do Inesc-ID, do grupo VIMMI, esta conquista, por todo o seu apoio, ajuda preciosa e disponibilidade manifestada, acompanhada sempre de uma palavra de motivação. Quero agradecer em especial ao Bruno Araújo, mas também ao Ricardo Jota, Tiago Guerreiro e Hugo Nicolau. Sinto-me grato por ter integrado a formidável equipa do VIMMI.

Não posso deixar de agradecer também aos meus colegas da Estig/IPBeja, do laboratório Labsi2, pela sua ajuda, partilha de ideias e motivação, em especial ao Luís Garcia, Isabel Brito, Elsa Rodrigues e João P. Barros.

Finalmente, quero agradecer à minha família, particularmente à minha mulher Helena, pelos sinais de motivação que sempre me transmitiu, e pela sua preciosa ajuda na revisão do texto. Deixo aqui também uma palavra de profundo agradecimento aos meus pais pela ajuda com o meu filho mais novo, Luís. E quero também deixar aqui um agradecimento aos meus quatro filhos, pela compreensão que tiveram nas minhas constantes ausências.

Bem hajam!

Luís Carlos da Silva Bruno



# Índice Geral

1	Introdução.....	1
1.1	Definição do problema.....	3
1.2	Hipóteses de Investigação.....	8
1.3	Contribuições.....	8
1.4	Organização da dissertação.....	10
2	Trabalho Relacionado.....	11
2.1	Enquadramento da técnica “Caminhar no Lugar”.....	14
2.2	Dispositivos de entrada de dados.....	20
2.3	Interfaces Físicas de Controlo da Locomoção.....	21
2.3.1	Conceitos biomecânicos da marcha humana.....	22
2.3.2	Sistemas de Locomoção Física “Caminhar no Lugar”.....	24
2.3.3	Controlo da velocidade virtual da técnica CNL.....	31
2.3.4	Controlo da direção virtual.....	34
3	Proposta de Abordagem do Controlo da Velocidade Virtual.....	39
3.1	Análise dos movimentos dos pés em passos no lugar.....	39
3.1.1	Biomecânica e cinemática.....	40
3.1.2	Análise preliminar.....	42
3.2	Estudo exploratório com participantes.....	43
3.2.1	Desenho da experiência.....	44
3.2.2	Entrada de dados: calcanhar ou bico do pé.....	44
3.2.3	Análise cinemática das variáveis estudadas.....	47
3.3	Requisitos do método CNL proposto.....	52
3.4	Método de interação.....	54
3.4.1	Definição dos eventos do sistema.....	54
3.4.2	Fases de arranque e rítmica do deslocamento.....	55
3.4.3	Fase de Paragem do deslocamento.....	57

3.5	Implementação do modelo .....	58
3.6	Curva da velocidade virtual gerada .....	60
3.7	Conclusão .....	61
4	Proposta de Técnica de Controlo da Direção Suportada no Uso dos Pés .....	63
4.1	Análise dos movimentos dos pés .....	64
4.2	Desenho de duas abordagens alternativas .....	66
4.2.1	Protótipo preliminar da técnica proposta .....	67
4.2.2	Redesenho da técnica .....	70
4.2.3	Abordagem baseada na velocidade angular constante .....	71
4.2.4	Abordagem baseada na velocidade angular variável .....	73
4.3	Conclusões .....	74
5	Experiência com Participantes .....	77
5.1	Tarefas .....	78
5.2	Participantes .....	81
5.3	Métricas de Desempenho .....	81
5.4	Ambiente Virtual .....	83
5.5	Sistema .....	85
5.6	Procedimentos .....	86
5.7	Desenho das experiências e análise de dados .....	87
5.8	Equidade entre as três interfaces do teste .....	89
6	Resultados e Discussão .....	91
6.1	Controlo da Velocidade Virtual .....	92
6.1.1	Eficácia na frequência das ultrapassagens dos alvos .....	92
6.1.2	Precisão na distância final aos alvos .....	97
6.1.3	Rapidez no deslocamento dos caminhos .....	101
6.1.4	Fluidez e continuidade da interação .....	105
6.1.5	Eficiência das interfaces CNL .....	109

6.1.6	Avaliação subjetiva baseada em questionário.....	111
6.2	Controlo da Direção Virtual.....	113
6.2.1	Tempo da Tarefa.....	114
6.2.2	Percentagem de Alvos Transpostos .....	115
6.2.3	Percentagem de Tempo das Viragens de Direção.....	116
6.2.4	Número de Viragens da direção.....	118
6.2.5	Avaliação subjectiva baseada em questionário.....	119
7	Conclusões e Trabalho Futuro.....	123
	Bibliografia .....	124





# Índice de Figuras

Figura 1: Fases de um ciclo de marcha (imagem extraída de (Sousa, 2010)) .....	22
Figura 2: Exemplo do movimento de um ciclo de marcha (imagem adaptada de (Pinto, 2007)) .....	23
Figura 3: Duas estratégias diferentes de mudar a direção do deslocamento da marcha real (adaptado de (Hase & Stein, 1999)) .....	23
Figura 4 – Trajetórias do deslocamento usando joystick e a técnica de caminhar no lugar (imagem adaptada de Bouguila et al., 2002) .....	36
Figura 5 – Erros de rotação dos utilizadores quando se deslocam para um objeto visto anteriormente mas que já não está visível durante a tentativa (imagem adaptada de (Williams et al., 2006)) .....	36
Figura 6 – Ciclo biomecânico dos passos no lugar (adaptado de (Wendt et al., 2010))	41
Figura 7: Gráfico de posição do calcanhar e do bico do pé durante um passo.....	45
Figura 8: Gráfico de velocidade no calcanhar e no bico do pé durante um passo.....	46
Figura 9: Variação da posição dos dois pés em nove passos (3 lentos, 3 moderado e 3 rápidos) .....	48
Figura 10: Variação da velocidade vertical dos pés em nove passos (3 lentos, 3 moderados e 3 rápidos) .....	49
Figura 11 - Variação da velocidade relativamente à altura máxima do pé.....	49
Figura 12: Fases da marcha real relativamente à velocidade .....	53
Figura 13: Diagrama de transição de estados para um único passo .....	54
Figura 14: Gráfico da velocidade virtual gerada nos dois passos iniciais .....	55
Figura 15: Relação entre a velocidade média da fase descendente e o tempo do duplo apoio seguinte .....	58
Figura 16: Máquina de estado do nosso modelo CNL .....	59
Figura 17: Resultado da velocidade virtual a partir dos passos no lugar .....	60
Figura 18 – Posição neutra dos pés sem efeito na alteração da direção do deslocamento .....	65
Figura 19 - Posição dos pés com efeito na alteração da direção do deslocamento (direita) .....	65
Figura 20 – Representação do vetor de cada um dos dois pés. ....	68
Figura 21 - Representação do vetor de cada um dos dois pés e o respetivo vetor resultante.....	68

Figura 22 – Cenário 3D do AV do estudo preliminar da técnica de controlo de direção	68
Figura 23 – Abordagem de controlo de direção baseada na velocidade angular constante .....	72
Figura 24 – Limiares de ângulos e de velocidades angulares da abordagem baseada na velocidade angular variável .....	74
Figura 25: Posicionamento dos pórticos e definição dos caminhos não-lineares.....	80
Figura 26: Ecrã que exhibe o ambiente virtual do cenário do controlo de velocidade.....	84
Figura 27: Ecrã que exhibe o ambiente virtual do cenário do controlo de direção .....	84
Figura 28: Ambiente de realização da experiência com destaque para o ecrã de larga escala .....	86
Figura 29: Média da frequência das ultrapassagens por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ).....	95
Figura 30: Média da distância final ao alvo por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ).....	99
Figura 31: Média das velocidades médias ocorridas por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ).....	102
Figura 32: Média do número de paragens no deslocamento, por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ) .....	107
Figura 33: Média do número de passos por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ) .....	109
Figura 34: Resultados médios da apreciação subjectiva dos critérios seguintes: Divertimento, Facilidade de Uso, Fadiga, Controlabilidade, Naturalidade e Apreciação Global .....	112
Figura 35: Tempo médio de realização da tarefa por cada interface. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ) .....	114
Figura 36: Percentagem média dos alvos ultrapassados. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ).....	116
Figura 37: Percentagem média do tempo das viragens de direção por cada interface. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ) .....	117
Figura 38: Número médio de viragens por caminho percorrido. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ ) .....	118

Figura 39: Resultados médios da apreciação subjectiva dos critérios seguintes: Divertimento, Facilidade de Uso, Fadiga, Controlabilidade, Naturalidade e Apreciação Global .....	120
--	-----



## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Taxonomia de navegação proposta por Bowman et al. (Bowman et al., 1997).....	14
Tabela 2 – Taxonomia de navegação de (Tan et al., 2001).....	17
Tabela 3 – Características de vários sistemas baseados na técnica “Caminhar no Lugar” segundo vários critérios.....	33
Tabela 4 - Variáveis cinemáticas dos passos no lugar.....	41
Tabela 5 – Resultados da velocidade média de cada tipo de passo, do bico do pé e do calcanhar.....	47
Tabela 6 – Estatística descritiva dos resultados da altura máxima e da velocidade do pé.....	50
Tabela 7: Sequência, distâncias e classes de distâncias dos caminhos lineares.....	79
Tabela 8: Comparação dos valores da velocidade gerada pelo SAS-WIP e GUD-WIP	89
Tabela 9: Média e desvio padrão da frequência das ultrapassagens por interface.....	93
Tabela 10: Média e desvio padrão da frequência das ultrapassagens por alvo.....	94
Tabela 11: Comparação da eficácia disponibilizada pelas interfaces (“~”- Semelhante a, “>”-Superior a, “<” – Inferior a).....	96
Tabela 12: Média e desvio padrão da distância final ao alvo por interface.....	98
Tabela 13: Média e desvio padrão da distância final aos alvos por distância percorrida	98
Tabela 14: Comparação da precisão disponibilizada pelas interfaces para diferentes distâncias (“~”- Semelhante, “>”-Superior a, “<” – Inferior a).....	100
Tabela 15: Comparação da rapidez disponibilizada pelas interfaces (“~”- Semelhante, “>”-Superior a, “<” – Inferior a).....	104
Tabela 16: Média e desvio padrão do número de paragens do deslocamento por interface.....	105
Tabela 17: Média e desvio padrão do número de paragens nos nove caminhos de diferentes distâncias.....	106
Tabela 18: Comparação das interfaces relativamente à fluidez e continuidade de interação disponibilizada (“~”- Semelhante, “>”-Superior a, “<” – Inferior a).....	108
Tabela 19: Comparação das interfaces CNL relativamente à eficiência disponibilizada (“>”-Superior a, “<” – Inferior a).....	111



# 1 Introdução

A locomoção é a atividade que permite aos seres vivos movimentarem-se de um local para outro, em diferentes ambientes, percorrendo variadas distâncias, em caminhos lineares e não lineares, e suporta a realização de outras tarefas primárias. Dependendo do meio em que se movimentam e das suas características anatómicas, eles utilizam segmentos corporais diferentes para propulsionar e orientar a sua locomoção. A marcha e a corrida são os exemplos principais da locomoção humana sobre o solo. A natação é um outro exemplo de locomoção, que os seres humanos realizam no ambiente aquático. Nos três exemplos de tipos locomoção apresentados, o contributo disponibilizado por cada um dos vários segmentos corporais é diferente. No caso da marcha, os pés e as pernas têm um papel preponderante, enquanto que, na natação, são as pernas, o tronco e os braços os segmentos dominantes. O movimento de cada um desses segmentos tem um efeito propulsor no movimento translacional e rotacional do corpo.

Ao caminhar, o ser humano recebe retorno de sinais sensoriais diferentes: (i) visuais, com a atualização da informação dos objetos que constituem o meio envolvente (pistas visuais), e (ii) propriocetivos e vestibulares. Os sinais propriocetivos resultam de informações táteis do corpo (pele e músculos, entre outros), e permitem ao ser humano reconhecer a localização espacial do seu corpo e a posição de cada um das suas partes em relação aos outros segmentos corporais. Estes sinais são importantes na coordenação motora de diferentes atividades humanas: segurar e manipular objetos, manter-se de pé, caminhar, entre outras. O sistema vestibular recebe informação rotacional do corpo (particularmente da cabeça) em torno do seu eixo vertical, permitindo ao sujeito ter uma noção das mudanças de direção tomadas (orientação espacial).

O controlo da locomoção virtual é uma das tarefas mais comuns, que os utilizadores realizam nos Ambientes Virtuais (AV's). Essa tarefa possibilita ao utilizador controlar a sua posição no AV, em caminhos lineares ou não lineares. Embora em muitos casos não constitua o objetivo primário do utilizador (Bowman et al., 2004), o deslocamento virtual suporta outras tarefas, como, por exemplo, a manipulação e seleção de objetos.



As metáforas de navegação podem dividir-se em duas grandes categorias, relativamente ao tipo de controlo de interação: direta e indireta (Mine, 1995). A primeira categoria inclui técnicas que usam os segmentos corporais (cabeça, braços, mãos, torso, pernas e pés, entre outros) para controlar a sua posição do ponto de vista no AV. As técnicas baseadas em interação indireta são suportadas em dispositivos físicos de controlo, como por exemplo, o teclado, rato, o *joystick*, o *gamepad*, o volante e os pedais. Com exceção deste último exemplo, todos os outros dispositivos são controlados pelas mãos/dedos do utilizador. O controlo motor assegurado por esses segmentos corporais é bastante fino, o que permite realizar ações de controlo em AV's com bastante precisão e eficácia.

As técnicas de interação direta mais comuns para controlar a locomoção virtual são as seguintes: “Caminhar Real” (CR) e “Caminhar no Lugar” (CNL). Com a técnica CR, o utilizador pode caminhar natural e livremente, num espaço físico, com uma área adequada para o efeito, por forma, a controlar a sua posição e a orientação do ponto de vista virtual. As implementações desta técnica fazem um mapeamento direto entre a posição e a orientação física, e a posição e orientação virtual. Esta técnica tem a desvantagem de estar limitada às dimensões do espaço físico e ao alcance do sistema de *tracking*, que captura os movimentos do utilizador. Todas as implementações desta técnica suportam a visualização num *HMD* (*Head Mounted Display*).

A técnica CNL permite ao utilizador controlar a sua posição virtual, através da realização de passos no lugar, normalmente, em áreas de pequena dimensão. Para tal, os movimentos corporais que indiciam as ações de controlo do utilizador são mapeados na posição do seu deslocamento virtual. As implementações destas técnicas têm dividido o suporte de visualização entre os HMD's e os ecrãs de parede de grandes dimensões. Estudos anteriores mostram que a técnica CNL pode aumentar o sentido de presença do utilizador, quando comparado com o uso do joystick (Usoh et al., 1999, Razzaque et al., 2002) e é percecionado como uma técnica mais natural de locomoção virtual (Yan et al., 2004).

O trabalho desenvolvido nesta tese posiciona-se na investigação de novas abordagens da técnica CNL. Estas interfaces possuem algumas características que as tornam, do nosso ponto de vista, promissoras no futuro. Permitem ao utilizador operarem em áreas de reduzidas dimensões (ex: 1mx1m), o que possibilitará o seu uso em ambientes domésticos. Esta convicção é tanto mais forte devido à evolução dos sistemas de

*tracking* ótico e miniaturizado, e do tamanho crescente dos ecrãs que estão em instalação nas salas de habitação.

O uso de interfaces baseados na técnica CNL permite libertar as mãos dos utilizadores para outras tarefas de interação em AV's. Se olharmos para um *gamepad* de uma consola de jogos, é possível verificar a existência de um número elevado de controlos associados a várias funções, como, por exemplo, controlar a velocidade, a direção do deslocamento, a orientação da vista e disparar. Esta sobrecarga de funções no controlo motor das mãos/dedos do utilizador também provoca uma sobrecarga cognitiva. O uso da técnica CNL pode mitigar esta situação, transferindo as funções de controlo da posição e da direção para os segmentos corporais que melhor exprimam os passos no lugar.

Apesar destas características positivas, as interfaces CNL que têm sido desenvolvidas possuem algumas limitações, que este trabalho pretende superar. A relação que o utilizador estabelece entre as suas ações, dos passos no lugar e o efeito na alteração da posição virtual, são, quanto a nós, um dos elementos chave para o sucesso desta técnica.

## 1.1 Definição do problema

Têm sido propostas diferentes **abordagens da técnica CNL**, de controlo da posição, **em caminhos lineares**, suportadas na deteção do movimento de diferentes segmentos corporais, como forma de reconhecer os passos no lugar, com destaque para as seguintes: cabeça (Slater et al., 1995, Usoh et al., 1999), joelhos (Templeman et al., 1999, Yan et al., 2004), e calcanhares (Feasel et al., 2008, Wendt et al., 2010).

Por outro lado, foram usados diferentes métodos de cálculo do deslocamento virtual, com destaque para os seguintes: (i) comprimento fixo de um passo virtual (Slater et al., 1995, Usoh et al., 1999), comprimento variável de um passo virtual (Templeman et al., 1999) e velocidade (Yan et al., 2004, Feasel et al., 2008, Wendt et al., 2010), que foram baseados em leis do movimento que usam diferentes relações entre o movimento físico e o virtual. Templeman et al. usam a extensão horizontal dos joelhos, durante os passos no lugar, para determinar a velocidade virtual (Templeman et al., 1999). Yan et al. usam a velocidade vertical dos joelhos para gerar a velocidade virtual, a partir de uma fórmula calculada na senda de estudos que relacionam a velocidade horizontal do corpo humano,

com a velocidade vertical do joelhos e a frequência dos passos (Yan et al., 2004). Feasel et al. desenvolveram o sistema LLCM-WIP (Low-Latency, Continuous-Motion Walking-in-Place), que gera a velocidade virtual a partir da velocidade dos calcanhares, através de técnicas de processamento do sinal. Finalmente, (Wendt et al., 2010) desenvolveram o sistema GUD-WIP (Gait-Understanding-Driven Walking-In-Place), que é atualmente o estado da arte da técnica CNL e que obtém a velocidade virtual a partir de uma equação do ciclo biomecânico da marcha humana, calculada em função da frequência dos passos e da altura do sujeito (Wendt et al., 2010).

Embora a técnica CNL tente simular e explorar a experiência que os sujeitos têm da marcha humana, existem grandes diferenças no movimento corporal entre os dois tipos de locomoção. Na marcha humana, o corpo movimenta-se horizontalmente, enquanto que, na realização de passos no lugar, o corpo se mantém praticamente estacionário. Por outro lado, o movimento dos pés nos passos no lugar é predominantemente vertical, enquanto que, na marcha humana, ocorre sobre o plano horizontal do solo.

Como foi referido anteriormente, os sinais proprioceptivos permitem ao sujeito perceber a posição de cada segmento corporal, relativamente aos outros. Este fator humano deve ser tido em conta na escolha dos segmentos corporais a usar no reconhecimento dos passos, bem como nas leis do movimento que relacionam o movimento físico de controlo com o movimento virtual obtido.

Com base nas premissas anteriores, no início deste estudo colocámos como hipótese que os sujeitos percebem e controlam, de forma precisa, uma relação entre a altura percorrida pelo pé, nos passos no lugar, e a velocidade virtual que pretendem atingir. Na sequência de estudos com participantes, desenvolvidos nesta tese, e descritos no capítulo 3, foi possível verificar que eles estabeleceram uma relação consistente entre a altura máxima dos passos, e três níveis diferentes (lentos, moderados e rápidos) da velocidade virtual simulada. Desse estudo também emergiu o uso que os participantes fizeram da velocidade vertical dos pés para expressarem o nível de velocidade pretendida. Isto permitiu inferir que os utilizadores expressaram uma relação consistente entre a velocidade vertical dos pés e a velocidade virtual pretendida.

Com base nas descobertas anteriores, desenvolveu-se nesta tese uma abordagem inovadora da técnica WIP, de controlo da velocidade em caminhos lineares, denominada SAS-WIP (Speed-Amplitude-Supported Walking-in-Place), cuja lei do

movimento é baseada nas métricas seguintes, do movimento vertical dos pés: amplitude e velocidade (descrita no capítulo 3).

Esta abordagem SAS-WIP pretende disponibilizar ao utilizador as seguintes vantagens, relativamente a outras interfaces CNL:

- Uma previsão e um controlo mais preciso da distância virtual a percorrer em cada passo, principalmente no controlo da posição de paragem, para qualquer valor de distância, mas com particular atenção nas distâncias mais curtas;
- Atingir com facilidade velocidades mais elevadas, assegurando continuidade no movimento entre e intra-passos, especialmente em distâncias longas;
- Despender menos energia e logo assegurar menos fadiga aos utilizadores, especialmente em distâncias longas;
- Latência baixa do início e do fim do deslocamento virtual.

Para validar os conceitos definidos anteriormente e o desempenho proporcionado aos sujeitos pelo SAS-WIP, escolheram-se, para termo de comparação, a interface GUD-WIP e um modelo comum de um *joystick* analógico. A escolha desta última interface justifica-se pelo facto de ser a mais comum e que é usada no controlo de locomoção em AV's, e também de ser objeto de vários estudos de usabilidade. Embora, como referido anteriormente, permita ao utilizador um controlo motor mais fino do que disponibilizado pelo uso dos pés, constitui neste estudo uma base de referência para os resultados das interfaces CNL.

A interface GUD-WIP, que é o atual estado da arte, foi escolhida para termo de comparação com a SAS-WIP, porque mapeia a velocidade virtual, a partir de uma lei do movimento da marcha real, que não teve em atenção a especificidade dos passos do lugar. Por outro lado, usa nesse mapeamento a frequência dos passos (mais a altura do sujeito), que é contrastante com a amplitude dos passos (mais a velocidade dos pés) utilizada na interface SAS-WIP. Inferimos que a amplitude dos passos no lugar assegura ao utilizador maior eficiência e eficácia do que a frequência dos pés, em tarefas de controlo de posição, em caminhos lineares. Não são conhecidos estudos publicados de testes com participantes nos quais a interface GUD-WIP fosse avaliada, em tarefas de controlo de locomoção em AV's.

Nesta tese desenvolveu-se uma experiência com participantes (descrita no Capítulo 5), que resultou numa análise comparativa entre as duas interfaces CNL e o *joystick* analógico, do dispositivo físico “Wimote-Nunchuk<sup>tm</sup>”, com o intuito de avaliar o efeito provocado pelo desempenho dos participantes, em tarefas de controlo do deslocamento linear e da paragem antes dos alvos. O desempenho da tarefa foi medida com base em critérios diferentes: eficácia, precisão, eficiência, rapidez e fluidez de interação.

Os resultados desse estudo (descritos no Capítulo 6) mostram que a SAS-WIP disponibiliza maior rapidez e eficiência do que a GUD-WIP, em distâncias longas, sendo também mais eficaz e precisa em distâncias curtas. Embora o *joystick* apresente resultados superiores nessas métricas, relativamente às duas interfaces CNL, os participantes preferiram, globalmente, o SAS-WIP, reportando que sentiram menos fadiga, maior divertimento e maior controlo, quando utilizaram a nossa abordagem relativamente ao estado da arte.

A maioria das abordagens desenvolvidas de técnicas CNL suportam somente o controlo da posição, baseado na tarefa de controlo da velocidade virtual, não disponibilizando métodos integrados no fluxo dos passos no lugar, para controlar a direção do deslocamento virtual. Normalmente são usadas outras interfaces, como é o caso do *joystick* (Feasel et al., 2008), ou a cabeça (Slater et al., 1995).

Pensamos que poderá haver benefícios para o utilizador, ao integrar o controlo de direção nos movimentos físicos que são usados para controlar a velocidade. Por um lado, liberta as mãos do utilizador de mais uma função, e, por outro lado, pode assegurar uma melhor orientação espacial do AV, do que usando um dispositivo físico (Chance et al., 1998) (Williams et al., 2006).

Os sujeitos conseguem ter uma noção da posição e da orientação dos seus pés, com base nos sinais propriocetivos e vestibulares que recebem durante os passos. Com base nesta premissa, podemos afirmar que é possível aos sujeitos relacionarem a orientação dos pés com a direção do deslocamento virtual que pretendem tomar.

Propusemo-nos desenvolver uma técnica de controlo de direção virtual baseada no movimento dos pés, nos passos no lugar, que suporte a visualização no ambiente semi-imersivo, de um ecrã de parede de grandes dimensões. Esta característica pode limitar a

visualização do utilizador. Ao rodar o seu corpo em frente ao ecrã, ele pode perder parcialmente a visualização do ecrã. Esta restrição pode diminuir o sentido de presença no AV (Razzaque et al., 2002).

Desenvolvemos uma técnica de controlo da direção virtual (descrita no Capítulo 4), que permite ao utilizador relacionar o valor da rotação vertical dos pés com a alteração da direção do deslocamento virtual. Para mitigar o problema da perda da visualização, foi encontrada uma solução suportada no uso da velocidade angular, que permite minimizar a rotação dos pés e do corpo, sem prejudicar a alteração da direção. Foram desenvolvidas duas abordagens, uma suportada na velocidade angular constante, que altera a direção de forma mais conservadora e previsível, e uma outra baseada na velocidade angular variável, que pode assegurar mais flexibilidade na rapidez de alteração da direção.

Para validar a nossa técnica de controlo da direção virtual, o *joystick* analógico, do dispositivo físico “Wimote-Nunchuk<sup>tm</sup>”, foi escolhido como termo de comparação. A justificação para a escolha desta última interface é semelhante à apresentada no caso anterior da avaliação comparativa das interfaces de controlo de velocidade. Como está comprovadamente estudada, funciona como uma base de referência para percebermos quão distantes estão os resultados produzidos pelas nossas abordagens.

Para avaliar comparativamente a viabilidade desta técnica proposta, desenvolveu-se uma experiência com participantes (descrita no Capítulo 5), que resultou numa análise comparativa entre as duas abordagens propostas e o referido *joystick* analógico, para avaliar o efeito provocado no desempenho dos participantes, em tarefas de controlo da direção do deslocamento não linear. O desempenho da tarefa foi medida com base nas métricas: tempo da tarefa, percentagem de alvos transpostos, percentagem do tempo das viragens de direção e número de viragens.

Os resultados sugerem que o nosso conceito de suportar a alteração da direção virtual no movimento de rotação dos pés tem viabilidade, em tarefas de controlo do deslocamento em caminhos não lineares.

## 1.2 Hipóteses de Investigação

A questão da relação que o utilizador estabelece entre as suas ações com os pés, nos passos no lugar, e o efeito na alteração da posição virtual, em ações de controlo da velocidade e da direção, foi o foco do trabalho desta tese.

Neste sentido, relativamente ao controlo da velocidade virtual suportado numa técnica CNL, colocou-se a seguinte hipótese de investigação:

- Uma abordagem CNL, que retire proveito das características predominantes do movimento vertical dos pés, permitirá ao utilizador controlar melhor a relação entre as suas ações físicas e a velocidade virtual que pretende atingir, do que usando uma outra abordagem CNL, que não se baseie em características desse movimento vertical?

Tendo como objetivo integrar o controlo da direção do deslocamento virtual no movimento dos passos no lugar, colocou-se a seguinte hipótese de investigação:

- Será viável controlar a direção do deslocamento virtual, através da relação que o utilizador estabelece entre o movimento de rotação dos pés e alteração de direção que se pretende obter, num cenário em que o mesmo está praticamente estacionário, a dar passos no lugar, em frente a um ecrã de larga escala?

O trabalho de investigação desenvolvido nesta tese, e que é descrito nos próximos capítulos, tenta encontrar as soluções para responder a estas hipóteses.

## 1.3 Contribuições

No âmbito desta tese, foram inicialmente desenvolvidos trabalhos que permitiram focar a investigação na área da locomoção virtual e da visualização em ecrãs de grandes dimensões. A participação no projeto europeu IMPROVE<sup>1</sup>(projeto focado na visualização de desenho de arquitectura), integrado no grupo VIMMI, do INESC-ID, no “Lourenço Fernandes”, permitiu identificar as limitações das técnicas de controlo da locomoção virtual, para controlar a posição e a mudança de direção, em tarefas de revisão de projetos arquitectónicos em AV’s, suportado na visualização em ecrãs de

---

<sup>1</sup> IMPROVE, european project, FP6: IST-2003-004785

grandes dimensões. Estas limitações motivaram a investigação das interfaces CNL. Nesse projeto, participámos ativamente nos grupos de trabalho que analisaram, implementaram e avaliaram a aplicação que suportou o AV de revisão arquitectónica. A aplicação implementada, denominada IMMIVIEW (Jota et al., 2010), suportou os módulos de entrada de dados, interação e visualização (Santos et al., 2007b, Santos et al., 2007a, Santos et al., 2007c). A participação no módulo de interação reportou-se às tarefas de navegação virtual, através do desenho e implementação de duas técnicas diferentes: controlos de fala e controlos gráficos com o utilizador. Registou-se uma participação robusta nos testes com utilizadores, nas várias fases do projeto, e no tratamento estatístico dos dados. A aplicação IMMIVIEW inspirou o desenvolvimento da plataforma OpenIVI (VIMMI, 2010), que suportou a visualização do AV, a implementação das técnicas propostas na tese, e a monitorização dos dados resultantes dos testes com participantes.

No início da investigação do tema desta tese, desenvolveu-se uma proposta de técnica CNL, que relaciona a velocidade vertical com a velocidade horizontal do corpo, e vertical dos pés (Bruno et al., 2010), a partir da obtenção de dados com participantes. Esta proposta revelou limitações que levaram a seguir o caminho aqui proposto.

Desenhou-se uma fórmula de cálculo da velocidade virtual, de um sistema CNL, que está relacionada com duas métricas do movimento vertical dos pés: amplitude e velocidade.

Desenhou-se e implementou-se uma abordagem inovadora da técnica CNL (SAS-WIP), para controlo da locomoção virtual em caminhos lineares.

Desenvolveu-se também um conceito, que relaciona a alteração do vetor do deslocamento, a partir do movimento de rotação dos pés e de um valor de velocidade angular, em torno de um eixo vertical, quando o sujeito está em frente a um ecrã de parede de grandes dimensões.

Desenharam-se e implementaram-se duas abordagens de controlo de direção do deslocamento virtual, uma baseada na velocidade angular constante, e a outra baseia-se na velocidade angular variável.

Desenvolveram-se dois estudos com participantes. Um deles avaliou comparativamente as três interfaces (SAS-WIP, GUD-WIP e o *joystick* analógico, do dispositivo físico



“Wimote-Nunchunk<sup>tm</sup>”, de controlo da velocidade virtual. O outro estudo pretendeu avaliar comparativamente as três interfaces do controlo da direção do deslocamento (velocidade angular constante, velocidade angular variável, e o *joystick* analógico, do dispositivo físico “Wimote-Nunchunk<sup>tm</sup>”). Obtiveram-se resultados estatísticos, que permitiram medir o desempenho que cada interface disponibilizou aos participantes.

## **1.4 Organização da dissertação**

Este documento apresenta no capítulo “Introdução” a contextualização, a definição do problema, as hipóteses de investigação e as contribuições decorrentes desta tese. No capítulo “Trabalho Relacionado”, é feito um enquadramento e uma análise crítica da área da navegação virtual. No capítulo “Proposta de Abordagem do Controlo da Velocidade Virtual” apresentam-se as várias etapas, resultados obtidos e decisões tomadas no desenvolvimento de uma abordagem CNL inovadora de controlo da velocidade virtual. O capítulo “Experiência com participantes” descreve o desenho da experiência que pretende avaliar a nossa abordagem, em comparação com uma outra metáfora CNL e um dispositivo físico de controlo da velocidade da locomoção virtual. No capítulo “Resultados e Discussão” apresentam-se os resultados da experiência realizada, baseados numa análise estatística. Finalmente, no capítulo “Conclusões e Trabalho Futuro” resumem-se os principais resultados obtidos com este trabalho de investigação e são abertas propostas de trabalho futuro.

## 2 Trabalho Relacionado

A navegação é uma das tarefas mais comuns na interação dos utilizadores com os A.V.'s e permite-lhes controlar a sua posição e orientar o seu ponto de vista no espaço 3D. Bowman et al. dividem a tarefa da navegação em duas sub-tarefas: viajar e procurar caminhos (Bowman et al., 2004). A tarefa de viajar num A.V. relaciona-se com a componente motora da navegação, enquanto que a tarefa de procurar caminhos reporta-se à sua componente cognitiva. Esta última tarefa está relacionada com a realização de sub-tarefas por parte dos utilizadores, como são os casos da compreensão espacial, do planeamento de caminhos e da tomada de decisão da direção a tomar. A tarefa de viajar caracteriza-se pelas ações motoras que os sujeitos realizam para controlarem a posição e a orientação do seu ponto de vista no AV, permitindo que os mesmos se movimentem de um ponto inicial, para uma localização alvo, numa determinada direção.

A forma como se viaja no mundo real depende das distâncias a percorrer, da velocidade que se pretende atingir e do objetivo primário que lhe está associado. Por exemplo, para distâncias pequenas e médias, poderemos usar a marcha para a deslocação, mas em distâncias mais longas, poderemos conduzir uma bicicleta ou um automóvel. No primeiro caso poderemos usar a locomoção física humana, cujos movimentos são suportados preponderantemente pelos pés/pernas, enquanto que no segundo caso, poderemos conduzir veículos, suportados nos movimentos de outros membros, como é o caso dos braços e das mãos, no manuseamento do volante.

Os sujeitos têm necessidade de viajar através ou à volta dos AV's, para executarem outras tarefas, como a visualização, a seleção e a manipulação de objetos, bem como o controlo do sistema (Bowman et al., 2001). Para o controlo da posição virtual têm sido desenvolvidas várias técnicas de interação, que tentam responder aos requisitos das sub-tarefas relacionadas com a tarefa de viajar, às necessidades de deslocamento dos seus utilizadores, e também às características dos AVs. Se um AV tiver pequenas dimensões, podem-se, provavelmente, utilizar técnicas de controlo de locomoção, suportadas diretamente nos movimentos físicos dos utilizadores. No caso do deslocamento de longas distâncias, será aconselhado o uso de dispositivos físicos que permitem controlar a locomoção virtual com um menor dispêndio de esforço. Os AV's também podem ser

percorridos, usando velocidades constantes ou variáveis. Neste último caso, os mesmos asseguram uma maior flexibilidade ao utilizador, no entanto, também levantam alguns desafios no desenho dessas técnicas.

A tarefa de viajar pode ser decomposta em diferentes sub-tarefas, segundo diferentes critérios. Tan *et al.* identificam três tipos de sub-tarefas diferentes (exploração, procura e Inspeção), que são orientadas para o objetivo do deslocamento virtual que se pretende atingir (Tan et al., 2001). Já Bowman et al identificam três sub-tarefas relacionadas com o controlo de baixo nível do deslocamento virtual: velocidade, direção e condições de entrada para assegurar o movimento (Bowman et al., 1997). A forma como essas sub-tarefas se podem combinar, definem o espaço de desenho que permitem o desenvolvimento de novas técnicas de controlo do deslocamento virtual.

Segundo Mine *et al.* (Mine, 1995), as metáforas de navegação podem dividir-se em duas grandes categorias de controlo de interação: direta e indireta. A primeira categoria inclui técnicas que usam os segmentos corporais (cabeça, braços, mãos, torso, pernas e pés, entre outros) para controlar a sua posição e o ponto de vista no AV, como é o caso da técnica “Caminhar no Lugar” (CNL). As metáforas de navegação baseadas em interação indireta contemplam dois tipos de técnicas de interação: com controlos físicos e com controlos virtuais. Os principais dispositivos físicos de controlo da navegação são o teclado, rato, *joystick*, *gamepad*, volante e pedais. A maior parte destes dispositivos permite gerir o controlo do movimento até seis graus de liberdade, que são normalmente utilizados para controlar quer a posição quer a orientação do ponto de vista do personagem virtual. Os dispositivos físicos permitem realizar tarefas de controlo do deslocamento virtual com eficácia e com precisão, em virtude de serem manipulados pelas mãos e dedos que têm um controlo motor fino. No entanto, estes dispositivos nem sempre oferecem um mapeamento natural, entre as ações realizadas pelo utilizador e o seu efeito, pelo que podem ser geradores de sobrecargas cognitivas. Os controlos virtuais assentam em objetos presentes na interface gráfica com o utilizador, como por exemplo os botões. Os mesmos têm associadas funções de controlo da locomoção virtual, como por exemplo, deslocar para a frente ou para trás.

Bowman *et al.* propõem uma taxonomia de classificação das técnicas de controlo da locomoção virtual, em que as agrupa em seis metáforas diferentes (Bowman et al., 2004): locomoção física, condução, planeamento de rotas, baseada em alvos,

manipulação manual e escalamento. As técnicas baseadas na locomoção física usam somente os movimentos físicos corporais para propulsionar o deslocamento num AV. Estas técnicas pretendem imitar os movimentos físicos da marcha humana, tentando explorar o efeito da propriocepção, bem como da naturalidade dos movimentos dos seus utilizadores. São exemplo disso as técnicas de interação “Caminhar Real” (Usoh et al., 1999), “Caminhar no Lugar” (Slater et al., 1995), ou os simuladores mecânicos da marcha real, como são o caso das passadeiras rolantes (Darken et al., 1997)(Iwata, 1999). Por sua vez, as técnicas de condução focam-se no controlo contínuo da direcção do deslocamento por parte do utilizador. Normalmente, a propulsão do movimento é assegurada por uma outra técnica auxiliar. Existem várias técnicas de condução, com destaque para as seguintes: “condução dirigida pelo olhar” (Mine, 1995), “apontar” (Mine, 1995), “condução dirigida pelo torso” (Asai et al., 2002), “camera na mão” (Ware & Osborne, 1990), “dispositivos de condução física” (Hollerbach, 2002), “controladores físicos de movimento virtual” (Wells et al., 1996) e “condução semi-automática”.

O trabalho de investigação que suporta esta tese foca-se no desenvolvimento de uma nova abordagem de controlo da velocidade virtual, baseada na técnica “Caminhar no Lugar” e em duas novas abordagens alternativas de controlo da direcção do movimento virtual. Essas três abordagens foram orientadas e avaliadas para uma visualização na perspetiva da primeira pessoa (Brooks Jr., 1986) e num ambiente semi-imersivo, suportado num ecrã de larga escala. Um dos desideratos do trabalho foi o de medir o desempenho de tarefa, disponibilizado por essas abordagens, e perceber qual foi o grau de satisfação e a avaliação dos participantes relativamente a vários critérios subjetivos. Estas abordagens foram comparadas com outros sistemas, como foi o caso da interface CNL “GUD-WIP” (Wendt et al., 2010) e do *joystick* analógico, do dispositivo físico “Wimote-Nunchuk<sup>tm</sup>”.

Desta forma, as próximas secções incidirão no trabalho relacionado com esta temática e com o estado da arte relativo a metáforas, a taxonomias e a técnicas de locomoção física, com especial interesse no “Caminhar no Lugar” e nas abordagens de condução da direcção do deslocamento.

## 2.1 Enquadramento da técnica “Caminhar no Lugar”

Desde os primórdios da investigação nesta área que têm sido desenvolvidas taxonomias de classificação das tarefas e das características da navegação em AV's, com o objetivo de suportar, por um lado, a análise e o desenho de novas metáforas e, por outro lado, técnicas de interação de controlo do deslocamento virtual. Neste trabalho, foram analisadas duas taxonomias. Bowman *et al.* especificam uma taxonomia, composta por uma análise hierárquica de tarefas de controlo do movimento, do ponto de vista do utilizador, num ambiente virtual imersivo (Bowman et al., 1997). Por sua vez, Tan *et al.* desenvolvem uma taxonomia que agrupa a análise das tarefas com as características operacionais do controlo de navegação (Tan et al., 2001).

Na Tabela 1, é possível identificar a análise hierárquica de tarefas do controlo do ponto de vista do utilizador para ambientes virtuais imersivos (Bowman et al., 1997):

<b>Controlo de Direção / Seleção do Alvo:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Conduzida pelo Olhar</li><li>• Conduzida pelo apontar / gestos (inclui dispositivos)</li><li>• Seleção Discreta:<ul style="list-style-type: none"><li>◦ Listas (menus)   Dirigida a alvos (objetos)</li></ul></li><li>• Apontar2D</li></ul> <b>Seleção de Velocidade / Aceleração:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Velocidade/aceleração constante</li><li>• Baseado em gestos (inclui dispositivos)</li><li>• Seleção explícita:<ul style="list-style-type: none"><li>◦ Discreta (1 de N)   Valores contínuos</li></ul></li><li>• Escalando por ação do ambiente ou do utilizador</li><li>• Automática ou adaptativa</li></ul> <b>Condições de Entrada:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Movimentação constante / nenhuma entrada</li><li>• Entrada contínua de manutenção do movimento</li><li>• Controlo do arranque e da paragem</li><li>• Arranque e paragem automática</li></ul>
---

*Tabela 1 – Taxonomia de navegação proposta por Bowman et al. (Bowman et al., 1997)*

As tarefas e as características relacionadas com a técnica de locomoção CNL podem ser enquadradas na taxonomia atrás exposta. A principal tarefa que os utilizadores executam, para controlar a sua posição num AV, e que tem sido objeto de investigação, é a seleção de velocidade. As características das condições de entrada têm também sido objeto de investigação, com especial incidência no controlo do arranque e de paragem do deslocamento virtual. Já relativamente à tarefa de controlo de direção, não foram encontradas publicações cujo objeto de investigação fosse o uso dos segmentos corporais indutores dos passos no lugar (pernas e pés), na determinação da direção a tomar pelo utilizador.

Os diferentes sistemas CNL desenvolvidos baseiam a seleção da velocidade em gestos, suportados na realização de passos no lugar. No entanto, têm sido utilizados os movimentos de diferentes partes do corpo para se reconhecerem esses gestos. O sistema desenvolvido por Slater et al. (Slater et al., 1995) é baseado na deteção do movimento da cabeça, o Gaiter (Templeman et al., 1999) recebe os dados do movimento dos joelhos, e o LLCM-WIP (Feasel et al., 2008) e o GUD-WIP (Wendt et al., 2010) recebem ambos os dados da posição dos joelhos, que, através de uma transformação cinemática, permite calcular a posição dos calcanhares. A abordagem CNL de controlo da velocidade, que foi desenvolvida nesta tese, recebe os dados da posição dos calcanhares, diretamente a partir dessa parte do corpo do utilizador, tal como descrito na secção 3.2.2.

A seleção explícita da velocidade, descrita na taxonomia, tem variado nas diferentes abordagens CNL que têm sido desenvolvidas. O primeiro sistema CNL (Slater et al., 1995) baseia-se numa entrada de dados discretos, gerados após o reconhecimento de cada passo. Já o LLCM-WIP (Feasel et al., 2008) e GUD-WIP (Wendt et al., 2010) recebe valores contínuos entre e intra passos. Em termos cinemáticos, o primeiro sistema produz uma velocidade constante, enquanto que os últimos dois geram velocidades variáveis, conforme as ações efetuadas pelo utilizador. Como explicado na secção 3.4, a nossa abordagem CNL utiliza velocidades contínuas e variáveis, que derivam das diferentes ações operadas pelo utilizador.

A tarefa descrita na taxonomia, que permite controlar as condições de entrada, especifica os requisitos para iniciar, manter e terminar o deslocamento. O tempo de latência do sistema na resposta a essas ações do utilizador é um elemento crítico, que

influencia a sua usabilidade. A primeira implementação de um sistema CNL, desenvolvido por Slater et al., requeria quatro sinais positivos de uma rede neuronal, antes que se iniciasse o movimento virtual, e requeria dois ciclos completos de inexistência de passos, para que o deslocamento parasse. Os sistemas desenvolvidos posteriormente tentaram evitar estes problemas, reduzindo os tempos de latência e tentando evitar falsos sinais positivos das ações de arranque e paragem do utilizador. A abordagem CNL desenvolvida nesta tese propõe dois métodos de redução da latência, na fase do arranque (ver a secção 3.4.2), e na fase de paragem do deslocamento (ver a secção 3.4.3).

Nenhuma das várias abordagens de sistemas CNL que foram implementadas, juntaram no seu desenho, a tarefa de controlo de velocidade e a de controlo de direcção. Na marcha real, as pernas e os pés efetuam, em paralelo, movimentos que permitem por um lado propulsionar o deslocamento, e, por outro lado, controlar a sua direcção. Contudo, esta metáfora não foi utilizada em nenhuma abordagem CNL do controlo de direcção. Por exemplo, o sistema de Slater et al. controlava a direcção do deslocamento baseada na técnica “Condução pelo olhar” (Mine, 1995). Esta técnica de controlo de direcção determina que o utilizador se move na direcção do vetor descrito pelo olhar do utilizador, ou, de forma simplificada, pela direcção da cabeça. Esta técnica é limitativa porquanto agrupa a direcção do deslocamento e do olhar, impedindo assim que o utilizador se desloque numa determinada direcção e esteja a olhar para outra. Por seu lado, o sistema LLCM-WIP usa um *joystick* e a orientação do torso na determinação da direcção da locomoção. Esta tese propõe um sistema de controlo de direcção que funciona em paralelo com o sistema de controlo de velocidade, em que ambos usam o movimento de rotação dos pés. Na secção 4, descreve-se o desenho e a implementação da nossa proposta de técnica de controlo de direcção.

Tan et al. desenvolveram uma outra taxonomia de navegação (Tan et al., 2001), exibida na Tabela 2, que nos permite descrever de forma mais detalhada o espaço de desenho proposto nas principais abordagens CNL que foram desenvolvidas.

Tan et al. identificam três tipos de tarefas (Tan et al., 2001) associadas à navegação: (i) **Exploração** – permite pesquisar o espaço virtual tendo somente como intenção ganhar conhecimento dele; (ii) **Procura** – Localizar um objeto, zona alvo ou caminho e deslocar-se para lá; (iii) **Inspeção** – Manter uma vista específica de um objeto.

### **Seleção da Tarefa**

- Exploração | Procura | Inspeção

### **Controlo do Deslocamento**

- Caminho (posição) | Velocidade | Vista (orientação)
- Em Função do Estado do: Ambiente | Utilizador | Ambiente + Utilizador

### **Interface com o Utilizador**

- **Mecanismo de Entrada**
  - **Sensorial:** Visão p/ Computador | Entrada Áudio | Outros
  - **Manipulação:** Uso de uma mão | Uso de duas mãos | Outros
- **Frequência do Controlo**
  - Discreta | Contínua
- **Mapeamento do Controlo**
  - Constante (1:1)
  - Variável (modal): Implícita (sistema) | Explícita (utilizador)
- **Tipo de Visualização**
  - Imersivo | Semi-Imersivo | Não Imersivo
- **Vistas Simultâneas**
  - Simples | Múltiplas

*Tabela 2 – Taxonomia de navegação de (Tan et al., 2001)*

A técnica CNL tem como objetivo suportar o controlo da posição virtual do utilizador, usando o controlo motor de alguns segmentos corporais do mesmo. A tarefa de exploração é aquela que está mais alinhada com as características disponibilizadas pela técnica CNL. No entanto, a tarefa de procura também se pode suportar no uso desta técnica, principalmente em tarefas de orientação espacial (Williams et al., 2006), que beneficiem das perceções proprioceptivas e vestibulares, proporcionadas pelos movimentos físicos do utilizador. A tarefa de inspeção está muito ligada a operações de controlo de vista, que não são suportadas pelas características da técnica CNL.

Relativamente ao item controlo do deslocamento, o primeiro sistema CNL (Slater et al., 1995) que foi desenvolvido atualiza a posição do ponto de vista virtual, após ter sido detetado um passo, adicionando à posição atual, uma distância constante. Já os sistemas mais recentes, como são os casos do LLCM-WIP e do GUD-WIP, atualizam continuamente a posição virtual, a partir da derivação do valor da velocidade virtual calculada. A abordagem desenvolvida nesta tese usa também o valor da velocidade para atualizar continuamente a posição virtual. Para que estes sistemas assegurem o máximo



controlo por parte do utilizador, devem permitir determinar a sua posição virtual em função das suas ações de controlo. Alguns destes sistemas podem ser complementados com outros mecanismos de controlo do deslocamento, que derivam do estado do ambiente utilizado. Por exemplo, evitar colisões com paredes, dentro de um edifício, ou inferir os objetivos de velocidade do utilizador, disponibilizando-lhe velocidades ajustadas às suas intenções.

As técnicas CNL baseiam-se numa interface gestual, em que o utilizador executa movimentos de segmentos corporais do utilizador, que são detetados como passos no lugar. O sistema de Slater et al. usa como mecanismo de entrada de dados um *tracker* electromagnético, cujo sensor de posição está colocado na cabeça do utilizador. Esse sensor está ligado por um cabo ao dispositivo de receção dos dados, constituindo uma limitação nos movimentos disponibilizados. Já o mais recente sistema CNL (GUD-WIP) usa um *tracker* ótico baseado em câmaras que detetam o movimento dos joelhos, onde estão colocados marcadores luminosos. O sistema CNL proposto nesta tese usa um mecanismo sensorial de entrada de dados, baseado num *tracker* ótico, conforme descrito na secção 5.5.

Um dos principais objetivos do uso dos sistemas CNL é explorar a familiaridade dos sujeitos com os movimentos corporais usados nos passos do caminhar real. Como estes movimentos são contínuos e produzem resultados também contínuos, a investigação de novas abordagens CNL tem sido no sentido de assegurar uma frequência de controlo contínua, e um mapeamento consistente, entre as ações do utilizador e os efeitos obtidos. Na secção 3.6 deste documento, é possível verificar o controlo contínuo do deslocamento, através da correspondência entre os valores de entrada dos passos e a velocidade virtual calculada.

A maior parte das implementações da técnica CNL suporta a sua visualização no sistema imersivo HMD (Head Mounted Display). Os principais exemplos são o sistema de Slater et al. (Slater et al., 1995), o Gaiter (Templeman et al., 1999), o LLCM-WIP (Feasel et al., 2008), e o GUD-WIP (Wendt et al., 2010). A abordagem CNL desenvolvida por Yan et al. foi testada num cubo, que é um sistema de visualização imersivo, composto por seis paredes, onde são projetadas imagens na retaguarda. Pensamos que o uso de abordagens CNL pode ser promissor em ambientes de visualização semi-imersivo, como são o caso de ecrãs de grandes dimensões, que

ocupam a área de uma parede, ou em ambientes não imersivos, como são o caso de ecrãs de menor dimensão, como os semelhantes aos televisores usados nas salas de estar. As abordagens de controlo de velocidade e de direcção desenvolvidas nesta tese suportaram a sua visualização num ecrã de grandes dimensões, conforme está descrito na secção 5.5.

Templeman et al. descreveram uma taxonomia da locomoção humana, respeitante à direcção tomada pela cabeça e pelo tronco do utilizador durante a locomoção física (Templeman et al., 2006). Esta classificação está dividida em quatro grandes categorias: (i) movimento direccionado, (ii) movimento enviesado, (iii) movimento oblíquo e (iv) movimento com varrimento. O **movimento direccionado** caracteriza-se pelo facto de uma pessoa caminhar com a cabeça e o tronco orientados na mesma direcção ao longo de um caminho. O **movimento enviesado** obtém-se quando a cabeça e o tronco mantêm um ângulo fixo entre eles, ao longo de um determinado caminho. No **movimento oblíquo**, a cabeça da pessoa mantém-se sempre fixa ao longo do caminho, independentemente da orientação do tronco. No **movimento com varrimento**, a cabeça da pessoa é livre de rodar livremente e de forma independente em relação ao tronco. Para desenvolver interfaces realistas, conduzidas pelo corpo dos utilizadores (*body-driven interfaces*), bem como interfaces conduzidas por dispositivos de controlo (*device driven interfaces*), desenvolveu-se uma lista de propriedades referentes às **ações** de controlo e respetivos **efeitos**, que tenham correspondência com os mesmos elementos do mundo real. As ações de controlo descrevem-se segundo três elementos: (1) segmentos do corpo (que partes do corpo estão envolvidas na realização das ações); (2) esforço (que nível de esforço é necessário despender); (3) coordenação motora (quais são as capacidades das pessoas para executarem essas ações). Os dois elementos seguintes estão relacionados quer com as ações quer com os efeitos de controlo: (4) os graus de liberdade e a gama dos movimentos (qual o número de graus de liberdade e a escala de movimentos que as ações requerem e quais são os efeitos exibidos) e (5) a precisão (qual é a precisão e a frequência com que o movimento pode ser realizado e exibido). A sexta propriedade relaciona o funcionamento das ações e dos efeitos de controlo entre si: (6) ciclo de controlo fechado ou aberto (a cada ação deverá corresponder sempre um efeito de feedback (ciclo fechado), ou pelo contrário, uma ação poderá não ter retorno sensorial (ciclo aberto)). Só em situações muito invulgaes é que fará sentido utilizar o ciclo aberto na modelação de uma interface.

## 2.2 Dispositivos de entrada de dados

Os dispositivos físicos de entrada suportam a entrada de dados no sistema, referentes às ações dos utilizadores. Vários dispositivos têm sido utilizados em tarefas de interação em AV's, como são a seleção e manipulação de objetos, e o controlo do deslocamento virtual. Segundo LaViola estes dispositivos podem ser classificados em quatro categorias (LaViola, 2001): **(i)** geradores de eventos discretos **(ii)** geradores de eventos contínuos, **(iii)** geradores de uma combinação de eventos discretos e contínuos e **(iv)** reconhecimento de fala. A mesma técnica de interação pode usar diferentes dispositivos físicos de entrada de dados, bem como um dispositivo físico pode ser a fonte de dados para diferentes técnicas de interação.

Os periféricos da categoria **(i)** geram somente um evento de cada vez que o utilizador activa um dos seus controlos (Ex: pressionar um botão). Os dispositivos principais que se enquadram nesta categoria são o teclado, a luva de pressão (*pinch glove*) e os chinelos interativos (LaViola et al., 2001).

Os periféricos da categoria **(ii)** geram uma sequência de eventos em resposta à ação do utilizador ou automaticamente (Ex: um sistema de *tracking* produz dados de posição e de orientação de um sensor, ininterruptamente, mesmo que não haja ação do utilizador). Casos particulares destes dispositivos são os sistemas de *tracking* e as luvas de dados. Esses sistemas de *tracking* podem usar diferentes tecnologias, com destaque para as seguintes: magnética, acústica, ótica, mecânica e inercial. Alguns sistemas mecânicos permitem detetar o movimento do caminhar do utilizador, como são os casos das passadeiras rolantes (*treadmill*) lineares (Slater et al., 1993) e omni-direccionais (Darken et al., 1997), e da Nintendo Wii Fit Balance Board (Williams et al., 2011). Existem sistemas que usam sensores inerciais (acelerómetro e giroscópio) para detetarem o movimento corporal do utilizador. Shiratori e Hodgins desenvolveram um sistema para controlar o deslocamento de um personagem virtual baseado nos dados de entrada de um acelerómetro (Shiratori & Hodgins, 2008). O dispositivo “Squeeze ball” (Araújo et al., 2010), desenvolvido no grupo VIMMI, do INESC-ID, é um caso particular de um controlador híbrido, que tem um botão digital, um giroscópio e um acelerómetro.

O rato, o *joystick*, o *gamepad*, o *spacemouse*, ou o *spaceball* são os casos mais representativos de dispositivos que permitem gerar simultaneamente eventos contínuos e discretos, e que se enquadram nos periféricos da categoria (iii). Nesta tese realizaram-se testes comparativos entre duas interfaces, CNL e o *joystick* analógico, que está embutido no dispositivo físico Wii Nunchuk (Nintendo, 2012). Este dispositivo funciona ligado a outro dispositivo, denominado Wii Remote (Nintendo, 2012). Neste controlador, utilizou-se um botão que gera eventos analógicos, que permite ativar o início e a paragem do deslocamento virtual. Por sua vez, o *joystick* analógico que foi utilizado gera eventos contínuos da posição da vareta, cujo valor é mapeado no valor da velocidade virtual.

O reconhecimento de fala fornece um complemento para os outros modos de interação e é utilizado idealmente em interfaces multimodais, para disponibilizar uma interface mais coesa e natural. Exemplo disso é o sistema IMMIView (Jota et al., 2010), desenvolvido no grupo VIMMI, do INESC-ID. Se o reconhecimento funcionar bem, pode constituir um instrumento valioso na interação, permitindo ao utilizador libertar as suas mãos para outras tarefas.

## **2.3 Interfaces Físicas de Controlo da Locomoção**

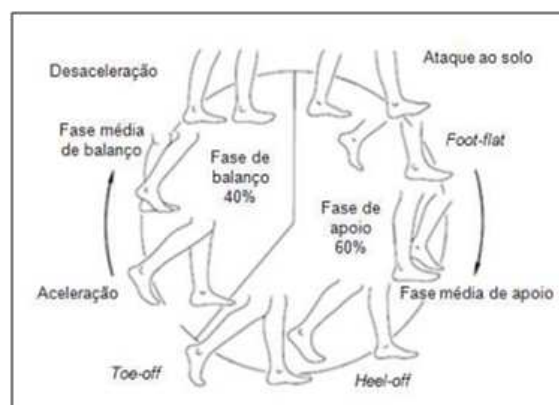
As duas principais técnicas de controlo da locomoção virtual, e que se baseiam em metáforas de locomoção física, são o “Caminhar real” e o “Caminhar no lugar”. A primeira técnica baseia-se na marcha humana, na qual o sujeito movimenta o seu corpo como um todo, efetuando passos em frente, em espaços físicos à escala humana, com dimensões semelhantes a algumas das divisões das nossas habitações ou escritórios. Por exemplo, Interrante et al. desenvolveram um estudo de avaliação de uma técnica CR, suportada numa área de interação de  $9,14 \times 7,62 \text{ m}^2$  (Interrante et al., 2007). Por sua vez, a técnica CNL baseia-se na realização de passos no lugar, mas que não permitem uma progressão translacional do corpo do sujeito. No entanto, qualquer uma destas duas atividades é rítmica e baseia-se na coordenação das principais partes do corpo, com particular importância da extremidade inferior. Qualquer um dos dois tipos de marcha é descrito pela biomecânica, que é a ciência que envolve o estudo de sistemas biológicos, a partir de uma perspetiva mecânica, suportada na estática e na dinâmica (Hall, 1999). Nas secções seguintes apresentam-se alguns conceitos biomecânicos da marcha real, as

características genéricas dos principais sistemas CNL que foram desenvolvidos, e a análise crítica dos mecanismos de controlo de velocidade e de direção dos sistemas mais recentes.

### 2.3.1 Conceitos biomecânicos da marcha humana

A marcha humana pode ser descrita como uma progressão translacional do corpo como um todo, produzida por movimentos rotatórios de segmentos corporais coordenados (Sousa, 2010). A marcha normal é rítmica e caracteriza-se pela alternância entre movimentos propulsivos e retropulsivos das extremidades inferiores (Norkin & Levangie, 1992). A análise do movimento do corpo é descrita pela cinemática, e permite determinar a posição, os ângulos, a velocidade e a aceleração dos segmentos corporais e articulações (Sousa, 2010). A seguir descrevem-se alguns padrões temporais e espaciais que descrevem a marcha humana, e que podem ajudar a perceber os mesmos padrões da realização de passos no lugar.

Um ciclo completo de marcha durante o caminhar é definido pelo período que decorre desde o contacto de um pé no solo, até ao contacto seguinte desse mesmo pé. Esse ciclo é composto por duas fases principais (Oliveira, 2008): (i) fase de apoio (*Stance*) e (ii) fase de balanceamento (*Swing*), conforme se pode ver na Figura 1. Na primeira fase, o pé está em contacto com o solo e na segunda está oscilando no ar (subindo ou descendo).



**Figura 1: Fases de um ciclo de marcha (imagem extraída de (Sousa, 2010))**

Um passo, por outro lado, é o movimento que decorre entre dois apoios consecutivos do pé direito e do pé esquerdo, como se pode ver na Figura 2. O comprimento de um passo é a distância entre a posição do calcanhar, durante o apoio do pé direito, e a do

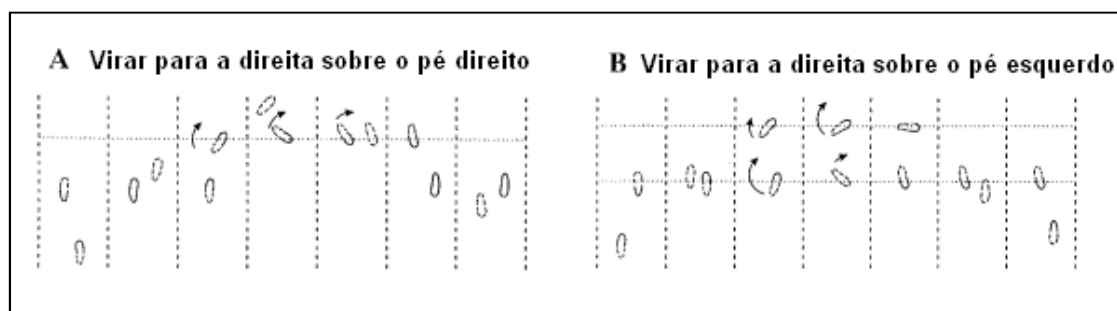
calcanhar do pé esquerdo seguinte. A largura do passo corresponde à distância entre as linhas que atravessam cada um dos pés durante esse movimento. A cadência corresponde ao número de passos executados por minuto, enquanto que a velocidade de locomoção corresponde à multiplicação da cadência pelo respectivo comprimento do passo.



**Figura 2: Exemplo do movimento de um ciclo de marcha (imagem adaptada de (Pinto, 2007))**

A deslocação para a frente é o tipo de movimento mais comum que os seres humanos desenvolvem no dia-a-dia, quer seja em espaços exteriores (ruas, praças e outros locais), quer seja em espaços interiores, como as casas, os escritórios, entre outros. As deslocações para trás ou laterais são mais raras de serem executadas e acontecem normalmente em situações de recurso. O andar para trás acontece normalmente em pequenas extensões, de poucos metros no máximo, e é executado para as pessoas deixarem passar outras, ou em zonas estreitas. O caminhar lateral é uma ação que normalmente ocorre quando as pessoas pretendem evitar obstáculos que estão muito perto delas.

Os seres humanos alteram a direção do seu movimento, executando pequenas rotações dos pés, enquanto efetuam os passos. Essas rotações alteram o valor do vetor que descreve a direção do caminho que estava a ser previamente percorrido.



**Figura 3: Duas estratégias diferentes de mudar a direção do deslocamento da marcha real (adaptado de (Hase & Stein, 1999))**

Na marcha humana são usadas duas estratégias diferentes para mudar a direção do deslocamento, cuja escolha está dependente de qual é a perna que está à frente, quando se inicia essa ação (Hase & Stein, 1999). No esquema A, da Figura 3, é mostrado um exemplo de uma viragem do corpo para a direita, que se inicia com o pé direito à frente. Neste caso, os sujeitos normalmente alteram a direção rodando o corpo em torno do pé direito. No esquema B, da Figura 3, é mostrado o exemplo em que a viragem para a direita se inicia com o pé esquerdo à frente. Neste caso, os sujeitos deslocam o peso do corpo para o lado esquerdo, enquanto simultaneamente rodam a anca para o lado direito (no passo com o pé direito). No passo seguinte, a nova direção a tomar é definida pelo movimento executado pelo pé esquerdo. Esta última estratégia de mudança de direção é mais fácil e estável do que a primeira, porque durante a viragem, a base de suporte é mais ampla.

A compreensão da marcha humana, de um ponto de vista biomecânico, ajudou a perceber também os princípios biomecânicos da técnica CNL. Na secção 3.1.1 é descrito o ciclo biomecânico dos passos no lugar, que permitiu identificar as métricas determinantes do algoritmo de controlo de velocidade da abordagem proposta. Na secção 4.1 são levantadas as principais questões relativas ao uso dos pés para determinar a direção do deslocamento.

### **2.3.2 Sistemas de Locomoção Física “Caminhar no Lugar”**

Desde 1993 que foram desenvolvidos vários sistemas CNL, que tinham como objetivo controlar a locomoção virtual. Em baixo são descritas as características e os contributos dos principais sistemas previamente desenvolvidos, relacionando-os com algumas escolhas e características das abordagens desenvolvidas nesta tese.

Foi introduzida por Slater et al. uma nova técnica denominada “Virtual Treadmill” (Slater et al., 1993), que utiliza uma passadeira rolante, e que permite aos utilizadores deslocarem-se num ambiente virtual. Foi utilizado um reconhecedor de padrões baseado numa rede neuronal, que recebe uma sequência de dados de posição do utilizador, para distinguir entre os movimentos dos passos no lugar ou outra ação. Os movimentos do corpo, que simulam o caminhar no lugar, são mapeados no deslocamento virtual, permitindo ao utilizador movimentar-se em espaços virtuais de grandes dimensões, mesmo permanecendo o mesmo numa pequena área de interação. Uma das principais

vantagens deste método é o facto de permitir ter um retorno proprioceptivo dos movimentos corporais, similares aos gerados pelo caminhar real. Outra grande vantagem prende-se com o facto do utilizador possuir as mãos livres, para a realização de outras atividades, diferentes do controlo da navegação. As principais desvantagens deste sistema baseiam-se no facto de não haver duas pessoas que tenham um método idêntico de caminhar no lugar. Desta forma, a rede neuronal terá que ser treinada para cada utilizador. Na avaliação do sistema, os utilizadores preferiram o controlo da navegação através do apontar, relativamente à controlada pelos passos no lugar. Isto deve-se ao facto de esta última técnica fazer despendar mais energia por parte dos utilizadores, comparado com os gestos da mão ou a pressão de um botão do rato.

Posteriormente, Slater et al. apresentaram a técnica interativa de navegação “caminhar no lugar” (CNL), não sobre uma passadeira rolante, mas sobre o solo de um laboratório (Slater et al., 1995). A técnica tenta simular os movimentos do corpo associados ao caminhar real e permite ao utilizador mover-se no mundo virtual em distâncias superiores à área física e aos limites impostos pelos dispositivos de *tracking* (tecnologia electromagnética com fios). Foi desenvolvida uma rede neuronal para detetar os padrões do movimento da cabeça, que identifica quando é que os utilizadores estão ou não a caminhar no lugar. Quando o sistema deteta um comportamento semelhante ao caminhar, inicia o movimento virtual do avatar na direção do seu olhar (direção da cabeça). Verificou-se que o sistema tinha algumas limitações na correta deteção do início e da paragem do movimento dos utilizadores. Foram feitos testes com participantes, que compararam o sentido de presença induzido por esta técnica CNL, e pela técnica de controlo da locomoção virtual “Apontar com a mão”. Os resultados mostram que a técnica CNL proporcionou um maior sentido de presença aos seus participantes, em tarefas de locomoção num AV.

Usoh et al. (Usoh et al., 1999) replicaram o estudo de Slater et al. (Slater et al., 1995), usando também a rede neuronal de deteção do movimento da cabeça, comparando a técnica CNL com o caminhar real (*real walking*), numa área de interação com as dimensões de 10x4m<sup>2</sup>. Os testes foram realizados com o uso de um HMD, um *tracker* de cabeça e um *joystick* com quatro botões (dispositivo de controlo de mão utilizado para apontar). Verificou-se que o caminhar real permite controlar a locomoção virtual de forma mais fácil (simples, natural e direto), do que usando a técnica CNL, ou o “apontar com a mão”. Verificou-se também que os utilizadores experimentam um



sentido de presença superior, quando utilizam as duas técnicas de caminhar, relativamente à técnica de apontar com a mão. Os estudos realizados sugerem que a técnica CNL pode beneficiar de uma melhor deteção do movimento oscilatório dos passos, se for usado um acelerómetro de cabeça. Tal como sugerido pelo estudo de Slater *et al.*, verificou-se que existia uma grande correlação entre o sentido subjetivo de presença do utilizador no AV, e o nível de associação dos participantes com o personagem virtual.

Templeman *et al.* (Templeman et al., 1999) apresentam uma análise de requisitos de um sistema de controlo de locomoção virtual e uma nova técnica CNL que responde a esses requisitos. A finalidade desta técnica é controlar o movimento do avatar num AV, da forma mais similar possível com o deslocamento no mundo real, tanto ao nível das ações de controlo como dos respetivos efeitos na posição do personagem virtual. A técnica CNL, denominada "Gaiter", permite detetar dois tipos de passos: (i) passos gestuais e (ii) passos naturais. Os primeiros são definidos pelas ações do utilizador, que pretendem induzir alterações na posição virtual, e os segundos correspondem aos passos normalmente efetuados na marcha real. A atualização da posição virtual é obtida a partir do valor da extensão máxima da componente horizontal da velocidade do joelho, nos passos gestuais. Isto provoca uma latência de meio passo (cerca de 400ms para passos numa cadência moderada) até que ele seja detetado e que a posição virtual seja atualizada. As mudanças de direção do movimento são detetadas com base na rotação do tronco dos utilizadores. Estes podem virtualmente caminhar em frente, para trás, para o lado, e virar parados; também podem fazer este último em movimento, utilizando passos naturais ou gestuais. Os dados do movimento dos utilizadores foram registados por sensores de posição, colocados nos joelhos, e de sensores de força colocados na sola dos sapatos. Igualmente, foram registadas a posição e orientação da cabeça (que descreve o ponto de vista), da cintura e de uma mão. Os sistemas de *tracking* utilizados foram ligados por cabos ao utilizador e operaram numa área de captura com dimensões de 1,2x1,2m<sup>2</sup>. Não foram publicados estudos com utilizadores que mostrassem a usabilidade e o desempenho disponibilizado em tarefas de locomoção por parte do Gaiter.

Razzaque *et al.* (Razzaque et al., 2002) descrevem uma nova técnica (Redirected Walking in Place' (RWP)), baseada no caminhar no lugar, que controla a navegação numa sistema de visualização CAVE (Cruz-Neira et al., 1992), composta por três

paredes, e que tem como intenção impedir que os utilizadores olhem para a parede traseira que está em falta. Pretende-se atingir este objetivo, porque, segundo Razzaque *et al.*, o sentido de presença num AV está significativa e negativamente correlacionado com a quantidade de vezes que a parede traseira é visualizada. Foram realizados testes com 28 participantes, para medir a frequência de visualizações da parede traseira e o sentido de presença do utilizador. Os participantes foram divididos em dois sub-grupos (i) utilizando um dispositivo manual de controlo da locomoção virtual e (ii) utilizando uma interface baseada na técnica proposta. Os resultados mostram que o uso desta técnica não reduziu a frequência do olhar para a parede traseira em falta, mas sugeriram que o sentido de presença dos utilizadores no AV está negativamente correlacionado com a frequência com que a parede traseira é observada. Este trabalho permitiu perceber o problema da perda do campo visual do ecrã quando em operações de rotação do corpo, que foi sentido no desenho da proposta de técnica de controlo de direção virtual (Capítulo 4).

A interface denominada “Waraji II” (Barrera et al., 2003) deteta a locomoção do utilizador, com base na colocação de dois sensores numa sandália, que medem o movimento do tornozelo. Estes sensores rodam de acordo com a direção e a quantidade do movimento do pé. Na sequência de testes, baseados num jogo, cujo dispositivo de visualização foi um ecrã de parede, verificou-se que os movimentos para a frente e para trás foram os que tiveram maior amplitude, em contraponto com os realizados para a direita e para a esquerda.

Posteriormente, Yan et al. desenvolveram um novo método CNL (Yan et al., 2004), em que, pela primeira vez, é usado o conceito da velocidade virtual, para atualizar a posição virtual. Essa velocidade é calculada a partir da velocidade vertical dos joelhos, durante a subida dos pés, nos passos no lugar. A fórmula de cálculo, obtida a partir de um estudo com participantes, baseia-se numa relação entre variáveis do movimento das pernas, da marcha humana (velocidade horizontal, velocidade vertical e frequência dos passos), e dos passos no lugar (velocidade vertical e frequência dos passos). Foram feitos testes com utilizadores, numa CAVE, cujos resultados de carácter qualitativo mostraram que o sistema fornece uma deteção eficaz dos passos no lugar, e que contém potencial para estudar a locomoção em ambientes de visualização do tipo CAVE. Este trabalho chamou a atenção para a questão da deteção dos passos e da relação entre os movimentos físicos e a velocidade virtual.

Têm sido desenvolvidos alguns dispositivos mecânicos para controlar a propulsão e a direção virtual. Bouguila et al. desenvolveram uma interface mecânica de locomoção (Walking PAD) (Bouguila et al., 2004a, Bouguila et al., 2004b, Bouguila et al., 2002) que permite ao utilizador controlar a locomoção virtual, realizando passos no lugar. Estes passos são realizados sobre uma plataforma mecânica plana, que tem embutida uma grelha de sensores que detetam a pressão das ações dos pés. Baseados nos dados recebidos dos sensores, o sistema pode processar diferentes variáveis que representam o comportamento do caminhar, como sejam a sua direção e a velocidade, o estado de paragem e o saltar. O estado dos sensores da plataforma é varrido com uma taxa de 100hz, o que lhe permite responder com um tempo inferior ao da reação do ser humano a um estímulo. O sistema proposto é portátil e fácil de integrar na maior parte dos ambientes virtuais com projeção de grandes dimensões, como as CAVES ou as Cúpulas (DOME). A plataforma pesa menos de 5Kg. e pode ser ligada ao computador por porta USB. Uma avaliação preliminar com utilizadores, nos quais estes tinham que percorrer um labirinto, utilizando a plataforma, demonstrou que os mesmos percorreram os caminhos que lhe foram previamente solicitados, com um bom grau de precisão (não tiveram colisões com as paredes do labirinto) na realização das curvas. A maioria dos utilizadores referiu que o tamanho do "Walking Pad" poderia ser maior, para ter uma maior área de interação disponível nos seus passos. A técnica de controlo de direção desenvolvida para esta plataforma inspirou algumas das decisões presentes na nossa proposta de técnica de controlo de direção, baseada na orientação dos pés relativamente a um ecrã de parede de grandes dimensões. Este trabalho inspirou a nossa proposta de técnica controlo de direção do deslocamento virtual (Capítulo4).

Explorar ambientes virtuais de grandes dimensões, usando a técnica CR, é difícil devido às limitações espaciais dos sistemas de *tracking* (Williams et al., 2006). Williams et al. desenvolveram duas experiências, baseadas no uso de dois métodos diferentes de controlo motor (i) Caminhar Real e (ii) manuseamento manual de um *joystick* (Williams et al., 2006). A primeira experiência pretendeu estudar os níveis de orientação espacial e de aprendizagem dos utilizadores, contrastando o uso dos dois métodos de controlo, em duas condições, cada qual com um ganho diferente, no respetivo valor da translação da locomoção: sem escala (1:1) e escala de (10:1). A segunda experiência centrou-se nos efeitos de aumentar o ganho translacional do caminhar real num AV, com três escalas diferentes (1:1, 2:1 e 10:1). O controlo da rotação virtual, em ambos os métodos, é

baseado na rotação do corpo do utilizador. Os testes foram realizados numa sala de dimensões de  $6 \times 5 \text{ m}^2$ , com um sistema de *tracking* disponível numa área de dimensões de  $5 \times 5 \text{ m}^2$ . Os resultados da primeira experiência permitiram verificar que o caminhar físico apresenta sempre melhores resultados, respeitantes à orientação espacial, do que o controlo manual do *joystick*, independentemente dos ganhos utilizados. No entanto, os resultados do controlo manual foram bastante satisfatórios, permitindo concluir que ele é viável e que permite julgamentos rápidos por parte dos seus utilizadores. Os resultados da segunda experiência permitem concluir que a orientação espacial e o tempo de resposta do utilizador são melhores, se não houver ganho de translação, mas que, entre os ganhos de escala (2:1) e (10:1), não existe grande diferença no que respeita à orientação espacial.

Relativamente às técnicas de redirecionamento do deslocamento virtual, Steinice et al. apresentaram um sistema que permite navegar em ambientes virtuais de larga escala, usando a técnica CR (Steinice et al., 2008). Em contraste com (Razzaque et al., 2002), desenvolveram-se conceitos que combinam a compressão de movimento (escalamento da distância real relativamente à distancia virtual), os ganhos de rotação, que tornam as curvas reais mais pequenas ou maiores, e os ganhos de curvatura na mudança de direção ao curvar. Os testes com utilizadores foram realizados num volume de *tracking* de dimensões de  $10 \times 7 \times 2,5 \text{ m}^3$ , e com a visualização suportada num HMD. Desse estudo foram retiradas as principais conclusões: (i) As rotações podem ser comprimidas ou estendidas até 30%; (ii) As distâncias percorridas podem ser comprimidas em 15% e aumentadas em 45% e (iii) o utilizador pode ser redirecionado ao curvar, no valor de um raio de círculo até 3,3 m, sem que tenha consciência disso.

Outra técnica de controlo da locomoção virtual, denominada "Super-Feet" (Rey et al., 2007), permite a locomoção virtual, utilizando o movimento dos pés do utilizador, na posição de sentado. Com os calcanhares apoiados no chão, o utilizador sobe e desce os pés, para controlar a locomoção virtual em frente. Simultaneamente, pode rodar os pés para a esquerda e para a direita, para mudar a direção do seu deslocamento virtual. Esta técnica pretende superar outras técnicas, que fazem uso de diversos sensores e de complexos algoritmos de identificação das ações do utilizador. Este sistema é suportado num sistema de *tracking* de baixo custo, composto por uma câmara de infra-vermelhos OptiTrack<sup>tm</sup>, que deteta o movimento de um marcador refletor. O sistema usa o valor da velocidade virtual para derivar a respetiva posição. Essa velocidade é obtida a partir da

velocidade do movimento dos pés. Para tal, é colocado um marcador no bico de cada pé, que determina a posição 3D de ambos os pés, e que é usada para calcular a velocidade. Foi realizada uma avaliação comparativa entre esta técnica e o uso de um *joypad*, em tarefas comuns de navegação. A experiência realizou-se nas seguintes condições: o utilizador estava sentado a uma distância de 2,83 metros do ecrã (dimensões: 3,20x2,40m<sup>2</sup>), com a câmara OptiTrack posicionada a 65cm de distância dos calcanhares do mesmo. Os resultados preliminares mostram que a técnica "Super-Feet" é mais precisa, mas menos rápida do que usando os controladores de mãos.

Mais recentemente Feasel *et al.* propuseram um sistema CNL denominado LLCM-WIP (Feasel et al., 2008), que tem como objetivo solucionar dois grandes problemas na geração de movimento virtual a partir do caminhar no lugar do utilizador: (i) diminuir a latência do sistema na deteção do início e da paragem do movimento, (ii) e sintetizar a locomoção virtual de forma suave e contínua. Este sistema calcula a velocidade virtual a partir da velocidade do movimento vertical dos calcanhares, enquanto os utilizadores efetuam passos no lugar, e é suportado em técnicas de processamento do sinal. Este artigo fornece também resultados experimentais sobre o limiar da altura vertical do calcanhar, que determina se o utilizador está a realizar passos verdadeiros (intencionais) ou falsos. Nos testes de usabilidade efetuados por Feasel *et al.*, verificou-se que o LLCM-WIP disponibilizou aos utilizadores desempenhos semelhantes aos proporcionados pelo uso de um *joystick*, mas que foram bastante inferiores aos disponibilizados por uma interface CR, que foi usada na experiência. Verificou-se também que a técnica CNL apresentou uma precisão inferior à disponibilizada pelo *joystick*. Este trabalho ajudou a perceber as questões da latência do arranque e da paragem do movimento no desenho da proposta SAS-WIP (Capítulo 3).

O estado da arte da técnica CNL é o sistema GUD WIP (Gait-Understanding-DrivenWalking-In-Place) (Wendt et al., 2010). Este sistema gera a velocidade virtual, a partir de uma equação de cálculo da velocidade da marcha humana (Dean, 1965), que tem como variáveis independentes a frequência dos passos e a altura do sujeito. A deteção dos principais eventos, que atualizam a velocidade virtual, baseia-se no ciclo biomecânico da marcha humana. Desenvolveu-se uma experiência com utilizadores, que compara as três técnicas de locomoção seguintes: CR, LLCM-WIP e o GUD WIP, que utilizam frequências dos passos semelhantes. Verificou-se que a velocidade virtual, produzida pela técnica CR e pela GUD WIP, respondem consistentemente e de forma

semelhante à alteração da frequência dos passos. Já a técnica LLCM-WIP é muito menos consistente do que as outras. Os resultados de testes desenvolvidos por Wendt et al. mostram que o sistema gera uma curva de velocidade virtual que mapeia de forma muito aproximada a da ocorrida na marcha humana. Também mostram que o algoritmo é reativo às variações das entradas do utilizador, incluindo a paragem e o início do movimento. Os valores das velocidades sintetizadas por este modelo apresentam uma flutuação dentro de cada passo inferior ao ocorrido no sistema LLCM-WIP (Feasel et al., 2008). Assim, os resultados mostram que o GUD WIP produz um valor de velocidade virtual que é mais consistente dentro de cada passo, e mais reativo à alteração da frequência dos passos, do que o LLCM-WIP. Este trabalho permitiu usar na nossa abordagem SAS-WIP, os princípios biomecânicos do ciclo dos passos no lugar, através do uso de uma máquina de estados (Capítulo 3).

### **2.3.3 Controlo da velocidade virtual da técnica CNL**

A tarefa de controlo da locomoção virtual tem como objetivo definir a posição virtual pretendida pelo utilizador. O valor dessa posição é atualizado com base no valor de um dado deslocamento, na direção do vetor deslocamento. Nos sistemas CNL desenvolvidos, esse valor do deslocamento pode ser fixo (Slater et al., 1995) ou variável (Templeman et al., 1999), atualizado de forma discreta (Slater et al., 1995) ou contínua (Feasel et al., 2008), e pode, ou não, ser calculado a partir do valor da velocidade virtual (Wendt et al., 2010). Esta métrica define a rapidez com que o ponto de vista virtual se movimenta no AV, e, no caso de ser variável, a sua alteração é induzida pelas ações de controlo do utilizador.

Desta forma, o utilizador pode especificar a velocidade pretendida em função das suas necessidades. Para percorrer grandes distâncias, pode-se induzir uma maior velocidade, do que no caso de pequenas distâncias. Por outro lado, o controlo da velocidade no início e no final do deslocamento é uma tarefa crítica. Para percorrer uma pequena distância, deve-se mapear uma velocidade pequena, para parar na posição desejada. Tal como no caso do deslocamento de um caminho em grande velocidade, em que haja necessidade de parar num espaço reduzido, o utilizador deve conseguir reduzir coerentemente a velocidade, para parar na posição desejada.

Para que a tarefa de controlo de locomoção virtual, baseado nos movimentos físicos do utilizador, proporcione um bom desempenho ao utilizador, é necessário que ele perceção consistentemente a relação entre os seus movimentos e as alterações registadas na posição virtual. O uso do movimento dos pés, para controlar a locomoção virtual, sugere ter vantagens sobre outros segmentos corporais, visto que assenta no uso das partes do corpo humano que são mais determinantes na marcha real. Desta forma, do nosso ponto de vista, o sucesso da técnica CNL depende do quanto consistente é a perceção da relação entre o movimento dos pés, nos passos no lugar, e a velocidade virtual obtida.

As implementações dos sistemas CNL têm evoluído no sentido de permitir aos utilizadores um controlo contínuo do movimento, baseado na velocidade virtual, que produza um sinal reactivo às suas ações, com suavidade entre e intra passos, e em que os deslocamentos, da posição do ponto de vista, sejam distribuídos continuamente pelas várias *frames*.

A evolução destes sistemas mostra a preocupação em tentar que a velocidade virtual produzida seja contínua, suave no fluxo visual produzido, reativa (reaja consistentemente à variação dos valores de entrada) e que a sua curva se assemelhe o mais possível ao da velocidade do caminhar real.

Têm sido propostas diferentes **abordagens da técnica CNL**, de controlo da posição, **em caminhos lineares**, suportadas na deteção do movimento de diferentes segmentos corporais, como forma de reconhecer os passos no lugar, com destaque para as seguintes: cabeça (Slater et al., 1995, Usoh et al., 1999), joelhos (Templeman et al., 1999, Yan et al., 2004), e calcanhares (Feasel et al., 2008, Wendt et al., 2010).

Por outro lado, foram usados diferentes métodos de cálculo do deslocamento virtual, com destaque para os seguintes: (i) comprimento fixo de um passo virtual (Slater et al., 1995, Usoh et al., 1999), comprimento variável de um passo virtual (Templeman et al., 1999) e velocidade (Yan et al., 2004, Feasel et al., 2008, Wendt et al., 2010), que foram baseados em leis do movimento que usam diferentes relações entre o movimento físico e o virtual. Templeman et al. usam a extensão horizontal dos joelhos, durante os passos no lugar, para determinar a velocidade virtual (Templeman et al., 1999). Yan et al. usam a velocidade vertical dos joelhos para gerar a velocidade virtual, a partir de uma fórmula calculada na senda de estudos que relacionam a velocidade horizontal do corpo humano,

com a velocidade vertical do joelhos e a frequência dos passos (Yan et al., 2004). Feasel et al. desenvolveram o sistema LLCM-WIP (Low-Latency, Continuous-Motion Walking-in-Place), que gera a velocidade virtual a partir da velocidade dos calcanhares, através de técnicas de processamento do sinal.

Essa evolução pode ser verificada na tabela descrita na Tabela 3, que identifica as várias características dos cinco sistemas CNL mais importantes, segundo quatro critérios.

	<b>Entrada de dados</b>	<b>Cálculo do Deslocamento</b>	<b>Método de Detecção</b>	<b>Movimento do Ponto de Vista</b>
Sistema de (Slater et al., 1995)	Eventos discretos do movimento da cabeça	Distância de cada passo (fixo)	Reconhecimento de padrões (rede neuronal)	Discreto (mostrado numa <i>frame</i> )
Gaiter (Templeman et al., 1999)	Sinal Contínuo do movimento horizontal dos joelhos	Distancia de cada passo (variável conforme deslocamento horizontal dos joelhos )	Processamento de Sinal	Contínuo (mas só depois da 2ª metade do passo)
Sistema de (Yan et al., 2004)	Sinal Contínuo do movimento vertical dos joelhos	Velocidade (variável conforme deslocamento vertical dos joelhos)	Processamento de sinal	Contínuo (mas só utiliza a 1ª metade do passo)
LLCM-WIP (Feasel et al., 2008)	Sinal Contínuo do movimento vertical dos calcanhares	Velocidade (variável conforme deslocamento vertical do calcanhar)	Processamento de sinal	Contínuo (dentro de cada passo)
GUD WIP (Wendt et al., 2010)	Sinal Contínuo do movimento vertical dos calcanhares	Velocidade (variável conforme frequência dos passos)	Processamento de Sinal e Biomecânica	Contínuo (dentro de cada passo e sensível às variações de frequência dos passos)

***Tabela 3 – Características de vários sistemas baseados na técnica “Caminhar no Lugar” segundo vários critérios***

Finalmente, (Wendt et al., 2010) desenvolveram o sistema GUD-WIP (Gait-Understanding-Driven Walking-In-Place), que é, atualmente, o estado da arte da técnica CNL e que obtém a velocidade virtual, a partir de uma equação do ciclo biomecânico da marcha humana, calculada em função da frequência dos passos e da altura do sujeito. Este sistema é utilizado nesta tese como termo de comparação com a nossa proposta de abordagem CNL de controlo de velocidade.



Este sistema usa princípios da biomecânica da marcha humana para gerar velocidade, que seja consistente com a evidenciada pelo caminhar real e que responda a variações da frequência dos passos, incluindo um arranque e uma paragem realística do movimento. A velocidade gerada demonstra muito menos variações dentro de um passo do que o sistema LLCM-WIP, mantendo-se reativo a alterações de entradas do utilizador.

O desenvolvimento da técnica GUD-WIP (Wendt et al., 2010) é suportado numa máquina de estados, que segue os princípios do ciclo biomecânico do caminhar real. Desta forma, é possível determinar a frequência dos passos em vários pontos de um ciclo de marcha, e atualizar o respetivo valor da velocidade virtual.

Baseado na hipótese formulada, de que existe uma correlação entre o valor da velocidade produzida e a frequência dos passos realizados, foram colocadas as duas questões seguintes e que tiveram respostas nos testes com utilizadores:

- Quão consistente é a relação entre a frequência dos passos e a velocidade de deslocamento para a técnica caminhar real, GUD WIP e LLCM-WIP?
- Qual das técnicas GUD WIP e LLCM-WIP é mais parecida com o caminhar real?

Em relação à primeira questão, a experiência com utilizadores demonstrou que o caminhar real é o que tem mais consistência entre a frequência de passos e a velocidade de deslocamento obtida. O sistema LLCM-WIP não comprovou ter grande consistência, enquanto que o sistema GUD WIP demonstrou essa característica. Relativamente à segunda pergunta, verificou-se que a curva da velocidade produzida pelo sistema GUD WIP é mais parecida com o caminhar real do que o do LLCM-WIP.

O trabalho descrito (Wendt et al., 2010) coloca a hipótese de que a consistência na relação entre a frequência dos passos e a velocidade tomada, apresentada pelo sistema GUD-WIP, pode melhorar a experiência do utilizador nas tarefas de navegação. No entanto, não apresenta nenhum estudo com utilizadores para testar esta hipótese.

#### **2.3.4 Controlo da direção virtual**

As principais técnicas que permitem um controlo contínuo da direção do deslocamento do observador virtual no AV e que são conduzidas pelos movimentos físicos do

utilizador são as seguintes: Condução dirigida pelo olhar (Mine, 1995), Condução dirigida pelo apontar (Mine, 1995) e Condução dirigida pelo torso (Asai et al., 2002). São igualmente utilizadas outras técnicas baseadas no uso de dispositivos físicos de controlo, como é o caso do *joystick*.

A condução dirigida pelo olhar usa o vetor de visualização do olhar do utilizador para determinar a direção do deslocamento. Esse vetor de visualização pode ser obtido pela orientação da cabeça do mesmo. Esta técnica pode induzir erros no controlo de direção se o utilizador mover a cabeça de forma involuntária noutras direções diferentes das do caminho que ele quer percorrer. Num sistema que permita ao utilizador mudar o seu ponto de vista, numa direção diferente da do deslocamento, esta técnica torna-se obviamente limitativa.

Uma outra característica importante na movimentação do ponto de vista do utilizador é que o cálculo da sua vista no AV é suportada na decomposição do vetor de deslocamento e no vetor de visão. Sistemas que utilizem somente o vetor visão para determinar a direção do deslocamento não simulam a tarefa real, na qual o sujeito pode deslocar-se numa direção e visualizar uma imagem noutra direção.

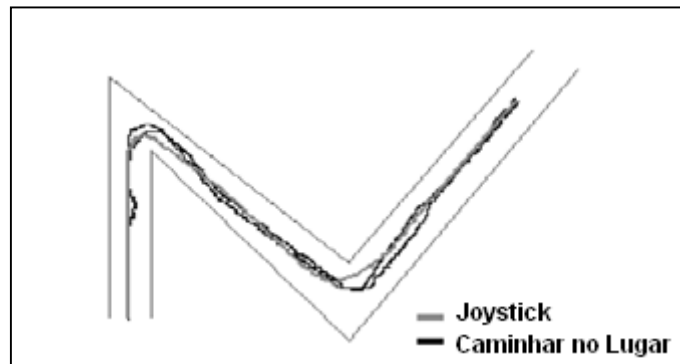
A condução dirigida pelo apontar utiliza a orientação da mão para controlar a direção do deslocamento. Esta técnica permite desemparelhar a direção do deslocamento da direção da vista, o que permite que o utilizador possa olhar à sua volta enquanto se move.

A condução dirigida pelo torso usa a orientação do corpo do utilizador para determinar a direção do seu deslocamento. Embora esta técnica também permita a independência entre a direção da vista e a do deslocamento, ela é muito raramente utilizada, visto que ergonomicamente não é muito confortável.

Num estudo cognitivo (Bowman et al., 1997), de obtenção de informação relativo ao ambiente virtual percorrido, não foram identificadas diferenças entre as técnicas dirigidas pelo olhar, pelo apontar e pela inclinação do torso. Neste estudo somente a complexidade do AV constituiu um factor que influenciou o desempenho do utilizador na tarefa de navegação.

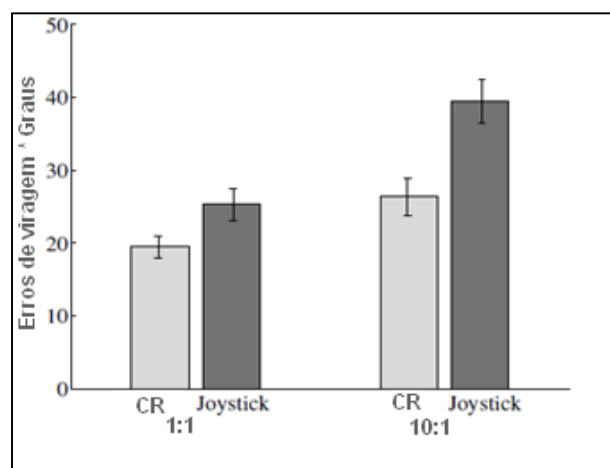
No estudo de (Bouguila et al., 2002), que comparou o uso do Joystick e de uma sistema CNL, para controlar a direção virtual, é possível verificar que as trajetórias nas duas

curvas são muito semelhantes, conforme pode ser visto na Figura 4. Isto faz supor que o controlo de direção utilizando as duas técnicas produz resultados muito semelhantes para os seus utilizadores.



**Figura 4 – Trajetórias do deslocamento usando joystick e a técnica de caminhar no lugar (imagem adaptada de Bouguila et al., 2002)**

Na Figura 5, é possível ver o resultado de outro trabalho (Williams et al., 2006) no qual podemos verificar os erros de rotação do utilizador, quando se desloca para um objeto visto anteriormente, mas que já não está visível durante o teste. As experiências utilizaram o *joystick* e a técnica CR, com duas condições de ganho da translação: 1:1 e 10:1.



**Figura 5 – Erros de rotação dos utilizadores quando se deslocam para um objeto visto anteriormente mas que já não está visível durante a tentativa (imagem adaptada de (Williams et al., 2006)**

Dos resultados é possível verificar que os utilizadores cometem menos erros utilizando a técnica CNL do que utilizando o *joystick*, para qualquer uma das condições. Isto faz supor que o uso dos pés no caminhar no lugar é uma boa forma de controlo da direção.

Têm sido desenvolvidos poucos estudos de investigação que integrem na técnica CNL, o controlo da direção e da velocidade. É precisamente esse um dos principais desafios que o nosso projeto de investigação pretende alcançar: uma técnica de controlo de direção usando os pés, durante os passos no lugar.



## 3 Proposta de Abordagem do Controlo da Velocidade Virtual

Uma parte importante do trabalho de investigação desta tese recaiu no desenvolvimento de uma abordagem inovadora de controlo da velocidade do deslocamento virtual, que retirasse proveito de características determinantes do movimento vertical dos pés, na realização de passos no lugar. Por conseguinte, desenvolveu-se uma observação informal de sujeitos, um estudo exploratório, para perceber como é que os mesmos relacionam a velocidade virtual com o movimento vertical dos pés.

Encontrou-se uma relação de consistência entre três níveis de velocidade virtual (lenta, moderada e rápida) e duas métricas do movimento vertical do pé: altura máxima atingida e velocidade.

Da análise dos resultados, foi possível interpretar os valores dessas métricas, por forma a criar um algoritmo que gerasse o valor da velocidade virtual rítmica. Foram igualmente estudados os métodos que determinam o arranque e a paragem do deslocamento virtual, de modo a assegurar latências baixas. Neste capítulo, são também mostrados aspetos de implementação do modelo e exemplificada a curva da velocidade virtual gerada.

### 3.1 Análise dos movimentos dos pés em passos no lugar

Este trabalho de investigação teve como um dos seus objetivos o desenho de uma metáfora CNL, que se inspirasse na expressividade demonstrada pelo movimento vertical dos pés, na realização de passos no lugar. Uma das características deste tipo de passos é a altura máxima que os pés atingem na fase de oscilação. No início do estudo, colocou-se como objetivo tentar encontrar uma relação entre a altura que o pé atinge, e um valor de velocidade virtual, que suportasse um método de controlo de locomoção virtual. Esse mapeamento deveria permitir obter uma gama alargada de velocidades, desde as mais lentas até às mais rápidas.

Assim, inicialmente tentou-se descobrir como é que os sujeitos percecionam a relação entre a altura dos pés e um nível de valor de velocidade virtual (lenta, moderada ou rápida). Para tal, foi feita uma análise preliminar com sete sujeitos, e um estudo exploratório com cinco participantes, para obter dados dos movimentos dos pés na realização de passos no lugar. Tentou-se também perceber, com esses estudos, se haveria outras características do movimento, que poderiam expressar a intenção dos participantes.

### **3.1.1 Biomecânica e cinemática**

Tal como na marcha real, os movimentos dos passos no lugar baseiam-se num processo rítmico, caracterizado pela alternância entre movimentos propulsivos e retropulsivos das extremidades inferiores dos seres humanos (Norkin et al., 1992). Assim sendo, o ciclo biomecânico dos passos no lugar apresenta muitas semelhanças com o ciclo da marcha humana (Wendt et al., 2010).

Considera-se que um ciclo de marcha humana ocorre desde o contacto inicial de um pé com o solo, até ao momento em que esse mesmo pé volta a contactar novamente com o chão. Nesse ciclo, cada pé passa por duas fases distintas: apoio e oscilação. A fase de apoio (apoio unipodálico) inicia-se desde o momento em que o pé toca no solo com o calcanhar, até que ele se volta a elevar. Parte desta fase coincide com uma fase de duplo apoio (apoio bipodálico). A fase de oscilação (fase aérea) ocorre quando o pé descola do solo e termina antes do seu toque ao chão (Norkin et al., 1992). Esta última fase pode ser dividida em três períodos: aceleração, fase média e desaceleração. A aceleração inicia-se quando o pé de referência deixa o solo e continua até ao ponto em que o mesmo inicia a sua passagem debaixo do corpo. A fase média decorre durante a passagem do pé debaixo do corpo. A fase de desaceleração ocorre desde o fim da fase média até que o pé ataca o solo.

Na Figura 6, é possível visualizar o ciclo biomecânico dos passos no lugar. Verifica-se uma grande semelhança com as fases e os eventos descritos relativamente à marcha real. A grande diferença reside na fase oscilatória, que contém somente dois períodos (falta a fase média) e não três, como na marcha real. A fase oscilatória ascendente ou inicial ocorre desde o momento em que o pé se eleva a partir do chão, até atingir a sua altura





### 3.1.2 Análise preliminar

Durante a fase inicial desta investigação foram efetuados testes com seis utilizadores (cinco do género masculino e um do género feminino) para tentar relacionar a velocidade vertical dos pés com a velocidade horizontal do deslocamento translacional do corpo, em sessões de passos no lugar e do caminhar real (Bruno et al., 2010).

Foi solicitado aos utilizadores que executassem sequências de passos no lugar, que expressassem três diferentes níveis de velocidade: lenta, moderada e rápida. Da observação das ações dos utilizadores resultaram as conclusões seguintes:

- Cinco dos utilizadores variaram a altura do seu pé, conforme pretendiam variar o nível de velocidade simulada que pretendiam atingir. Ou seja, para obterem maiores velocidades virtuais, elevaram os pés a alturas maiores. Também ficou expresso que eles manifestaram a intenção de aumentar a velocidade virtual, através do aumento da velocidade com que oscilavam os pés, durante os passos no lugar.
- Um dos utilizadores, durante os passos no lugar, mostrou que elevava os pés a alturas baixas, variando somente a cadência dos passos para mapear diferentes níveis de velocidade virtual. Ou seja, a cadência dos passos aumentou, quando pretendeu obter velocidades virtuais mais rápidas.

Estes resultados mostraram que a maioria dos sujeitos relacionou a altura atingida pelo pé e a velocidade de oscilação do pé, com a velocidade virtual pretendida. Assim sendo, estas observações sugerem genericamente a existência de alguma consistência entre os valores da velocidade e da altura atingida pelos pés, e o valor da velocidade virtual que eles pretendiam simular, e que é possível explorar esta relação para desenhar uma proposta de abordagem CNL.

A linguagem corporal observada num dos participantes, sugere que ele utilizou basicamente a cadência dos passos no mapeamento da velocidade simulada. Este modelo baseia-se na variável “frequência do passo” para calcular o valor da velocidade virtual. O sistema GUD-WIP (Wendt et al., 2010) usa um modelo semelhante (Dean, 1965), que relaciona a velocidade de deslocamento com a frequência dos passos e a altura do sujeito. Porém, a fórmula de cálculo dessa velocidade virtual não é específica dos passos do lugar, mas é sim uma adaptação da marcha real.

Comparando as duas linguagens gestuais obtidas, é possível verificar que uma utiliza maioritariamente a altura do passo e a outra é suportada na gestão do tempo de realização do passo. Neste sentido, um dos desideratos desta investigação é o de confrontar estes dois modelos diferentes, para tentar perceber qual é aquele que permite um mapeamento mais rigoroso no controlo da velocidade virtual.

Para determinar as características cinemáticas da linguagem gestual baseada na amplitude e na velocidade dos pés, foi feito um teste exploratório com participantes, que recolheu dados de várias séries de passos no lugar. Este estudo teve como objetivo suportar uma nova abordagem da técnica CNL. Na secção seguinte, serão explicados os procedimentos e os resultados desse estudo.

### **3.2 Estudo exploratório com participantes**

Para identificar a consistência dos valores da altura máxima (amplitude)” e da “velocidade” dos pés, previamente identificados, desenvolveu-se um estudo exploratório com cinco participantes (estudantes de mestrado e doutoramento do IST), quatro do género masculino e um do género feminino, com uma média de alturas de 1,74m. Todos eles têm experiência no controlo de locomoção em AV’s.

Neste estudo também se tentou encontrar a fonte de entrada de dados que melhor descreve esse movimento dos pés: o calcanhar ou o bico do pé. Dos resultados obtidos, concluiu-se que a posição do calcanhar é aquela que fornece uma gama mais alargada de valores, quer da amplitude, quer da velocidade do pé, o que permite descrever de forma mais precisa essas variáveis cinemáticas.

Foram recolhidos dados, de várias séries de passos no lugar, efetuados pelos cinco participantes, que seguiram a linguagem gestual dos pés definida previamente. Os resultados permitiram mostrar a existência de uma consistência entre os três níveis de velocidade simulados (lentos, moderados e rápidos) e as duas variáveis do movimento vertical do pé: velocidade média e a amplitude.

Foi igualmente identificada a gama de valores que as duas variáveis em causa podem assumir, para os diferentes níveis de velocidade simulada.

### **3.2.1 Desenho da experiência**

Participaram nesta experiência exploratória quatro sujeitos do género masculino e um do género feminino, entre os vinte e dois e os quarenta e cinco anos. Estes não possuem qualquer incapacidade física, que lhes limite a realização de sessões de passos no lugar.

O estudo foi realizado no laboratório “Lourenço Fernandes”, do IST, que possui um sistema Optitrack (Optitrack, 2010) de seguimento de marcadores reflectores, baseado em dez câmaras de infra-vermelhos, com frequência de captura de 100hz. Para registar os valores das duas posições do pé, foram colocados dois marcadores em cada um deles, um na zona do calcanhar, e outro na zona do bico do pé. A recolha de dados dos passos dos participantes efetuou-se numa área de 3x3 metros quadrados.

Inicialmente, foi explicado aos participantes qual o objetivo do estudo e qual a tarefa que teriam que realizar. Assim, foi-lhes solicitado a execução de três séries de dez passos no lugar, para simular três níveis diferentes de velocidade virtual (lenta, moderada e rápida). Os participantes foram instruídos para relacionarem o nível de velocidade virtual pretendido, com a altura que o pé atinge e com a rapidez na subida e na descida do pé, durante os passos no lugar. Ou seja, para níveis mais altos de velocidade virtual, o pé devia atingir uma altura maior, bem como uma maior velocidade de oscilação.

Os dados das ações dos utilizadores foram registados em ficheiros, com uma frequência de 100hz. A sua estrutura de dados é composta pelo tempo de registo de cada observação, e pelas posições 3D, do calcanhar e ponta do pé, dos dois pés (13 campos). A partir destes dados foi possível identificar a consistência da relação entre as duas variáveis e os três níveis de velocidade virtual.

Nas próximas secções são analisados os resultados obtidos neste estudo, que permitiram descrever melhor as características das variáveis usadas, e de que forma é que as mesmas contribuíram para o desenho da metáfora de interação proposta.

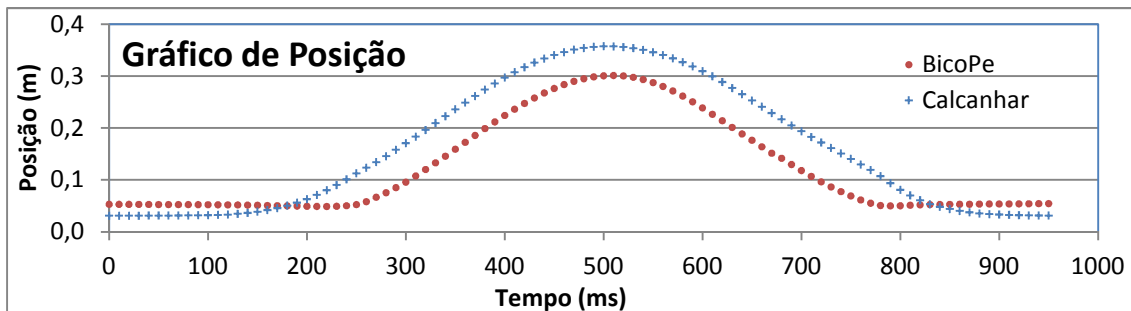
### **3.2.2 Entrada de dados: calcanhar ou bico do pé**

Para determinar a altura máxima e a velocidade do pé, foi estudado qual o ponto do pé que forneceria uma gama de valores mais ampla para o seu uso como entrada de dados

de uma abordagem CNL. Das sessões de recolha de dados dos passos dos participantes, obtiveram-se as conclusões seguintes:

- O calcanhar eleva-se mais cedo e ataca mais tarde o solo do que o bico do pé.
- O calcanhar atinge sempre uma altura máxima superior à obtida pela posição do bico do pé.

A Figura 7 mostra o gráfico da posição do calcanhar e do bico do pé, obtido dos dados resultantes de um passo rápido, de um dos participantes. No exemplo, é possível verificar que a subida do calcanhar ocorre primeiro do que a do bico do pé. E a colisão do calcanhar com o solo também ocorre depois da ocorrência com o bico do pé. O gráfico também mostra que, contrariamente à marcha real, é o bico do pé o primeiro ponto a contactar o solo, nos passos no lugar.



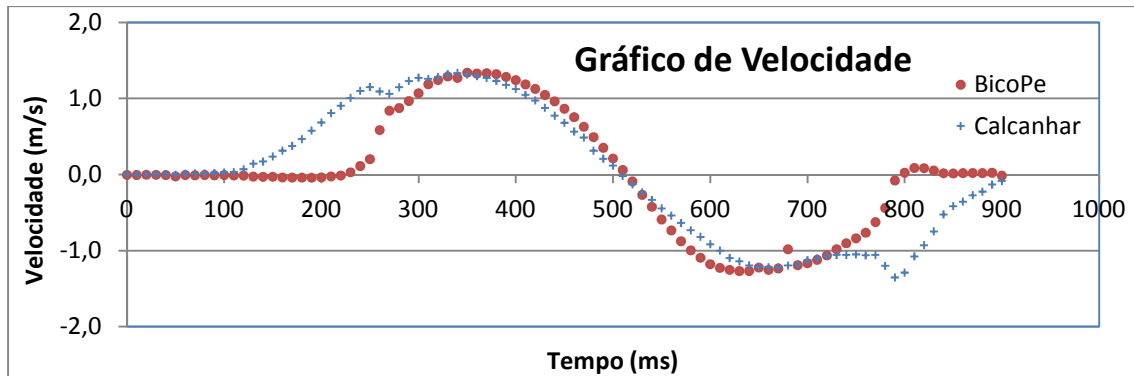
*Figura 7: Gráfico de posição do calcanhar e do bico do pé durante um passo*

Com base nestes dados, e nos requisitos da nossa abordagem CNL, escolheu-se o uso do calcanhar como fonte de entrada de dados da posição do pé, pelas duas razões seguintes:

- A posição do calcanhar atinge sempre uma altura máxima superior à do bico do pé, o que lhe permite disponibilizar uma gama de valores mais alargada.
- A elevação do calcanhar ocorre sempre primeiro do que o bico do pé, o que permite detetar primeiro o passo, diminuindo o tempo de latência de arranque.

A partir da posição dos dois pontos do pé, foi calculada a respetiva velocidade vertical instantânea, conforme se pode ver na Figura 8. Esta amostra resulta do mesmo passo no lugar, cujo gráfico de posição está expresso na Figura 7. As duas curvas apresentam, nas suas concavidades para baixo, os valores em que a velocidade é positiva, e que correspondem à fase de oscilação ascendente do pé. Por sua vez, apresentam nas suas concavidades para cima os valores negativos da velocidade, os quais descrevem a fase

de oscilação descendente. Os dois pontos do pé atingem a velocidade zero no mesmo momento temporal, o que corresponde à altura máxima da posição do pé.



**Figura 8: Gráfico de velocidade no calcanhar e no bico do pé durante um passo**

Nas concavidades para baixo das duas curvas, verifica-se que a velocidade do calcanhar aumenta em primeiro lugar e com um valor superior à do bico do pé, durante a primeira metade da fase ascendente. No entanto, na segunda metade dessa fase, os valores da velocidade das duas curvas são muito próximos.

Nas concavidades para cima, as duas curvas apresentaram valores de velocidade muito semelhantes durante a primeira metade da descida do pé, e, na segunda metade, a velocidade do calcanhar é superior em valor absoluto à do bico do pé.

Olhando para o gráfico de velocidade da Figura 8, verifica-se que existe uma grande variabilidade nos valores da velocidade instantânea durante um passo. Se pretendermos mapear diretamente o valor de cada uma dessas ocorrências, no valor da velocidade virtual, obteríamos uma curva de velocidade com muitas flutuações, e com paragens durante o deslocamento virtual, durante um passo.

Para ultrapassar este problema, foram estudadas formas de obter valores mais estáveis de velocidade, durante a realização de um passo. A estratégia usada baseou-se na tentativa de encontrar velocidades médias, que não tenham uma grande variabilidade entre si, e obtidas em fases diferentes do movimento vertical dos pés.

Inicialmente, tentou-se perceber qual era o leque dos valores da velocidade média vertical do calcanhar e do bico do pé, nos três tipos de passos referidos anteriormente. Para tal, foram calculados esses valores, baseados no tempo total (fase ascendente e descendente do pé) de cada passo, conforme a equação (1):

$$V = 2 * d / (t1 + t2) \quad (1)$$

A variável  $d$  representa a distância percorrida até o pé ter atingido a altura máxima durante um passo. Como se está a medir a velocidade média total das fases de subida e de descida, a distância total é o dobro de  $d$ . A variável  $t1$  descreve o tempo da subida e a variável  $t2$  descreve o tempo de descida.

A Tabela 5 mostra os resultados da velocidade média do calcanhar e do bico do pé.

Tipo de Passo / Ponto do Pé	Bico do Pé (m/s)		Calcanhar (m/s)	
	Média(m/s)	Desvio Padrão	Média(m/s)	Desvio Padrão
<b>Lentos</b>	0,24	0,10	0,40	0,08
<b>Moderados</b>	0,32	0,16	0,70	0,09
<b>Rápidos</b>	0,39	0,19	0,99	0,09

***Tabela 5 – Resultados da velocidade média de cada tipo de passo, do bico do pé e do calcanhar***

Os resultados sugerem que a velocidade média vertical do calcanhar é claramente superior à do bico do pé, para qualquer tipo de passo. Essa diferença destaca-se nos passos moderados e rápidos, nos quais o valor da velocidade do calcanhar é maior do que o dobro da respetiva velocidade do bico do pé. Verifica-se também que o desvio padrão do bico do pé é muito superior ao do calcanhar, indiciando que existe uma maior dispersão dos valores da velocidade para cada um dos tipos de passos. Estes resultados permitiram concluir que o uso do calcanhar disponibiliza uma gama mais alargada de valores da velocidade para o mapeamento da velocidade virtual.

Com base nos resultados e nas conclusões atrás expostas, **decidiu-se usar o calcanhar como fonte de entrada de dados**, as variáveis cinemáticas que suportam a nossa abordagem de metáfora CNL.

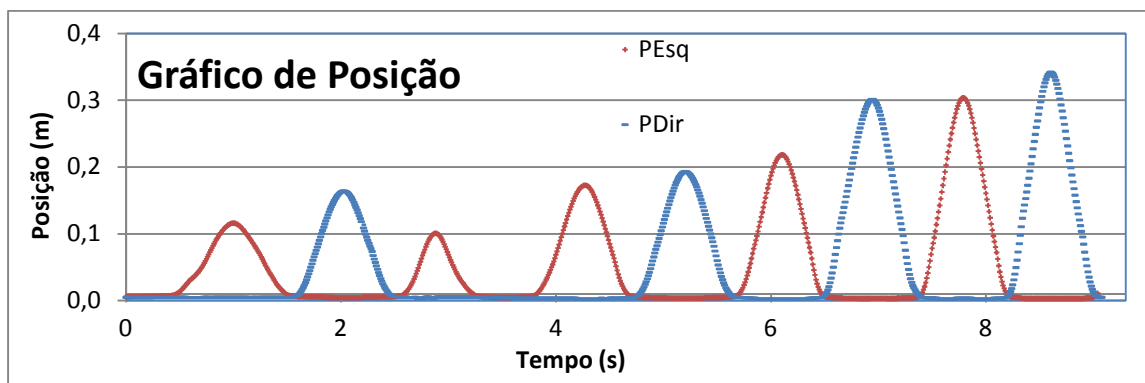
### **3.2.3 Análise cinemática das variáveis estudadas**

Da experiência realizada anteriormente, em que os cinco participantes associaram a cadência dos passos com a rapidez e a altura máxima dos pés, foram seguidas várias estratégias, relativamente ao uso dessas variáveis cinemáticas no cálculo do deslocamento virtual.

Foi importante perceber se os dados recolhidos eram consistentes com a relação entre a velocidade virtual simulada, e a velocidade e a altura máxima do pé, que foi pedido ao utilizador.

Na Figura 9, pode ser visualizado um gráfico ilustrativo, que descreve o deslocamento vertical dos pés, durante a ocorrência de nove passos no lugar (retirados de três séries diferentes), efetuados pelo mesmo sujeito. Os três primeiros passos são lentos e possuem uma altura máxima perto do patamar do 0,1m. Os três passos seguintes são moderados e possuem uma altura máxima perto do limiar dos 0,2m. Os últimos três passos são rápidos e têm uma altura máxima próxima dos 0,3m.

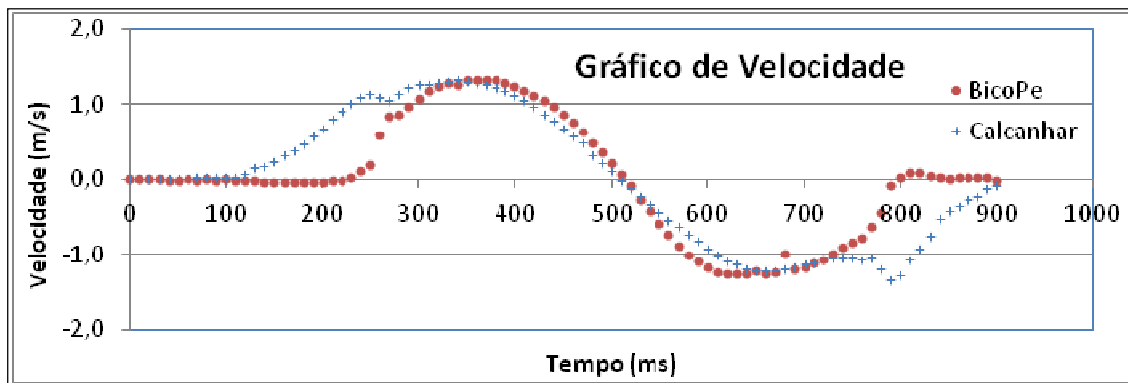
Pode ser ainda visualizado, na Figura 9, que o tempo dos apoios dos pés, dos passos mais lentos, é superior ao dos passos moderados, e o destes também é ligeiramente superior ao dos passos rápidos. Isto pode indiciar que o tempo para detetar a intenção de paragem do deslocamento é menor nos passos mais rápidos.



**Figura 9: Variação da posição dos dois pés em nove passos (3 lentos, 3 moderado e 3 rápidos)**

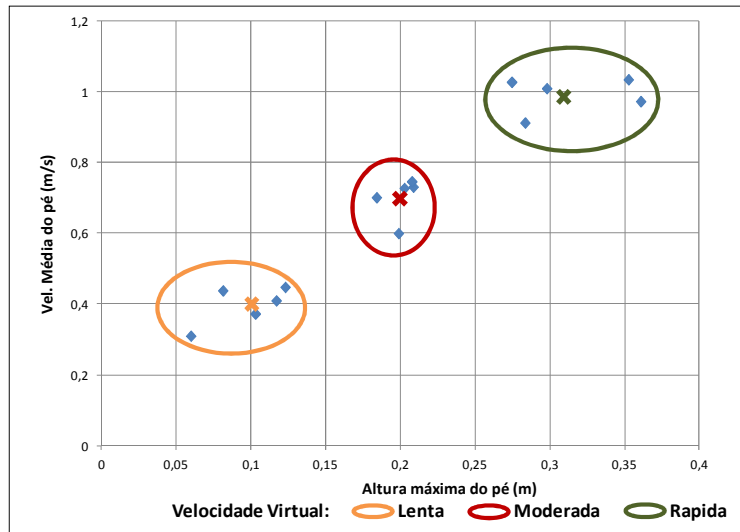
Na Figura 10, pode ser visualizado o gráfico da velocidade vertical dos dois pés, durante os mesmos nove passos no lugar, descritos no gráfico, da Figura 9. Pode observar-se que os três primeiros passos são lentos e possuem uma velocidade máxima, que tem o limiar superior próximo de 0,5 m/s. Os três passos seguintes são moderados e possuem uma velocidade máxima perto 0,7m/s. Os últimos três passos são rápidos e têm uma velocidade máxima próxima de 1,0m/s.

Neste gráfico é possível verificar que, durante um passo, a velocidade nula é obtida em dois momentos: quando o pé atinge a sua altura máxima e quando o pé está em apoio com o chão.



**Figura 10: Variação da velocidade vertical dos pés em nove passos (3 lentos, 3 moderados e 3 rápidos)**

O gráfico da Figura 11 permite verificar a existência de uma relação entre o aumento da velocidade e da altura máxima dos pés, e o aumento da velocidade virtual simulada. Esses dados são reforçados pelos descritos na Tabela 6. A velocidade virtual lenta é descrita por valores médios de altura dos pés no valor de 0,10m, e da velocidade de 0,40m/s. A velocidade virtual média é descrita por valores médios de altura dos pés no valor de 0,20m, e da velocidade de 0,70m/s. E a velocidade virtual média é descrita por valores médios de altura dos pés no valor de 0,31m, e da velocidade de 0,99m/s.



**Figura 11 - Variação da velocidade relativamente à altura máxima do pé**

Os dados das posições da **altura máxima dos pés** foram analisados estatisticamente, para validar o seu grau de confiança. Assim, e conforme se pode analisar na Tabela 6, os resultados indiciam que existe consistência entre essas duas variáveis e os níveis da velocidade virtual simulada. As médias da altura máxima do pé aumentam quando as velocidades virtuais aumentam do nível lento para o rápido. Os valores das variáveis,



mínimo e máximo, podem indicar uma possível gama de valores a usar na nossa metáfora.

Os valores calculados da **velocidade média dos pés**, durante cada passo, foram calculados com base na equação (1), que foi previamente apresentada. Os resultados da Tabela 6 mostram que a velocidade média do pé aumentou no sentido das velocidades virtuais simuladas lentas para as rápidas. Isto permite indicar que existe uma consistência nos dados da velocidade, para poderem ser usados no mapeamento do deslocamento virtual.

Velocidade Virtual Simulada	Altura Máxima (m)				Velocidade média (m/s)			
	Min.	Méd.	D.P.	Máx	Min.	Méd.	D.P.	Máx
<b>Lenta</b>	0,05	0,10	0,03	0,14	0,24	0,40	0,08	0,59
<b>Moderada</b>	0,08	0,20	0,03	0,30	0,38	0,70	0,09	0,84
<b>Rápida</b>	0,22	0,31	0,06	0,46	0,68	0,99	0,09	1,13

*Tabela 6 – Estatística descritiva dos resultados da altura máxima e da velocidade do pé*

Para validar o grau de significância dos valores médios da velocidade e da altura máxima, para cada um dos três níveis de velocidade virtual, foram aplicados testes estatísticos inferenciais. Para tal, foi efetuada uma análise de variância (ANOVA) de medidas repetidas, uni-factorial e intra-sujeitos, do factor “velocidade virtual”, para cada uma das variáveis “velocidade” e “altura máxima”. Foram previamente aplicados o teste de normalidade “Shapiro-Wilkinson”, e o teste de esfericidade “Mauchly”, na validação dos pressupostos dos testes de variância.

Relativamente à variável “**Altura Máxima**”, o teste “Shapiro-Wilkinson” revelou haver normalidade nos dados para cada um dos três níveis de velocidade virtual (T1(p=0,90), T2(p=0,83), T3(p=0,88)), bem como o teste de “Mauchly” (p=0,75) demonstrou haver esfericidade. A aplicação da ANOVA de medidas repetidas, uni-factorial e intra-sujeitos (cada participante executou os três tipos de passos), mostrou que há efeitos significativos da velocidade virtual simulada relativamente à altura máxima do pé ( $F_2 = 65,071, p < 0,001$ ). A aplicação do teste post-hoc Bonferroni revelou a existência de diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) entre as amostras dos três níveis de velocidade. Estes resultados permitem concluir que a altura atingida pelo pé varia de forma clara com o nível de velocidade virtual simulada.

Relativamente à variável “**Velocidade Média**”, o teste “Shapiro-Wilkinson” revelou haver normalidade nos dados para cada um dos três tipos de passos (T1(p=0,92),T2(p=0,80),T3(p=0,85)), bem como o teste de “Mauchly” (p=0,237) demonstrou haver esfericidade. A aplicação da ANOVA de medidas repetidas, unifactorial e intra-sujeitos, revelou que há efeitos significativos da velocidade virtual simulada relativamente à velocidade média do pé ( $F_2 = 154,981, p < 0,001$ ). A aplicação do teste post-hoc Bonferroni revelou a existência dessas diferenças (p<0,025) entre todos esses níveis de velocidade virtual. Estes resultados permitem concluir que a velocidade média do pé varia com o nível de velocidade virtual simulada.

Os resultados anteriores permitem concluir que os valores das médias da altura máxima atingida para cada tipo de passos são estatisticamente diferentes, o que permite concluir que os dados recolhidos têm consistência na relação pretendida, entre a velocidade virtual simulada e a altura máxima atingida pelos pés.

A estratégia seguinte passou por tentar encontrar nas fases do ciclo biomecânico da marcha períodos de tempo, que tivessem valores de velocidade média, não muito variáveis entre si, e que pudessem ser usados no mapeamento de uma variável estável. Inicialmente, a nossa solução passou por calcular os valores da velocidade média dos quatro períodos de tempo da fase de oscilação:

1. P1 (durante a oscilação ascendente) - Entre o momento em que o pé se eleva e aquele em que é atingida a sua velocidade máxima. Este momento ocorre normalmente no ponto médio da altura máxima do pé, durante a subida.
2. P2 (durante a oscilação ascendente) – Entre o momento imediatamente após a ocorrência da velocidade máxima, e aquele em que a velocidade é nula. Este momento ocorre quando o pé atinge a sua altura máxima.
3. P3 (durante a oscilação descendente) - Entre o momento imediatamente após o pé ter atingido a velocidade nula, e aquele em que a velocidade do pé atinge o valor absoluto máximo. Este momento ocorre normalmente no ponto médio da altura máxima do pé, durante a descida.
4. P4 (durante a oscilação descendente) – Entre o momento imediatamente após a ocorrência do período P3, e aquele em que a velocidade é nula. Este momento ocorre quando o pé colide com o solo.

Após análise informal das amostras recolhidas, verificou-se que os valores das velocidades médias dos quatro períodos eram demasiado diferentes entre si, para poderem ser utilizadas no mapeamento de uma velocidade virtual que não tivesse grandes flutuações durante um passo.

Assim, tentou-se obter uma solução diferente, que se baseou na análise da velocidade média dos pés, em cada um dos dois períodos seguintes da fase de oscilação:

1. P1 (oscilação ascendente) - Entre o momento em que o pé se eleva e aquele em que ele atinge a sua altura máxima (velocidade nula).
2. P2 (oscilação descendente) - Entre o momento imediatamente após o pé ter atingido a sua altura máxima, e o momento em que ele colide com o solo.

### **3.3 Requisitos do método CNL proposto**

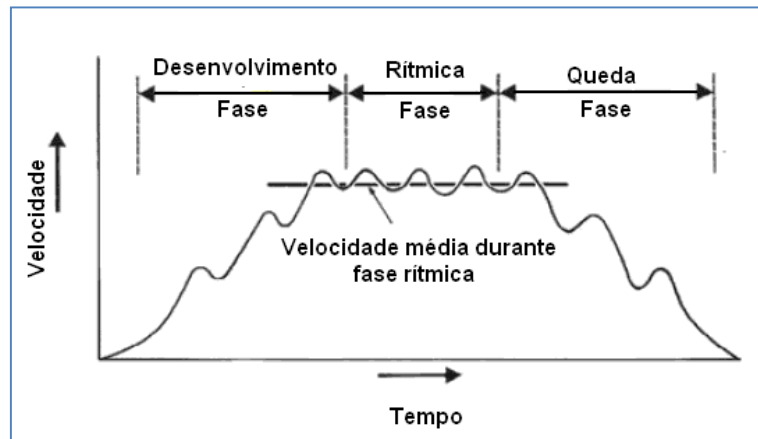
O desenvolvimento desta metáfora seguiu vários requisitos no cálculo do deslocamento virtual, que trabalhos anteriores (GUD-WIP) (Wendt et al., 2010) e LLCM-WIP) (Feasel et al., 2008) já acolhem, e que são importantes para o utilizador desfrutar de uma experiência produtiva. É importante que o utilizador destes sistemas sinta que o deslocamento virtual não seja apresentado aos solavancos, que se inicie imediatamente após o início do primeiro passo, e que pare imediatamente após o término do último passo. Assim, a metáfora deve seguir os requisitos seguintes:

- Suavidade no deslocamento entre passos;
- Continuidade no controlo da velocidade durante cada passo;
- Latência pequena no arranque do deslocamento;
- Latência pequena na paragem do deslocamento;
- Consistência com o intervalo de velocidades da marcha real

O deslocamento na marcha real pode ser dividido em três fases, relativamente à variação da sua velocidade: desenvolvimento/arranque, rítmica e paragem/queda, conforme se pode ver na Figura 12.

A fase de desenvolvimento caracteriza-se por um grande aumento da velocidade do corpo (aceleração positiva) durante os primeiros passos (normalmente um ou dois passos). A fase rítmica caracteriza-se pela estabilidade da velocidade média de

deslocamento dos passos, cuja aceleração se aproxima de  $0 \text{ m/s}^2$ . A fase de queda prediz uma paragem do deslocamento e caracteriza-se por uma queda grande da velocidade (desaceleração), durante os últimos passos (normalmente um ou dois passos).



***Figura 12: Fases da marcha real relativamente à velocidade***

Tal como Wendt et al. já tinha acolhido no sistema GUD-WIP, a nossa abordagem também foi desenhada para acolher estas três fases do deslocamento, transportando-as com as devidas restrições da marcha real para a técnica CNL. Um dos elementos críticos da fase de desenvolvimento é o tempo de latência na deteção do primeiro passo. Para tal, há restrições por parte do sistema, mas também das condições que determinam a deteção do evento físico que determina o início do deslocamento virtual.

Na fase rítmica, a abordagem deve assegurar aos seus utilizadores uma velocidade que seja praticamente constante entre passos consecutivos, e que provoque a menor fadiga possível (consumo energético) aos sujeitos. É muito importante que essa fase rítmica ocorra sem descontinuidades do movimento (paragens ou grandes diferenças de velocidade), por forma, a disponibilizar uma experiência, o mais natural e produtiva possível.

Na fase de queda, a abordagem deve permitir ao utilizador parar no local pretendido. Para tal, o tempo de latência da paragem deve assegurar um controlo de velocidade preciso e também está dependente das limitações do sistema e do algoritmo de deteção do evento de paragem. Esse algoritmo tenta fazer uma previsão da paragem com base na velocidade previamente tomada. É muito importante que ele não detete falsos positivos, o que se torna bastante desagradável e pouco produtivo para o utilizador.

Nas próximas secções serão apresentados, em detalhe, o desenho e a implementação da nossa abordagem de metáfora CNL, baseada nos resultados do estudo atrás descrito.

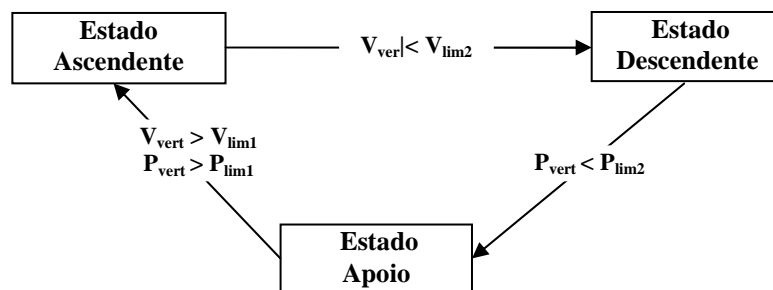
### 3.4 Método de interação

O desenho desta metáfora CNL foi baseado na análise de dados resultante do estudo exploratório e permitiu identificar a gama de valores da amplitude e da velocidade média de oscilação dos pés, durante os passos no lugar. Com base nesses resultados, definiu-se um algoritmo que permite calcular a velocidade virtual, em função das duas variáveis cinemáticas referidas anteriormente.

Por outro lado, foram definidas as condições que determinam a deteção dos eventos críticos dos passos no lugar, bem como a determinação dos momentos do ciclo biomecânico em que o valor da velocidade virtual é atualizada.

#### 3.4.1 Definição dos eventos do sistema

Durante o ciclo dos passos no lugar existem três momentos críticos que fazem a transição entre os seus diferentes estados (Wendt et al., 2010). O arranque do deslocamento é a resposta dada a um evento que ocorre quando o pé inicia o seu movimento ascendente e são superados os limiares mínimos da sua altura e da sua velocidade. Conforme se pode verificar na Figura 13, quando a velocidade vertical ( $V_{\text{vert}}$ ) supera um limiar de velocidade mínimo ( $V_{\text{lim1}}$ ), e a sua posição vertical ( $P_{\text{vert}}$ ) supera um limiar de posição mínimo ( $P_{\text{lim1}}$ ), o sistema passa do estado “Apoio” para o estado “Ascendente”.



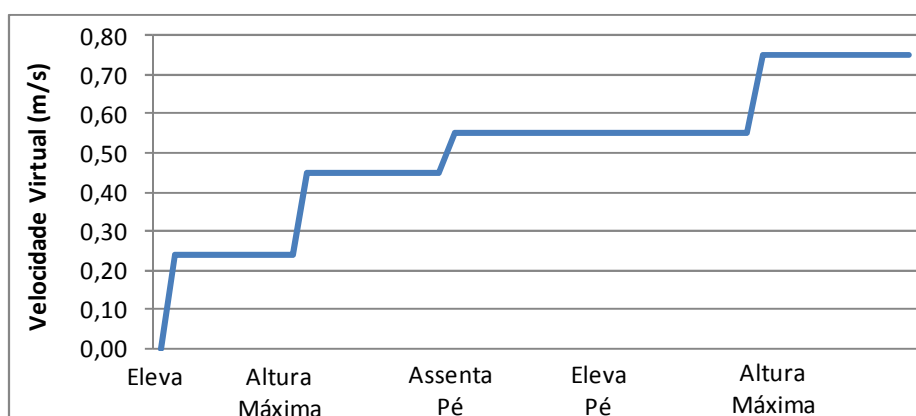
*Figura 13: Diagrama de transição de estados para um único passo*

O sistema passa do estado “Ascendente” para o de “Descendente”, quando o pé atinge a altura máxima. Essa posição ocorre quando existe uma mudança no sinal da velocidade,

de positivo para negativo. Para detetar esse valor, verifica-se se a velocidade vertical atingiu um limiar de velocidade ( $V_{lim2}$ ) próximo de 0 m/s. A mudança do estado “Descendente” para o estado “Descendente” ocorre quando a posição vertical do pé decresce abaixo do limiar máximo de posição ( $P_{lim2}$ ).

### 3.4.2 Fases de arranque e rítmica do deslocamento

A **fase de arranque** do deslocamento virtual inicia-se quando o pé se eleva e atinge os limiares mínimos de altura e de velocidade, que foram definidos no sistema. Pode-se analisar, na Figura 14, um gráfico que descreve um exemplo da evolução da velocidade virtual, durante os dois passos iniciais do deslocamento. Após o arranque do deslocamento no primeiro passo (entrada no estado “Ascendente”), é aplicada uma velocidade virtual fixa, cuja definição será apresentada posteriormente na fase de implementação. Colocou-se inicialmente a hipótese de alinhar essa velocidade virtual com a velocidade vertical instantânea do pé, tal como o trabalho LLCM-WIP e GUD-WIP. No entanto, verificámos que, durante esse estado, se atingem valores de velocidades elevadas, que não são expectáveis por parte do utilizador. Foi decidido aplicar essa velocidade virtual constante para que o utilizador possa ter *feedback* em tempo real da sua ação, não tendo que esperar que atinja a altura máxima para visualizar o início do deslocamento. Desta forma, diminuiu-se o tempo de latência do arranque do deslocamento.



**Figura 14: Gráfico da velocidade virtual gerada nos dois passos iniciais**

Durante a **fase rítmica** do deslocamento disponibilizada por esta abordagem considera-se que é o seu utilizador o principal responsável pelo ajustamento inicial dos seus movimentos físicos, por forma a aumentar progressivamente a sua velocidade de

deslocamento virtual. Desta forma, considera-se que a partir do segundo evento (obtenção da altura máxima do pé) do primeiro passo, o algoritmo de cálculo da velocidade virtual será sempre igual até à fase de paragem.

A análise descritiva dos valores das variáveis “amplitude” e “velocidade média” do pé permitiu definir um algoritmo empírico de cálculo da velocidade virtual, baseado nos seguintes princípios:

- Usar uma fórmula para calcular o valor das velocidades lentas e uma outra para o valor das velocidades superiores às lentas. O controlo de velocidades lentas é crítico, porque normalmente é usado para determinar posições de paragem do movimento. O intervalo de valores das velocidades do pé, relativo à velocidade virtual simulada, presente na Tabela 6, é suficiente para controlar velocidades virtuais lentas. Esta escolha foi suportada em experiências realizadas em ambiente de laboratório.
- O utilizador tem que relacionar a velocidade virtual pretendida com o valor da amplitude do passo. As velocidades lentas apresentam como limiar máximo de amplitude o valor de 0,13m. Este valor baseia-se na soma do valor da média (0,10m) com o valor do desvio padrão (0,03m) da velocidade vertical média dos pés, reportado na Tabela 6. Para obter velocidades superiores, a amplitude tem o limiar mínimo de 0,13m.
- A velocidade virtual superior é proporcional à velocidade do pé e à amplitude. A razão entre o valor da amplitude e o limiar mínimo permite realçar o seu efeito na obtenção de velocidades superiores, permitindo ser consistente com o intervalo de velocidades da marcha real. Desta forma, permite uma equidade com o sistema GUD-WIP, relativamente à gama de valores de velocidades (ver a secção 6.1.3).

O algoritmo descrito em (2) permite calcular o valor da velocidade virtual, durante a fase rítmica do deslocamento, para toda a gama de velocidades.

$$V_{virtual} = \begin{cases} V_{vertical}, & \text{se } Amp \leq 0,13 \\ V_{vertical} * \frac{Amp}{0,13}, & \text{se } Amp > 0,13 \end{cases} \quad (2)$$

Como se pretendia que a interface fornecesse suavidade no deslocamento virtual entre e intra-passos, foram criteriosamente escolhidos os eventos do ciclo biomecânico dos

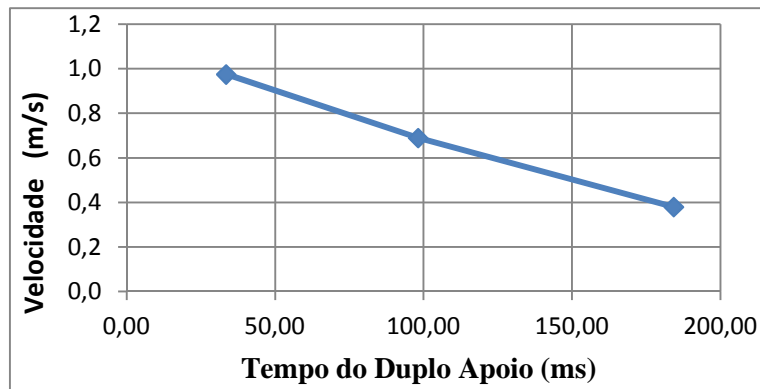
passos no lugar onde a velocidade virtual deveria ser atualizada. São três o número de eventos possíveis que podem ocorrer com os pés: descolagem, altura máxima e contato com o solo. Durante o período de apoio unipodálico, a velocidade do pé é praticamente nula. Desta forma, após esse estado, decidiu-se que o evento de descolagem não vai registrar a atualização da velocidade virtual. Assim, foram escolhidos os dois eventos seguintes para atualização da velocidade virtual: (i) “altura máxima” que usa a média da velocidade do estado “Ascendente” e o (ii) “contacto com o solo” que usa a média da velocidade do estado “Descendente”. Na Figura 14, pode-se ver essa atualização da velocidade virtual durante a fase rítmica, com início no primeiro evento “altura máxima”, do primeiro passo.

### **3.4.3 Fase de Paragem do deslocamento**

A fase de paragem do deslocamento está associada a um período de desaceleração do movimento, que o utilizador ajusta para conseguir parar na posição pretendida. Durante os passos no lugar, o sistema deve prever se cada duplo apoio, que o utilizador está a efetuar, tem como intenção parar o seu deslocamento virtual ou é uma transição para o passo seguinte. Os critérios utilizados para definir a previsão de paragem baseiam-se no tempo que demora o duplo apoio e na velocidade obtida durante o último estado “Descendente” (que antecede o duplo apoio). É muito importante que esta previsão seja rigorosa, sob pena de o sistema provocar paragens involuntárias, não pretendidas pelo utilizador.

Fizemos um estudo que pretendia relacionar o tempo que demorava o duplo apoio e a velocidade da fase descendente anterior. Verificámos que quanto maior era a velocidade média da fase descendente anterior, menor era o tempo do duplo apoio, conforme pode ser visualizado na Figura 15.





*Figura 15: Relação entre a velocidade média da fase descendente e o tempo do duplo apoio seguinte*

Da análise matemática de uma linha ajustada entre os seus pontos extremos, foi possível enunciar a equação (3) que determina a previsão do tempo que o duplo apoio ocorre. Se o tempo efetivo obtido superar o da previsão, então o sistema pára o deslocamento virtual.

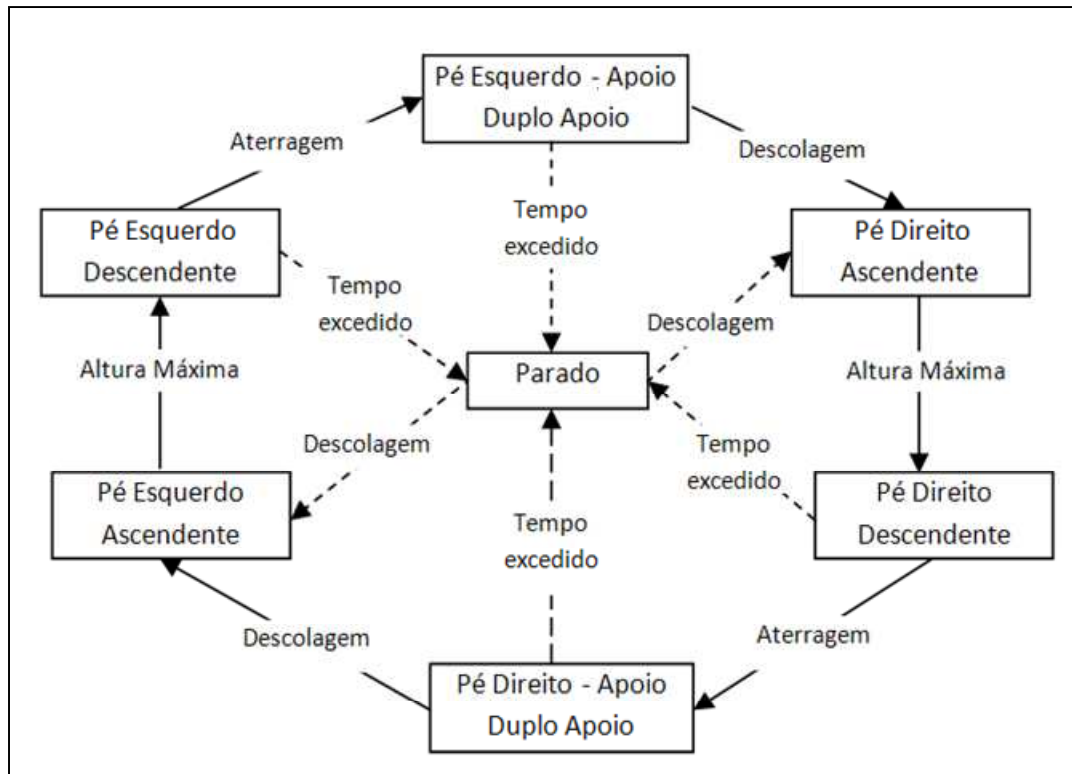
$$Tempo = (-0.2 * velfoot + 0.41) * 1000 \quad (3)$$

Pretende-se com o uso deste método de previsão reduzir ao máximo a latência de paragem do sistema e impedir paragens de movimento não intencionais.

### 3.5 Implementação do modelo

A máquina de estados, em que assentou a implementação da nossa abordagem de metáfora CNL, é ilustrada na Figura 16, que foi baseada no trabalho de (Wendt et al., 2010). Como se pode visualizar, ela reflete as fases e os eventos do ciclo biomecânico dos passos no lugar. Todos os erros ocorridos levam o sistema a transitar para o estado “Parado”.

Não foram usados filtros sobre os dados recebidos das posições dos pés. Foram feitos alguns testes com métodos de filtragem, mas concluímos que eles atrasavam o tempo da ocorrência dos eventos. Para assegurar que recebíamos dados com a qualidade pretendida, aumentámos a taxa de receção das amostras do sistema de tracker de 60hz para 100hz. Isto permitiu assegurar suavidade nos valores entre amostras consecutivas.



**Figura 16: Máquina de estado do nosso modelo CNL**

Durante os passos no lugar, um pé pode assumir três estados: apoio, ascendente e descendente. Para que haja transição entre esses estados, é necessário que ocorram os eventos: levanta pé, altura máxima do pé e assenta pé. Na Figura 13, é possível verificar quais são as variáveis que descrevem a ocorrência de cada um desses eventos. O levantamento do pé ocorre, quando a velocidade do pé supera o limiar mínimo de velocidade  $V_{lim1}$ , em conjunto com a superação da posição vertical do limiar mínimo de posição  $P_{lim1}$ . A altura máxima do pé ocorre, quando a sua velocidade limiar, durante a fase ascendente, decresce em relação ao limiar máximo de velocidade  $V_{lim2}$ . O pé assenta no chão, quando a sua posição vertical decresce em relação ao limiar máximo de posição  $P_{lim2}$ .

Foram definidas as seguintes constantes dos limiares, expressas na Figura 13:

$$V_{lim1} = 0,1m/s ; P_{lim1} = 0,035m \quad (4)$$

$$V_{lim2} = 0,05m/s \quad (5)$$

$$P_{lim2} = 0,035m \quad (6)$$

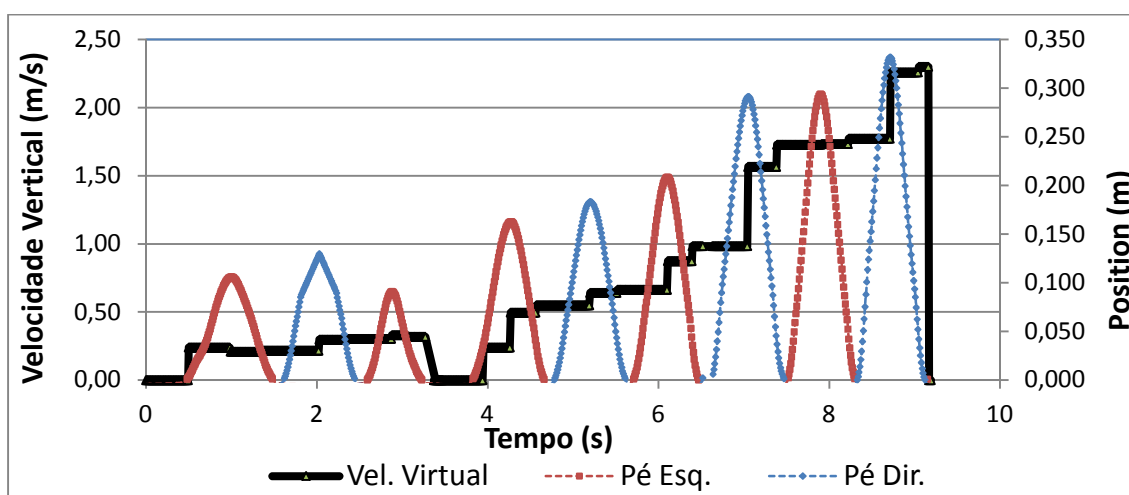
Estas constantes foram obtidas pela análise conjugada da análise de dados de passos no lugar, e de observações do uso do sistema. Os valores escolhidos para o  $V_{lim1}$  e  $P_{lim1}$

asseguram que o movimento não se inicia involuntariamente. O valor de  $V_{lim2}$  tem tolerância suficiente para permitir detetar a altura máxima, e o valor de  $plim2$  assegura com antecipação adequada que o pé vai assentar no chão.

A velocidade constante inicial usada durante o primeiro estado, do primeiro passo, e que define o arranque do deslocamento tem o valor de **0,24 m/s**. Este valor corresponde ao limiar mínimo da velocidade lenta e tem como intenção principal fornecer retorno imediato ao utilizador no início do deslocamento virtual.

### 3.6 Curva da velocidade virtual gerada

Para mostrar a continuidade e a resposta proporcionada pelo sistema, aos passos do utilizador, é mostrada nesta secção um exemplo da velocidade virtual, gerada pela abordagem SAS-WIP. No gráfico da Figura 17, são mostrados nove passos no lugar (três lentos, três moderados e três rápidos), cujos dados foram retirados de um teste com utilizadores, e também é exibida a curva da velocidade virtual gerada. A preto podemos observar a curva que representa a velocidade virtual obtida; e as cores azul e vermelha representam as curvas de posição dos passos. O eixo vertical do lado esquerdo representa o valor da velocidade virtual, e o eixo vertical do lado direito descreve a altura dos pés, durante os passos no lugar.



**Figura 17: Resultado da velocidade virtual a partir dos passos no lugar**

Na primeira metade do primeiro passo, é possível verificar que a velocidade virtual atinge o valor de 0,24m/s. Depois disso, já é aplicado o algoritmo da fase rítmica, no qual se podem observar os seguintes elementos: (i) quando a amplitude é inferior a

0,13m (três primeiros passos), então a velocidade virtual mantém-se constante e perto do limiar mínimo de 0,24m/s; (ii) quando a amplitude sobe acima de 0,13m (últimos seis passos), então a curva da velocidade virtual cresce com uma tendência semelhante à do crescimento da amplitude dos passos. Quando o sistema deteta o estado de paragem dos pés, que é o caso entre os segundos 3 e 4, então o valor da velocidade virtual cai imediatamente para 0m/s.

Este exemplo permite verificar a continuidade que existe no movimento virtual entre e intra-passos, e a resposta do algoritmo às alterações nos valores de entrada dos passos.

### 3.7 Conclusão

Foram apresentadas as várias etapas e as decisões tomadas no desenvolvimento da abordagem inovadora SAS-WIP, que permite controlar a velocidade em ambientes virtuais. O resultado deste trabalho pretende assegurar que o utilizador percecione e controle, de forma precisa, a relação entre duas métricas do movimento vertical do pé (velocidade e amplitude), e a velocidade virtual que pretende atingir. Para além disso, foram propostas as soluções para assegurar o cumprimento de outros requisitos, como a latência baixa do arranque e da paragem do movimento, a continuidade no deslocamento virtual, e a consistência com uma gama de valores de velocidades consistente com a marcha real.

Para medir o desempenho e o grau de satisfação dos utilizadores relativamente à abordagem SAS-WIP, foi desenvolvida nesta tese uma experiência, que compara essa abordagem, com o sistema GUD-WIP, e com o *joystick* analógico, do dispositivo físico “Wimote-Nunchuk<sup>tm</sup>”).



## 4 Proposta de Técnica de Controlo da Direção Suportada no Uso dos Pés

O controlo da locomoção permite alterar a posição virtual, segundo trajetórias lineares ou não lineares. Neste último caso, o utilizador, para além de propulsionar o seu movimento virtual, tem a tarefa de orientar o vetor da direção do deslocamento, para percorrer caminhos nas direções desejadas.

Existem várias técnicas de controlo da direção em ambientes virtuais. Aquela que é provavelmente a mais comum é suportada em dispositivos físicos, como é o caso do *joystick*. Mas existem outras técnicas, que se baseiam nos movimentos físicos de segmentos corporais humanos, como são o caso da cabeça, das mãos e do torso. A maioria dos casos de uso dessas técnicas suporta a visualização num dispositivo HMD.

Nesta tese desenvolveu-se uma técnica de controlo da direção da locomoção virtual, com base na orientação dos pés relativamente ao plano de um ecrã de parede de grandes dimensões. Essa técnica funciona de forma combinada com uma técnica CNL, num cenário em que o utilizador está posicionado estacionariamente a poucos metros de um ecrã de parede de grandes dimensões, sensivelmente a meio do seu comprimento, e para o qual deve ter o olhar orientado o mais perpendicularmente possível.

Analisou-se a viabilidade em usar a rotação dos pés em torno do seu eixo vertical, para mapear a alteração da orientação do vetor da direção virtual. Foram desenvolvidos dois desenhos, que permitiram obter uma técnica que usa duas variáveis independentes: ângulo da rotação dos pés e velocidade angular. A partir dessa técnica, foram desenvolvidas duas abordagens: uma que se baseia na velocidade angular constante e outra que se baseia na velocidade angular variável.

Nas próximas secções descrevem-se as várias etapas do processo, que permitiram desenhar a técnica e as respetivas abordagens de controlo da direção virtual.

## 4.1 Análise dos movimentos dos pés

A técnica de controlo da direção, desenvolvida nesta tese, assenta em três restrições: (i) usa os dados dos movimentos de rotação dos pés como fonte de entrada de dados, (ii) funciona integrada com uma técnica CNL de controlo de velocidade e (iii) mantém o campo visual do utilizador focado na zona do ecrã.

Num ambiente imersivo, com a visualização suportada num HMD, a técnica CR pode mapear diretamente a orientação do corpo e dos pés, na direção do deslocamento virtual a tomar. No entanto, num cenário de uso da técnica CNL, com a visualização suportada num ecrã de parede de grandes dimensões, o mapeamento da orientação dos pés no valor da direção virtual não pode ser direto, sob pena de o utilizador perder o campo de visão do ecrã.

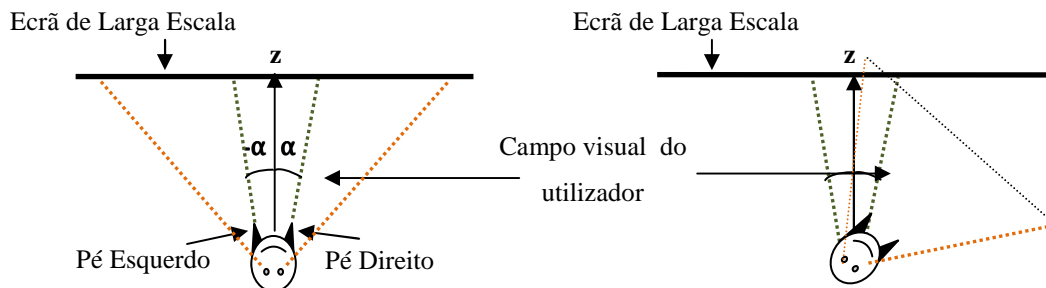
Para tentarmos perceber como se podia usar o movimento dos pés na determinação da direção do deslocamento, colocaram-se inicialmente algumas questões:

- Como pode ser utilizada a posição e/ou a direção dos pés durante os passos no lugar, na determinação da direção do deslocamento virtual, no cenário descrito previamente? Será possível desenvolver alguma técnica que permita um controlo preciso e perceptível por parte do utilizador? E será possível orientar a direção até 360° (omnidireccional)?
- Quais são as entradas de dados mais adequadas? (i) a orientação conjunta dos dois pés, ou (ii) a orientação de um só pé, considerado o dominante na tarefa de controlo da direção?

Durante o desenvolvimento da técnica, foram analisados os possíveis movimentos que os pés poderiam realizar para permitir controlar a direção. Na marcha humana, para mudar de direção, os sujeitos rodam o corpo em torno do seu eixo vertical, necessitando, para tal, de rodar os pés durante a marcha (durante alguns passos), no sentido da direção pretendida, tal como descrito na secção 2.3.1. A rotação de cada pé ocorre em torno do seu eixo vertical. Esse modelo da marcha humana permite identificar formas análogas de desenvolver uma técnica de controlo da direção virtual, no cenário descrito anteriormente.

Seguindo a analogia da marcha real, durante a realização de passos no lugar, os pés rodam num determinado sentido, que permita orientar o deslocamento na direção pretendida. No entanto, os pés não devem rodar acima de um determinado ângulo, sob pena de o sujeito perder parcial ou totalmente o campo de visão do ecrã.

Os movimentos dos pés passíveis de suportar esta técnica são mostrados na Figura 18 e na Figura 19. Na primeira dessas duas figuras, é exibida a direção perpendicular dos pés relativamente ao ecrã, em duas situações diferentes: (i) antes do início dos passos no lugar, e (ii) durante um deslocamento com trajetória rectilínea (sem mudança de direção). Na Figura 19, mostra-se que o movimento de rotação dos pés, nos passos no lugar, induzem a alteração da direção do deslocamento virtual. Os pés ao rodarem no sentido horário, provocam uma mudança semelhante na direção do deslocamento.



**Figura 18 – Posição neutra dos pés sem efeito na alteração da direção do deslocamento**

**Figura 19 - Posição dos pés com efeito na alteração da direção do deslocamento (direita)**

No entanto, e conforme é exibido na Figura 19, a rotação dos pés em torno de um eixo vertical, acima de um determinado valor angular, pode levar o utilizador a perder, em parte ou na totalidade, a vista do ecrã. A rotação dos pés provoca a rotação do corpo e também da cabeça, o que, consequentemente, pode levar a uma perda do campo visual do ecrã. Isso pode ser corrigido rodando a cabeça na direção do ecrã, mas é causador de um esforço e um incómodo acrescidos, durante os passos no lugar. Esta limitação obriga a que seja minimizada a amplitude de rotação dos pés, sem prejuízo de assegurar a omnidirecionalidade do deslocamento virtual. Desta forma, pode-se afirmar que, para se orientar o vetor da direção, numa gama de valores angulares até 360°, será necessário escalar o valor da rotação dos pés.

Definiu-se matematicamente que a orientação de cada pé, ou que a orientação resultante do ângulo formado pelos dois pés, relativamente ao plano vertical do ecrã, são descritas por vetores. O vetor resultante baseia-se na soma vetorial dos dois vetores definidos, por



cada um dos pés. Por sua vez, a direção do deslocamento do ponto de vista virtual também é descrita por um vetor, definido no sistema de coordenadas do cenário 3D.

A entrada de dados que melhor descreve a intenção do utilizador em alterar a sua direção virtual, baseada na rotação dos pés, teve inicialmente duas hipóteses: (1) usar o vetor do pé dominante da rotação ou (2) o vetor resultante. Considera-se que o pé direito é o dominante, se a rotação for no sentido horário, e que o pé esquerdo é o dominante, quando a rotação for no sentido anti-horário. A opção escolhida baseou-se nos seguintes critérios : (i) suavidade disponibilizada na alteração dos valores da rotação e (ii) gama de valores disponibilizada.

Na técnica proposta, um sujeito mantém um deslocamento virtual rectilíneo, se não ocorrerem involuntariamente pequenas rotações dos pés, que produzam alterações de direção. Para tal, deve ser definida uma zona de tolerância, que denominamos de zona neutra. Esta é representada por dois ângulos. Cada um deles é definido pelo eixo perpendicular ao ecrã, que passa entre os dois pés e por uma linha oblíqua orientada na direção de cada pé. Na Figura 18, é possível visualizar essa zona neutra, definida pelos ângulos de amplitude  $-\alpha$  e  $\alpha$ . O desenho da técnica deve definir qual é a gama de valores que esses ângulos podem assumir, para minimizar as alterações involuntárias da direção do deslocamento.

## **4.2 Desenho de duas abordagens alternativas**

Com base na análise do movimento dos pés, na tarefa de controlo da direção do movimento virtual, foi desenvolvido um protótipo preliminar desta técnica de interação, que permitiu verificar a viabilidade do uso da rotação dos dois pés, nesta tarefa. Para tal, desenvolveu-se um teste com três participantes, que pretendeu avaliar e escolher a entrada de dados mais adequada na deteção da direção dos pés (um pé ou os dois pés), e avaliar a suavidade com que a alteração da direção virtual ocorre, por efeito do movimento de rotação dos pés. A avaliação qualitativa desse parâmetro foi suportada na visualização de imagens, geradas através da rotação dos pés, tendo como intenção controlar a direção do deslocamento virtual.

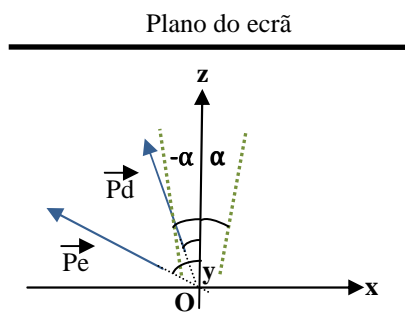
#### 4.2.1 Protótipo preliminar da técnica proposta

A primeira abordagem, que foi desenvolvida com base nesta técnica de controlo da direção virtual, teve como suporte as definições seguintes:

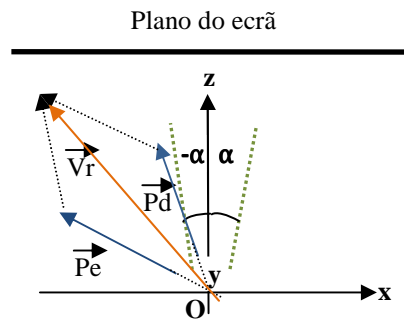
1. Para executar um deslocamento virtual num caminho retilíneo, o utilizador deve manter os pés (aproximadamente) perpendiculares ao plano do ecrã, durante a realização dos passos no lugar.
  - 1.1. O ângulo  $\alpha$  usado na zona neutra tem uma amplitude de  $7^\circ$ . Esta definição baseou-se nos estudos comparativos dos padrões da marcha humana (Murray et al., 1964, Murray et al., 1970), entre sujeitos dos dois géneros (masculino e feminino), cujo ângulo do pé, obtido em ambos os géneros, foram  $7^\circ$  e  $6^\circ$ , respetivamente.
2. Para alterar a direção do deslocamento virtual, enquanto dá passos no lugar, o sujeito deve rodar os pés num sentido semelhante, ao que pretende orientar o vetor da direção.
  - 2.1. Neste protótipo preliminar, estabeleceu-se uma relação de 1:1 entre o valor da rotação dos pés e o valor da rotação do vetor da direção virtual. Esta escolha serviu somente para testar a viabilidade do conceito do uso dos pés, como entrada de dados para controlar a direção.
  - 2.2. Após se obter a direção desejada, os pés devem rodar para a zona neutra, para evitar alterações na direção. Durante o período em que ocorre esta última ação, não se registam atualizações na direção virtual.

Na Figura 20, é possível verificar que o pé esquerdo é representado pelo vetor  $\overrightarrow{Pe}$  e o pé direito pelo vetor  $\overrightarrow{Pd}$ . A rotação de cada um dos pés efetua-se em torno de um eixo vertical que passa pelos calcanhares. Neste caso, considera-se que o vetor  $\overrightarrow{Pe}$  é o dominante da rotação, em virtude de esta ocorrer nesse sentido.

Na Figura 21, é possível identificar o vetor  $\overrightarrow{Vr}$  que é resultante da orientação descrita pelos dois pés. Matematicamente, esse vetor é a soma vetorial dos dois vetores descritores de cada pé. Neste caso, a amplitude do ângulo que esse vetor faz com o eixo dos  $zz$  é usado no cálculo da orientação do vetor da direção virtual do movimento.

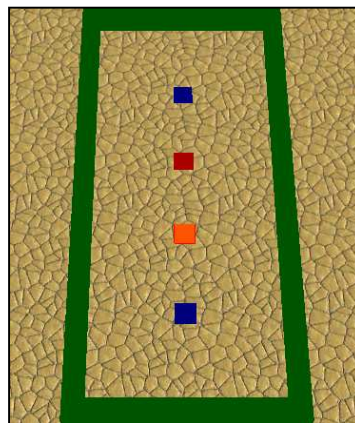


**Figura 20 – Representação do vetor de cada um dos dois pés.**



**Figura 21 - Representação do vetor de cada um dos dois pés e o respetivo vetor resultante.**

Foi solicitado a três participantes que experimentassem esta técnica de controlo de direção, propulsionando o seu movimento com recurso à implementação da técnica SAS-WIP, descrita na secção 3 deste documento. Para tal, foi-lhes proposto que realizassem uma gincana, entre quatro objetos posicionados no chão, separados entre si numa distância de 5m, que estavam alinhados numa linha recta (ver o cenário 3D na Figura 22), ao longo de 25m. Este cenário 3D foi desenvolvido pelo autor desta tese e foi modelado em OpenSG (OpenSG, 2010). Esta tarefa permitiu analisar as características desta técnica, visto requerer alterações de direção nos dois sentidos. Os participantes estavam centrados com o ecrã, posicionados a cerca de 3m de distância, e o resultado das suas ações do controlo da direção foi visualizado num ecrã de parede de grandes dimensões (4x2,5m<sup>2</sup>).



**Figura 22 – Cenário 3D do AV do estudo preliminar da técnica de controlo de direção**

A posição da ponta do pé e do calcanhar de cada um dos pés foi capturada através de um sistema de *tracking* (Optitrack, 2010), descrito na secção 5.5 deste documento. Em cada uma dessas zonas do pé aplicou-se um marcador refletor. O registo dessas posições

permitiu calcular o vetor descritivo de cada pé, que foi usado na determinação do ângulo de rotação do vetor resultante.

Na sequência desta experiência, foi possível tirar as conclusões seguintes:

- Todos os participantes conseguiram alterar a sua direção virtual, quando caminharam entre os objetos presentes no chão. Embora a distância entre os objetos (5m) não requeresse operações de grande precisão, o resultado sugere que este conceito de uso da rotação dos pés, para alterar a direção virtual do deslocamento, tem viabilidade moderada.
- Verificou-se também que o desenho atual não permite mover a direção do deslocamento de forma suave. A mudança de direção ocorre aos solavancos, na sequência da rotação dos pés, em qualquer dos sentidos. Isto provoca um efeito visual perturbador para o participante, o que influenciou negativamente a sua experiência de alteração da direção.
- O uso do vetor do pé dominante provoca um aumento da latência na atualização da direção virtual. Nesse caso, o valor da rotação só é atualizado uma vez por cada dois passos consecutivos. No caso do vetor resultante  $\vec{Vr}$ , baseado nos dois pés, a atualização da direção é mais contínua, sendo efetuada em cada passo, com base na rotação de cada um dos dois pés. Desta forma, são disponibilizados dados mais atualizados da rotação dos pés, e é assegurada uma menor latência. Desta forma, decidiu-se usar nesta técnica o vetor resultante  $\vec{Vr}$ .
- Quando os pés rodam num valor para além de 45°, o sujeito começa a perder parcialmente o campo de visão da totalidade do ecrã.

A falta de suavidade na alteração da direção do deslocamento foi uma das limitações que foi encontrada na técnica. Uma possível solução seria o uso de um filtro digital de frequências que suavizasse a variação angular da rotação. No entanto, analisando os dados do registo da rotação física dos pés, verificou-se que a variação dos valores dos ângulos é demasiado grande, relativamente à janela temporal em que a mesma ocorre (ex: 30° em 300ms). No entanto, com janelas temporais tão pequenas, seria pouco provável assegurar suavidade na alteração da direção, com recurso aos filtros digitais.

A questão da perda parcial do campo visão do ecrã, quando os pés rodam acima de um dado ângulo, requer uma solução que permita incrementar a rotação do vetor da direção virtual, sem que haja aumento do ângulo de rotação dos pés.

Na secção seguinte descrevem-se as soluções encontradas para resolver as limitações atrás identificadas.

#### **4.2.2 Redesenho da técnica**

Para ultrapassar o problema da falta de suavidade da rotação do vetor da direção virtual e assegurar a sua omni-direcionalidade, (gama de valores angulares até 360°), sem que o sujeito perca o campo visual do ecrã, colocou-se a hipótese de usar o conceito de velocidade angular, no cálculo da variação da direção do movimento. Esta ideia foi inspirada no trabalho desenvolvido por (Bouguila et al., 2002), que propõem um dispositivo físico de controlo do deslocamento virtual, constituído por um prato giratório, e sobre o qual os utilizadores podem caminhar no lugar e rodar o seu corpo (Bouguila et al., 2002), por forma a mapearem alterações da direção virtual. Neste trabalho, a velocidade angular foi usada para inverter o movimento de rotação do corpo do utilizador, impedindo-o de desviar o seu foco visual do ecrã de grandes dimensões.

Aplicando um valor de velocidade angular à rotação do vetor de deslocamento virtual, é possível assegurar-lhe uma maior continuidade e suavidade no movimento, e uma gama mais alargada de valores angulares, que permitem assegurar a sua omni-direcionalidade. Desta forma, propomos usar a velocidade angular no cálculo da direção virtual. Por exemplo, quando o utilizador roda os pés para fora da zona neutra, a rotação do vetor da direção virtual é atualizada, segundo o valor da velocidade virtual em uso, e no sentido em que os pés rodaram.

Foram desenhadas duas abordagens da técnica de controlo de direção, ambas suportadas na velocidade angular. A primeira das abordagens (“Abordagem 1”) utiliza uma velocidade angular constante, que é independente do valor da rotação dos pés. Neste caso, o vetor da direção virtual roda no mesmo sentido dos pés, com um número constante de graus por segundo. Já a segunda das abordagens (“Abordagem 2”) faz depender o valor velocidade angular, a aplicar ao vetor da direção virtual, do ângulo da

rotação dos pés. Quanto maior for esse ângulo, maior deverá ser o valor da velocidade angular a aplicar ao vetor da direção virtual.

Durante a experiência, algumas trajetórias que se pretendiam rectilíneas mudaram involuntariamente de direção, devido à saída dos pés da zona neutra. Para evitar essa situação, decidiu-se aumentar o valor de cada um dos ângulos usados na zona neutra de 7° para 8,5°. Desta forma, existe uma maior tolerância para os possíveis erros involuntários de controlo da direção.

Sintetizando, a técnica redesenhada identifica as ações seguintes que os utilizadores podem realizar, para controlar a direção virtual:

1. Para percorrer um caminho rectilíneo (sem alteração da direção), o utilizador mantém a orientação dos pés, o mais ortogonal possível em relação ao plano do ecrã, na denominada zona neutra, não podendo o ângulo de cada um deles exceder o valor de 8,5°.
2. Para alterar a direção do deslocamento virtual, o utilizador roda os pés nesse sentido, para fora da zona neutra.
  - 2.1. Usando a “**Abordagem 1**”, é aplicada uma velocidade angular constante à rotação do vetor da direção virtual, independentemente da amplitude do ângulo que é descrito entre o vetor dos pés e o eixo dos  $zz$ .  
Usando a “**Abordagem 2**”, é aplicada uma velocidade angular variável à rotação do vetor da direção virtual, cujo valor depende da amplitude do ângulo que os pés fazem com o eixo dos  $zz$ .
  - 2.2. Quando o utilizador obtém a direção pretendida, então roda os pés no sentido contrário, até atingir a zona neutra. Durante esta ação, não é alterada a direção do deslocamento virtual.

Nas próximas duas secções, são explicados os desenhos das duas abordagens propostas neste trabalho.

#### **4.2.3 Abordagem baseada na velocidade angular constante**

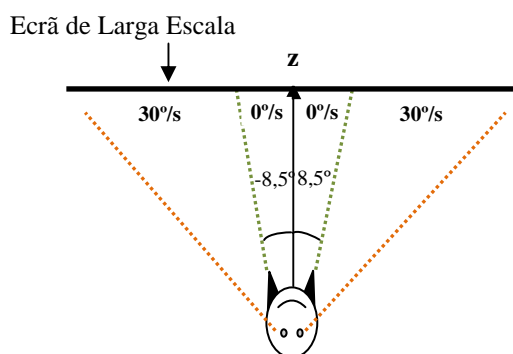
Esta abordagem baseia-se no uso da velocidade angular constante como entrada de dados para o cálculo da alteração da direção virtual. O uso desse valor constante apresenta as vantagens seguintes: a alteração da direção virtual é previsível, e basta uma

pequena rotação dos pés, fora da zona neutra, para que tenha efeito. No entanto, não permite acelerar ou desacelerar a alteração da direção virtual, o que retira flexibilidade ao utilizador, em alguns casos de uso, em que a rapidez da tarefa é crítica.

A escolha do valor da velocidade angular constante não deve recair num valor exageradamente grande, que possa retirar precisão ao utilizador, nem muito pequeno, que torne demorada a tarefa de alteração da direção.

As três hipóteses de escolha colocadas inicialmente para a atribuição do valor da velocidade angular constante foram as seguintes: 15°/s, 30°/s e 45°/s. Estes valores tiveram como referência base o trabalho de (Terziman et al., 2010), que definiu um intervalo da velocidade angular, entre 15°/s e 45°/s, para controlar a direção do deslocamento com movimentos da cabeça. Para escolher um desses três valores, foram efetuados testes informais com três participantes, que realizaram a mesma tarefa da experiência relatada anteriormente, nas mesmas condições de utilização. Após a utilização das três condições, os três participantes foram unânimes em preferir o valor de 30°/s, que consideraram o mais cómodo e flexível no controlo da direção virtual.

Na Figura 23, é possível visualizar os limiares máximos dos ângulos que os pés realizam com o eixo dos  $zz$ , na zona neutra e também a área que permite alterar o vetor da direção virtual, baseado na velocidade angular constante de 30°/s.



**Figura 23 – Abordagem de controlo de direção baseada na velocidade angular constante**

Na implementação desta abordagem, o ângulo que define o vetor da direção virtual com o eixo dos  $zz$  é atualizado de forma relativa ao seu valor anterior. Ou seja, o seu valor é atualizado com base na soma algébrica do seu valor atual com a variação angular ocorrida em cada *frame*. Como o sistema usado gera sessenta *frames* por segundo, e a

velocidade angular é de 30°/s, então a variação angular ocorrida em cada *frame* é de 0,5°.

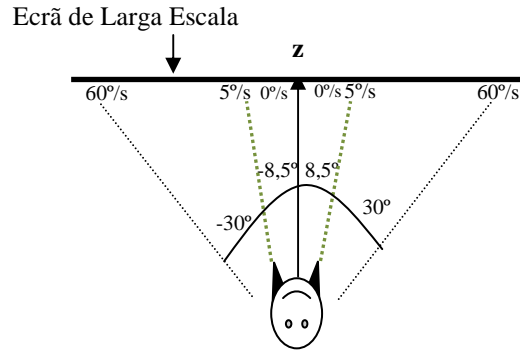
#### **4.2.4 Abordagem baseada na velocidade angular variável**

Esta abordagem baseia-se no uso da velocidade angular variável como entrada de dados para o cálculo da alteração da direção virtual. O uso desse valor variável apresenta a vantagem de permitir desacelerar ou acelerar o valor da rotação do vetor de direção, disponibilizando uma maior flexibilidade na escolha da rapidez de tarefa. O valor da velocidade angular a aplicar depende da amplitude do ângulo de rotação dos pés. A um maior ângulo de rotação dos pés, é mapeada uma maior velocidade angular. Esta solução pode ter o risco de não permitir uma percepção clara na relação que os sujeitos estabeleçam entre a alteração de direção pretendida e a ação efetuada com os pés.

Como o valor obtido na abordagem da velocidade angular constante é de 30°, decidiu-se usar nesta solução um limiar máximo de velocidade angular que contrastasse claramente com esse valor constante. Daí que a escolha recaiu no valor de 60°/s. O limiar mínimo de velocidade angular que foi escolhido é de 5°/s. Pretendeu-se com este valor fornecer retorno imediato ao utilizador, assim que ele move os pés para fora da zona neutra.

Para que o valor da velocidade angular varie entre o limiar mínimo e o máximo, foi necessário definir o intervalo angular da rotação dos pés, fora da zona neutra. Tal como foi relatado anteriormente, quando o ângulo de rotação dos pés está para além dos 45°, então o utilizador perde parcialmente o campo visual do ecrã, se a cabeça se mantiver orientada na direção do corpo. Com base nesta restrição, decidiu-se usar um intervalo angular que somado ao ângulo da zona neutra não ultrapassasse o valor de 45°. Tomou-se a decisão de definir esse intervalo no valor de 30°. Desta forma, o ângulo máximo da rotação dos pés, que tem efeito na alteração da direção virtual, é de 38,5° (8,5° da zona neutra, adicionado com o valor de 30°). Na Figura 24, é possível verificar graficamente os intervalos da velocidade angular e da rotação dos pés, propostos nesta abordagem.





**Figura 24 – Limiares de ângulos e de velocidades angulares da abordagem baseada na velocidade angular variável**

A fórmula que mapeia o valor da rotação dos pés, no valor da velocidade angular variável, é resultante da interpolação linear entre a variação dessas duas métricas, entre os seus limites inferiores e superiores. A equação (4) mostra a obtenção do valor da velocidade angular ( $Va$ ), em função da amplitude do ângulo de rotação dos pés ( $Ar$ ).

$$Va = (1,83 * Ar + 5,01) \quad (4)$$

Como o sistema de visualização utilizado exibe sessenta imagens por segundo, então a variação da angular ( $\Delta A$ ) é atualizada em cada *frame*, segundo a equação (5).

$$\Delta A = Va/60 \quad (5)$$

Utilizando esta equação, é possível verificar que os valores da variação angular, por cada imagem gerada, varia entre um ângulo mínimo de aproximadamente  $0,24^\circ$  e um máximo de  $1,0^\circ$ , para os limiares mínimos e máximos de rotação dos pés, respetivamente. Verifica-se que esta abordagem disponibiliza uma maior liberdade na escolha da gama de valores a usar por unidade de tempo, podendo assegurar menos ou mais rapidez na alteração da mudança de direção virtual.

### 4.3 Conclusões

Foi desenvolvida uma proposta de técnica de controlo que utiliza a orientação dos pés relativamente ao plano vertical do ecrã, para controlar a direção virtual, num cenário em que o utilizador dá passos no lugar, em frente a um ecrã de parede de grandes dimensões.

O primeiro protótipo usou um mapeamento direto, entre a rotação dos pés e a rotação do vetor da direção virtual, e permitiu identificar uma viabilidade mínima no uso desta

técnica. Mas também permitiu identificar a falta de suavidade na alteração do deslocamento virtual colocando o olhar do utilizador parcialmente fora do campo visual do ecrã, para ângulos de rotação dos pés superiores a 45°.

A solução para resolver essas limitações focou-se no uso da velocidade angular, para controlar a alteração da direção do deslocamento. Nesse sentido, foram desenvolvidas duas abordagens: uma que utiliza um valor da velocidade angular constante e a outra é suportada numa gama de valores de velocidade angular variável. Após testes informais com participantes, definiu-se o valor da velocidade angular constante em 30°/s. Relativamente à velocidade angular variável, definiu-se uma gama de valores entre o limiar mínimo de 5°/s e o máximo de 60°/s, dentro de um intervalo angular de rotação dos pés de 30°.

Estas duas abordagens têm características diferentes, que podem ser usadas em diferentes cenários de utilização. Com a velocidade angular constante, os seus resultados do controlo da direção poderão ser mais previsíveis, porém fica limitado na rapidez dessa tarefa. Usando a velocidade angular variável, o utilizador pode utilizar uma gama mais alargada de valores, o que lhe assegura uma maior liberdade, na rapidez com que pretende alterar a sua direção virtual. Para validar e avaliar o desempenho proporcionado aos utilizadores, por estas duas abordagens, em tarefas de controlo da direção virtual, serão realizados testes com participantes que serão descritos nos dois capítulos seguintes.



## 5 Experiência com Participantes

No trabalho de investigação desta tese foi desenvolvido-se a abordagem SAS-WIP, para controlar a **velocidade virtual** e foram desenvolvidas duas abordagens alternativas do **controlo da direção** do movimento virtual, nomeadas com os acrónimos IVAC (Interface de Velocidade Angular Constante) e IVAV (Interface de Velocidade Angular Variável).

Para medir o desempenho disponibilizado ao utilizador, por essas interfaces, foram desenhados dois tipos diferentes de testes. Um deles tem como objetivo comparar entre si as interfaces de controlo de velocidade: SAS-WIP, GUD-WIP, e o *joystick* do dispositivo Wii Nunchuck™, em **tarefas de controlo de velocidade**, em ambientes virtuais. O outro tipo de testes pretende comparar as interfaces IVAC, IVAV, e o *joystick* do dispositivo Wii Nunchuck™, em tarefas **de controlo da direção** do movimento virtual. Foram também desenhados inquéritos pós-testes, para registar a opinião e a preferência dos participantes, relativamente às interfaces, com base em vários critérios subjetivos. A aplicação destes questionários foi efetuada na sequência das experiências vivenciadas pelos participantes durante os testes.

As tarefas desenhadas para validar o controlo da velocidade são as típicas dos casos de uso da tarefa viajar em AV's., em que os participantes pretendem controlar o seu movimento linear, entre uma posição inicial e final. As tarefas desenvolvidas para medir as interfaces de controlo de direção exploram o controlo de movimento em caminhos não lineares na exploração do AV.

Os vinte participantes que tomaram parte na experiência participaram nos dois tipos de testes: de controlo de velocidade e de direção. Foram definidas métricas para medir o desempenho que as interfaces disponibilizam aos participantes, nas tarefas propostas. Foram desenvolvidos dois modelos 3D diferentes que, um que suporta os testes do controlo da velocidade, e o outro apoia os testes de controlo da direção do deslocamento não-linear.

A experiência foi desenvolvida no *Campus* Universitário do Instituto Superior Técnico, no Taguspark, no laboratório Lourenço Fernandes. Foram usados os recursos aí disponíveis, em especial um sistema de *tracking*, que permite detetar a posição dos dois

pés dos participantes e um ecrã de parede de grandes dimensões, onde é visualizado o AV.

Durante a execução dos testes, foi seguido um protocolo de procedimentos previamente validado num ensaio piloto com um participante, e foram aplicados inquéritos pré e pós-teste aos participantes. Os dados provenientes das ações de entrada dos participantes, dos resultados de interação processados, e do movimento do ponto de vista virtual foram registados em ficheiros, com uma estrutura de dados apropriada para o efeito. As sessões de testes foram registadas em vídeo, por forma a analisar a linguagem corporal, as expressões e os comentários dos participantes. Estes registos também serviram para esclarecer dúvidas sobre os resultados de algumas suas ações dos participantes.

O desenho da experiência foi desenvolvido de forma a otimizar o número de participantes a tomar parte na experiência, evitando o enviesamento dos resultados, e permitindo a aplicação de testes estatísticos inferenciais.

## 5.1 Tarefas

As duas secções seguintes descrevem as tarefas que foram desenhadas para medir o desempenho disponibilizado aos participantes, pelas três interfaces de **controlo de velocidade** em caminhos lineares, e das três interfaces de **controlo de direção**, em caminhos não-lineares.

### Controlo de Velocidade

Com a tarefa de viajar em AV's, o utilizador pode atingir diferentes objetivos, conforme a dimensão das distâncias a percorrer, ou a necessidade de parar de forma precisa junto a objetos alvo. As duas tarefas desenhadas para validar o desempenho proporcionado pelas interfaces no controlo da velocidade em caminhos lineares foram as seguintes:

- **Tarefa1.** - Percorrer nove caminhos lineares (entre um alvo inicial e um alvo final), sequencialmente, e que apresentam diferentes dimensões (curtas, médias e longas).
- **Tarefa2.** - Paragem no final do deslocamento de cada um dos nove caminhos lineares, em frente a um objeto alvo, o mais perto possível dele, mas sem o ultrapassar.

Está previsto que estas duas tarefas sejam realizadas em simultâneo para cada caminho percorrido. Foi solicitado aos participantes que percorram os caminhos curtos e médios numa velocidade que lhes seja confortável, e que nos caminhos longos, sejam tão rápidos quanto possível, entre a marca inicial e a final (que estão desenhadas no chão), e que, no final de cada caminho, parem o mais perto possível da marca final, sem a ultrapassar.

Os nove caminhos a percorrer pelos participantes têm a sequência e as distâncias exibidas na Tabela 7. Esses caminhos foram posteriormente agrupados em três classes de distâncias: curtas, médias e longas distâncias.

Caminho	Distância (m)	Classes
C1	6,0	Média
C2	1,0	Curta
C3	12,0	Média
C4	0,5	Curta
C5	24,0	Longa
C6	1,5	Curta
C7	3,0	Curta
C8	48,0	Longa
C9	2,0	Curta

***Tabela 7: Sequência, distâncias e classes de distâncias dos caminhos lineares***

A visualização do ponto de vista virtual foi definida na perspetiva da primeira pessoa. Assim, o utilizador percebe a proximidade que está em relação a um alvo, com base na distância verificada entre a posição do objeto, e a base da imagem que está a visualizar. Desta forma, o objeto alvo só é ultrapassado quando a sua representação visual desaparece da parte inferior da janela de visualização.

Com a realização da **Tarefa 1**, é possível medir os critérios de desempenho: “Rapidez”, “Eficiência” e “Fluidez e Continuidade de Interação”. A **Tarefa 2**, permite medir os critérios de desempenho: “Eficácia” e “Precisão”.

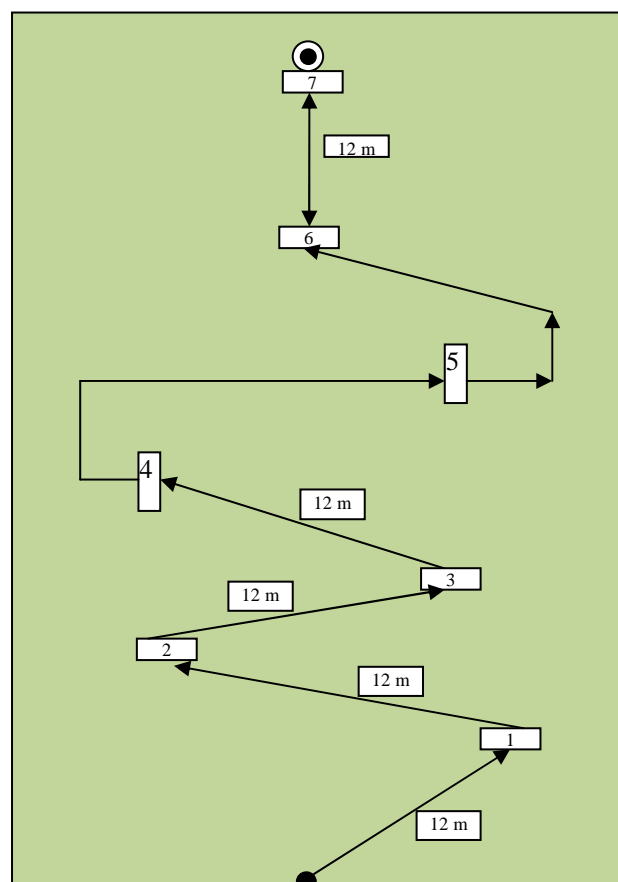
### **Controlo de Direção**

Foi desenhada uma tarefa para avaliar comparativamente o desempenho proporcionado pelas três interfaces no controlo da direção em caminhos não-lineares. Para suportar as ações de controlo da orientação do vetor de deslocamento virtual, foi projetada uma tarefa semelhante a um *slalom*, na qual os utilizadores têm que passar através de sete pórticos. Estes encontram-se em diferentes posições do AV, originando sete caminhos

não-lineares, entre o ponto inicial e final do percurso. A sequência dos caminhos entre os pórticos é fixa.

Antes do início da tarefa, os participantes foram instruídos para percorrerem os caminhos entre os pórticos, com uma velocidade moderada, e para passarem o ponto de vista virtual entre os pórticos.

Na Figura 25, exibe-se o desenho com o posicionamento dos pórticos e os caminhos que os participantes têm que seguir, desde a posição inicial até à final (imediatamente a seguir ao pórtico nº 7).



**Figura 25: Posicionamento dos pórticos e definição dos caminhos não-lineares**

A visualização desta tarefa é também efetuada na perspetiva da primeira pessoa. O pórtico, para além de ter dois postes e uma barra, também tem uma marca retangular no chão. Estas pistas visuais permitem ao participante perceber se está ou não na direção correta. Como a visualização também está na perspetiva da primeira pessoa, o utilizador verifica se está a passar a marca por baixo do pórtico, com base na distância que se verifica entre esse objeto e a base da imagem.

## 5.2 Participantes

Os vinte participantes, que fizeram parte deste estudo, foram cinco do género feminino e 15 do género masculino. As suas idades variaram entre os vinte e os trinta e três anos (média=24,5 anos). As suas alturas variam entre o 1,51m e o 1,87m (média de 1,73m). Os participantes são alunos de cursos de licenciatura, mestrado e doutoramento, e foram recrutados no Campus Universitário do IST, no Taguspark. Nenhum dos participantes possuía qualquer impedimento físico/motor que prejudicasse a realização destes testes.

Interrogados num questionário pré-teste sobre o seu perfil de utilizadores de jogos virtuais interativos, a maioria respondeu que joga todas as semanas, com predominância para o uso do computador pessoal, em detrimento do telemóvel e da consola. Interrogados sobre se os seus jogos requerem o controlo de navegação de uma personagem virtual, a esmagadora maioria respondeu afirmativamente. Os participantes afirmaram também que usam igualmente jogos que controlam o seu ponto de vista virtual, tanto na primeira pessoa, como na terceira pessoa. A esmagadora maioria dos participantes referiu também que usa dispositivos físicos (rato, teclado, *joystick*), em detrimento do uso de gestos/poses para controlar a locomoção. Isto demonstrou que o uso do *joystick* não constituiu qualquer problema para os participantes. Nenhum deles alguma vez tinha usado uma interface de locomoção física.

Todos os participantes demonstraram empenho nas tarefas que lhes foram propostas e cumpriram as instruções transmitidas. Quando na fase pré-teste algum dos utilizadores manifestou dificuldades com o uso das interfaces, disponibilizou-se mais algum tempo de treino.

## 5.3 Métricas de Desempenho

Para medir a preferência subjetiva dos participantes, relativamente às três interfaces, tanto nas tarefas de controlo de velocidade como de direção, foram definidos os seis critérios seguintes:

- Divertimento
- Facilidade de Uso
- Fadiga



- Controlabilidade
- Naturalidade
- Apreciação Global

Para medir o desempenho objetivo dos participantes, nas tarefas de controlo da velocidade e de controlo da direção, foram definidas várias métricas quantitativas, que serão explicadas nas próximas secções.

### **Controlo de Velocidade**

As métricas quantitativas que mediram os resultados concretos das ações dos utilizadores permitiram suportar os critérios de desempenho de alto nível (eficácia, precisão, eficiência, rapidez, e fluidez e continuidade de interação).

Relativamente à tarefa de deslocamento virtual em caminhos lineares, decidiu-se analisar a métrica “velocidade média dos caminhos percorridos”, “número de passos” e o “número de paragens efectuado pelos participantes”.

Relativamente à tarefa de paragem em frente aos alvos, decidiu-se analisar a métrica “frequência de ultrapassagens dos alvos” e a “distância entre a posição de paragem e o alvo (para o caso de não terem ocorrido ultrapassagens)”.

Foi definida uma relação entre as métricas quantitativas e os critérios de desempenho de alto nível, conforme a lista seguinte:

- Frequência de ultrapassagens / Eficácia
- Distância final ao alvo / Precisão
- Número de passos / Eficiência
- Velocidade média / Rapidez
- Número de paragens do movimento / Fluidez e Continuidade de Interação

As métricas quantitativas foram calculadas a partir dos dados de interação registados durante a fase de testes, provenientes dos sistemas de *tracking*, de visualização e da interação.

## **Controlo de Direção**

As métricas quantitativas definidas para medir o desempenho dos participantes foram as quatro seguintes:

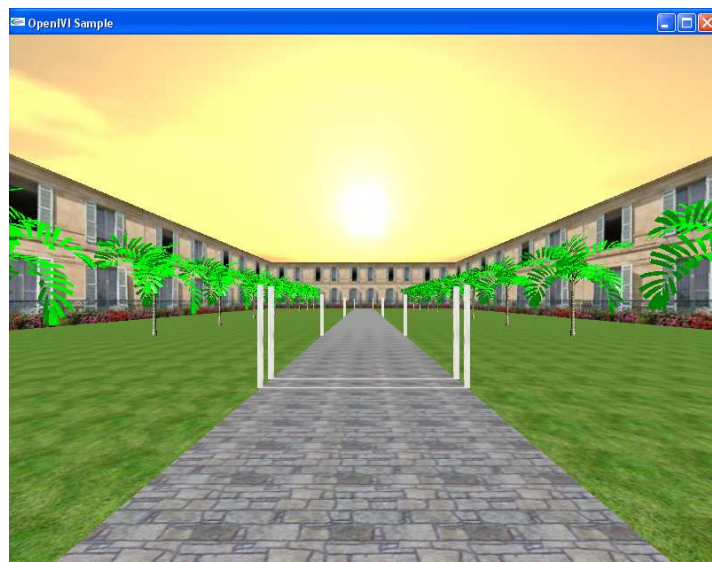
- Tempo da Tarefa
- Percentagem de Alvos Transpostos
- Percentagem de Tempo das Viragens de Direção
- Número de Viragens de Direção

## **5.4 Ambiente Virtual**

Desenvolveu-se um modelo 3D para os testes da tarefa de controlo de velocidade em caminhos lineares, e um outro para o controlo de direção, em caminhos não lineares. Os dois cenários contêm várias pistas visuais, que permitem orientar os participantes no deslocamento linear e não-linear, através do controlo do ponto de vista na primeira pessoa. Nas próximas duas secções serão descritos esses dois cenários virtuais.

### **Controlo de Velocidade**

O ambiente virtual desta experiência baseou-se num cenário tridimensional de um jardim, envolvido por prédios, e com um caminho linear na zona central. Esse passeio, com o chão empedrado, tem um comprimento de 100m, e está segmentado em nove caminhos, de diferentes distâncias. Cada caminho é delimitado por duas marcas retangulares presentes no chão, tal como é exibido na Figura 26. Junto a cada marca, encontramos dois postes verticais, que constituem pistas visuais, para ajudar o participante a perceber melhor a sua posição em relação aos alvos.



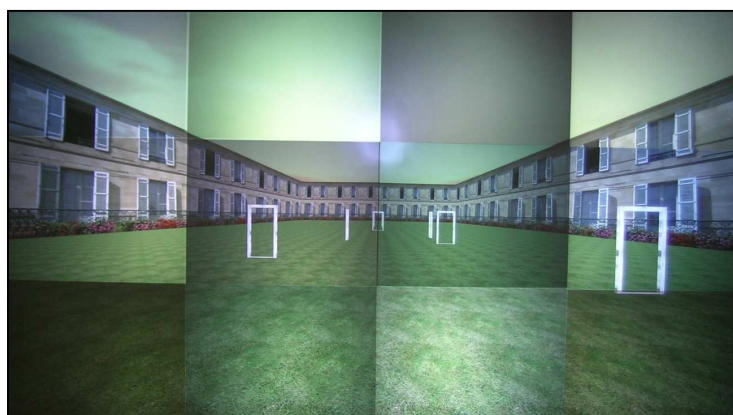
*Figura 26: Ecrã que exhibe o ambiente virtual do cenário do controlo de velocidade*

O relvado, as árvores e as casas também constituem pistas visuais que têm como intenção ajudar o participante a perceber melhor as distâncias aos alvos, quando ele está a efetuar o deslocamento nos caminhos.

O cenário 3D foi modelado em OpenSG (OpenSG, 2010) e o *rendering* gerado na framework OpenIV.

### **Controlo de Direção**

O ambiente virtual desta experiência baseou-se num cenário tridimensional de um relvado, envolvido por prédios, e que contém sete pórticos que devem ser atravessados pelos participantes, em caminhos não lineares, como pode ser visualizado na Figura 27.



*Figura 27: Ecrã que exhibe o ambiente virtual do cenário do controlo de direção*

Os pórticos têm um comprimento na base e no topo de 1m e estão em diferentes posições, para obrigar os participantes a alterarem a sua direção do deslocamento, por forma a passarem entre eles. Os caminhos para alcançar os dois pórticos que estão orientados ortogonalmente, em relação aos outros cinco, requerem um controlo mais amplo da direção do vetor do deslocamento virtual.

## 5.5 Sistema

Os dois principais sub-sistemas físicos usados no laboratório foram o *tracker* e o ecrã de parede de grandes dimensões. O *tracker* de marca Optitrack (Optitrack, 2010) tem como base uma rede de dez câmaras de infra-vermelhos, com uma frequência de captura de 100hz, e permite seguir marcadores refletores numa área de 3m<sup>2</sup>. O *software* Arena é o responsável pelo processamento das imagens obtidas, para determinar a posição 3D de cada marcador. O conjunto desses dados é enviado por rede para o respetivo cliente, em que o *software* Opentracker (Reitmayr & Schmalstieg, 2005) é o responsável por gerir o fluxo dos dados 3D.

Em cada pé do utilizador foram colocados dois marcadores (no calcanhar e no bico do pé), que refletem os feixes de infravermelhos emitidos pelas câmaras. Para os testes de controlo de velocidade só foram usados os marcadores dos calcanhares, enquanto que para os testes de controlo de direção, foram usados os dois marcadores de cada pé. Na Figura 28 é possível visualizar os quatro marcadores nos pés do participante.

A visualização do ambiente virtual é suportada num ecrã de parede de grandes dimensões, composto por uma tela flexível de 4x2,5m<sup>2</sup>. Cada imagem é projetada por oito projetores, colocados na parte de trás da tela, conforme pode ser visualizado na Figura 28.



*Figura 28: Ambiente de realização da experiência com destaque para o ecrã de larga escala*

O *Joystick* usado nos dois tipos de testes da experiência foi o Wimote-Nunchuk analógico (Nintendo, 2012). No teste de controlo de velocidade, a gama dos valores da velocidade varia entre 0 m/s, quando a vareta está na posição central, e 4 m/s quando ela atinge a sua posição vertical máxima. No teste de controlo de direção, o deslocamento horizontal da vareta gera uma velocidade angular, entre o valor mínimo de 0 °/s (quando a vareta está na posição central) e 45°/s (quando a vareta está na sua posição extrema, para a direita ou para a esquerda).

## 5.6 Procedimentos

No início da experiência, foi comunicado a cada participante qual era o propósito deste estudo, baseado no uso das duas interfaces de locomoção física e do referido *joystick*, em tarefas típicas de locomoção. Após este procedimento, foi aplicado um inquérito pré-teste, que pretendia obter informação demográfica sobre os participantes e sobre o seu perfil de utilização de ambientes virtuais e de interfaces de locomoção virtual.

Seguidamente, os participantes foram informados sobre as tarefas que deveriam realizar e foi-lhes também explicado como funcionava cada uma das três interfaces. Antes de cada sessão de testes, foi disponibilizado-se um período de dez minutos, para os participantes treinarem com cada uma das três interfaces. Se o participante se sentisse cómodo com a interface, antes desse período, iniciava imediatamente a sessão. Se, no

final dos dez minutos, o participante ainda não se sentisse confortável com a interface, esse período poderia ser prolongado.

Todos os vinte participantes utilizaram as três interfaces. Para evitar que houvesse um efeito de enviesamento nos resultados, a ordem do uso das interfaces foi equilibrada, usando o método dos quadrados latinos.

Após a realização do teste com uma dada interface, aplicou-se um inquérito, que tinha como intenção perceber como é que cada participante percecionou alguns aspetos da experiência. Para tal, cada participante preencheu um inquérito subjetivo de opinião.

No final dos testes com todas as interfaces, aplicou-se um inquérito pós-teste, que pretende identificar a preferência dos participantes relativamente às interfaces, bem como obter comentários e sugestões sobre a experiência desenvolvida.

## 5.7 Desenho das experiências e análise de dados

Nas duas secções seguintes descrevem-se o desenho da experiência e a análise de dados dos testes de controlo de velocidade e de direção.

### Controlo de Velocidade

Na experiência, foi usado um desenho intra-sujeitos, em que cada participante testou as três interfaces. O desenho de execução da experiência teve a configuração seguinte: 20 participantes x 9 caminhos x 3 interfaces = 540 caminhos percorridos.

Para se analisar o efeito das distâncias neste estudo, os dados dos nove caminhos originais foram agrupados em três classes de distâncias: curtas, médias e longas. Desta forma, esta análise dos dados suportou-se na configuração seguinte: 20 participantes x 3 classes de distâncias x 3 interfaces = 180 valores analisados.

A classe das **distâncias curtas** agrupou os caminhos com as seguintes dimensões: 0,5m, 1,0m, 1,5m, 2,0m e 3,0m. A classe das **distâncias médias** agrupou os caminhos com as seguintes dimensões: 6,0m e 12,0m. A classe das **distâncias longas** agrupou os caminhos com as seguintes dimensões: 24,0m e 48,0m.

As amostras de dados das métricas “frequência de ultrapassagens dos alvos”, “Distância final ao alvo” e “Número de paragens” não apresentaram uma distribuição normal.

Desta forma, a inferência estatística baseou-se no teste não paramétrico de Friedman e nos testes *post-hoc* Wilcoxon.

Para as métricas “Velocidade média” e “Número de Passos”, utilizou-se o teste estatístico ANOVA – Dois Fatores (interface e distância), de medidas repetidas. Foram aplicadas correções de esfericidade de Greenhouse-Geisser quando o teste de Mauchly revela um efeito significativo. O teste de correção de Bonferroni foi usado como teste *post-hoc* sobre as amostras da métrica “velocidade média”, enquanto o teste-t foi usado sobre as amostras da métrica “número de passos”.

As amostras de dados do questionário subjetivo foram estatisticamente analisadas com a aplicação do teste não paramétrico de Friedman e dos testes *post-hoc* Wilcoxon.

O nível de significância usado em todos os testes de hipóteses tem o valor de 0,05 ( $\alpha=0,05$ ).

### **Controlo de Direção**

Nesta experiência foi usado um desenho intra-sujeitos, em que cada participante testa as três interfaces. O desenho de execução da experiência teve a configuração seguinte: 20 participantes x 7 caminhos x 3 interfaces = 420 caminhos percorridos.

As amostras de dados das variáveis dependentes Tempo da Tarefa, Percentagem de Alvos Transpostos, Percentagem de Tempo das Viragens de Direção e Número de Viragens de Direção não apresentaram uma distribuição normal. Desta forma, a inferência estatística baseou-se no teste não paramétrico de Friedman e nos testes *post-hoc* Wilcoxon.

As amostras de dados do questionário subjetivo foram estatisticamente analisadas com a aplicação do teste não paramétrico de Friedman e dos testes *post-hoc* Wilcoxon.

O nível de significância usado em todos os testes de hipóteses tem o valor de 0,05 ( $\alpha=0,05$ ).

## 5.8 Equidade entre as três interfaces do teste

Para que haja uma comparação justa na rapidez disponibilizada pelas três interfaces, é necessário assegurar que os participantes possam atingir velocidades semelhantes. Como foi referido na secção 5.5, o *joystick* utilizado foi programado para atingir uma velocidade máxima de 4,0 m/s. Na Tabela 8 é mostrado um quadro com quatro níveis de velocidade virtual semelhantes, gerados pelos sistemas SAS-WIP e GUD-WIP. Os valores iniciais de referência baseiam-se na Tabela 6. O sistema GUD-WIP gera a velocidade virtual a partir de um fórmula da biomecânica da marcha real (Dean, 1965), que recebe como valores de entrada a frequência dos passos e a altura do sujeito. Tomámos o valor de 1,76m como a referência da altura do sujeito.

Verificamos que é possível gerar um leque de velocidades semelhantes por parte das duas interfaces. A velocidade com o Cód.1 é considerada muito rápida, com o Cód.2 é rápida, com o Cód.3 é moderada, e com o Cód.4 é considerada lenta. Verificámos que há viabilidade na escolha destes para a GUD-WIP, através do gráfico da relação velocidade x frequência do trabalho de (Dean, 1965). Os valores expostos sugerem que existe uma equidade aproximada entre as velocidades máximas que as três interfaces podem atingir.

Cód.	GUD-WIP		SAS-WIP		
	Freq. (hz)	Virtual Speed(m/s)	Ampl.(m)	Foot Speed (m/s)	Virtual Speed (m/s)
1	3,07	4,0	046	1,13	4,0
2	2.36	2.36	0.31	0.99	2.36
3	1.59	1.07	0.20	0.70	1.07
4	0,97	0.40	0.10	0.40	0.40

***Tabela 8: Comparação dos valores da velocidade gerada pelo SAS-WIP e GUD-WIP***

O sistema GUD-WIP apresenta segundo os seus autores uma latência elevada, na paragem do deslocamento virtual, porque pretende simular a fase de paragem da marcha humana, reduzindo a velocidade gradualmente. Na implementação que fizemos do GUD-WIP optámos por parar o seu movimento de paragem, imediatamente a seguir ao reconhecimento desse estado. Desta forma, os dois sistemas têm um mecanismo semelhante de paragem, o que lhes assegura equidade na paragem do movimento virtual.





## 6 Resultados e Discussão

Foram realizadas dois tipos de experiências com vinte participantes neste trabalho de investigação. Uma das experiências tinha como objetivo medir o desempenho proporcionado aos participantes, por três diferentes interfaces (SAS-WIP, GUD-WIP e o *joystick* do dispositivo Wii Nunchuck<sup>tm</sup>), em tarefas de controlo de velocidade virtual. A outra experiência pretendia também medir o desempenho dos participantes, com três diferentes interfaces (IVAC, IVAV e *Joystick*), em tarefas de controlo da direção do deslocamento virtual.

As métricas quantitativas registadas nas tarefas de **controlo da velocidade virtual** permitiram medir o grau de desempenho dos participantes nos seguintes critérios: Eficácia, Precisão, Eficiência, Rapidez e Continuidade de Interação. Os resultados subjetivos dos inquéritos, aplicados após esses testes, baseiam-se nos seis critérios seguintes: Divertimento, Facilidade de Uso, Fadiga, Controlabilidade, Naturalidade e Apreciação Global. Foram usados testes estatísticos inferenciais para descobrir a existência ou não de diferenças entre as três interfaces. Os resultados sugerem que o *Joystick* disponibiliza um desempenho superior que as duas interfaces CNL, mas que a SAS-WIP oferece aos participantes um melhor desempenho do que a GUD-WIP. Relativamente aos critérios subjetivos de opinião, os participantes preferiram, em termos globais, a interface SAS-WIP em detrimento das outras duas interfaces.

As métricas objetivas utilizadas para medir o desempenho dos participantes, nas tarefas de **controlo da direção virtual**, foram as quatro seguintes: Tempo da Tarefa, Percentagem de Alvos Transpostos, Percentagem de Tempo das Viragens de Direção e Número de Viragens de Direção. Relativamente às preferências subjetivas dos utilizadores, foi aplicado um questionário baseado em seis critérios: Divertimento, Facilidade de Uso, Fadiga, Precisão, Naturalidade e Apreciação Global.

Nas próximas secções serão descritos os resultados obtidos, a análise estatística efetuada e a respetiva discussão, resultante dos testes com utilizadores.

## 6.1 Controlo da Velocidade Virtual

Na sequência da experiência relativa às tarefas de controlo da velocidade virtual, foi efetuada uma validação dos dados de interação referentes às ações físicas de entrada dos participantes e ao movimento do ponto de vista virtual. Com base nesses dados, foi desenvolvido um sistema que reproduz visualmente as ações dos participantes em cada sessão, o que permitiu, em conjunto com a análise dos vídeos, desambiguar algumas situações duvidosas na análise dos dados.

Os critérios em que se baseou o desempenho dos participantes, nas tarefas de controlo da velocidade, são os seguintes: **eficácia, precisão, eficiência, rapidez e fluidez, e continuidade de interação**. A medição do nível de eficácia das interfaces baseou-se na métrica “**Frequência das ultrapassagens dos alvos**”. O critério da precisão disponibilizada pelas interfaces foi medido com base na métrica “**Distância final ao alvo**”. A eficiência das duas interfaces de locomoção física foi suportada na métrica “**Número de passos**”. O critério de desempenho que caracteriza a rapidez fornecida pelas interfaces é apoiado na métrica “**Velocidade média**”. E finalmente, o critério que determina o nível de fluidez e continuidade da interação é avaliado através da métrica “**Número de paragens**” no movimento virtual.

Nas próximas secções, descrevem-se os resultados obtidos a partir da análise estatística aplicada, sobre as amostras de dados de interação, registados durante as várias sessões da experiência. Esses resultados serão também objeto de discussão e de interpretação.

### 6.1.1 Eficácia na frequência das ultrapassagens dos alvos

Durante a tarefa de paragem do deslocamento virtual em frente e antes de cada um dos nove alvos, foram registadas as respetivas ultrapassagens ocorridas. A ultrapassagem de um alvo significa o cometimento de um erro pelo participante. Um dos critérios de desempenho usados neste estudo é a eficácia. Nesta experiência, quanto menos ultrapassagens uma interface possibilita ao seu utilizador, maior será a sua eficácia. No caso de se ter registado uma ultrapassagem, foi-lhe atribuído o valor “1”, e no caso contrário, o valor “0”. Estes valores foram processados para a análise estatística, originando a métrica “**frequências das ultrapassagens**”.

### **Análise para as nove distâncias percorridas**

Nesta análise dos dados, tentou-se perceber qual é o efeito que as interfaces e as diferentes distâncias percorridas têm nas frequências de ultrapassagens dos nove alvos.

A análise descritiva das **frequências das ultrapassagens** dos alvos, por cada interface, mostra-se na Tabela 9, e revela que o *joystick* é a interface que apresenta, em média, menos ultrapassagens ( $\mu=0,38$ ), seguida pela SAS-WIP ( $\mu=0,56$ ), e finalmente pela GUD-WIP ( $\mu=0,72$ ).

<b>Interface</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>SAS_WIP</b>	0,56	0,26
<b>GUD-WIP</b>	0,72	0,21
<b>Joystick</b>	0,38	0,29

***Tabela 9: Média e desvio padrão da frequência das ultrapassagens por interface***

A aplicação do teste Friedman mostrou diferenças estatisticamente significativas entre as interfaces, relativamente à frequência das ultrapassagens ( $\chi^2_2=19,921$ ,  $p<0,001$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon mostrou existirem diferenças significativas entre todos os pares de interfaces: *Joystick* e GUD-WIP ( $p<0,001$ ), SAS-WIP e *Joystick* ( $p=0,010$ ), e SAS-WIP e GUD-WIP ( $p=0,023$ ).

Estes resultados sugerem que, relativamente à tarefa de paragem antes dos alvos, o *Joystick* é a interface que oferece maior eficácia, seguida pela SAS-WIP, e finalmente pela GUD-WIP.

Relativamente às médias das frequências das ultrapassagens dos alvos, para cada um dos nove alvos, é possível observar na Tabela 10 os seus resultados. Verificam-se diferenças entre as suas médias, com destaque para o último alvo (“A9”) que apresenta a maior diferença relativamente aos outros alvos. É de referir também que os alvos relativos a caminhos com distâncias longas e médias apresentam, em média, uma menor frequência de ultrapassagens do que a dos caminhos mais curtos. O teste não-paramétrico de Friedman revela um efeito da distância percorrida, sobre a frequência das ultrapassagens efetuadas ( $\chi^2_8=17,91$ ,  $p<0,022$ ).

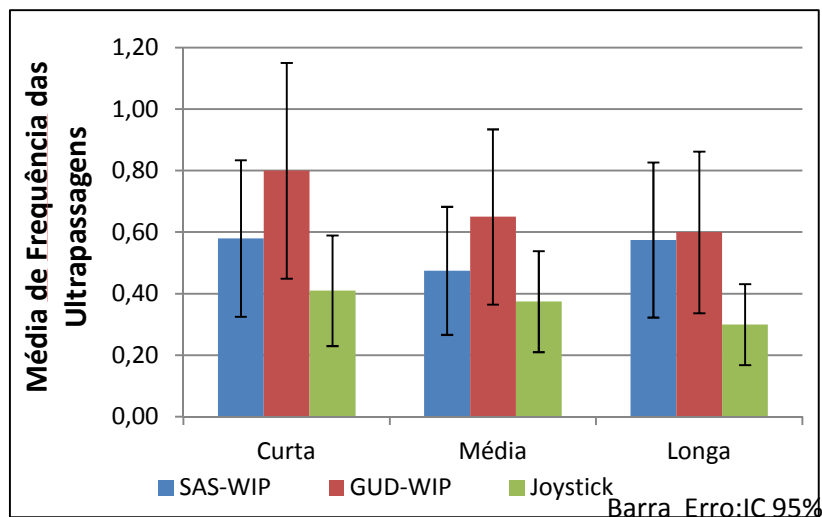
Alvo	Distância (m)	Classe de Distância	Média	Desvio Padrão
A1	6,0	Média	0,53	0,35
A2	1,0	Curta	0,55	0,33
A3	12,0	Média	0,47	0,35
A4	0,5	Curta	0,58	0,34
A5	24,0	Longa	0,45	0,31
A6	1,5	Curta	0,57	0,29
A7	3,0	Curta	0,58	0,32
A8	48,0	Longa	0,50	0,28
A9	2,0	Curta	0,72	0,29

**Tabela 10: Média e desvio padrão da frequência das ultrapassagens por alvo**

Para tentar perceber quais são as diferenças entre as médias das frequências de ultrapassagens dos alvos, foi aplicado o teste *post-hoc* Wilcoxon, que revelou diferenças estatisticamente significativas entre os alvos A9 e A3 ( $p<0,018$ ), A9 e A5 ( $p<0,001$ ), e A9 e A8 ( $p<0,036$ ). Não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos outros pares de alvos. O valor apresentado para o caminho do alvo A9 é o que apresenta maior distância na paragem ao alvo, em contraste com os caminhos dos alvos A3, A5 e A8, correspondentes a distâncias longas, e que são os que apresentam a menor distância na paragem ao alvo. Isto pode dever-se ao facto de o caminho do alvo A9 ser o último a ser percorrido, logo após o caminho de maior comprimento, o que pode ter induzido cansaço e desconcentração nos participantes.

### **Análise para as três classes de distâncias agrupadas**

Para conhecer o efeito das interfaces sobre as frequências das ultrapassagens aos alvos, quando agrupadas pelas três classes de distâncias (curtas, médias e longas), foram analisados os dados resultantes do desenho seguinte: 3 interfaces x 3 classes de distância. Na Figura 29, é possível visualizar graficamente as médias das frequências de ultrapassagem, de cada interface, por cada classe de distância. Verifica-se que a interface *joystick* apresenta, em média, uma menor frequência de ultrapassagens, nas três classes de distâncias. A interface SAS-WIP regista, em média, uma menor frequência de ultrapassagens do que a GUD-WIP, nas três classes de distâncias.



**Figura 29: Média da frequência das ultrapassagens por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança (alfa<0,05)**

Relativamente às frequências de ultrapassagem para as três classes de distâncias ( $\mu_{curtas}=0,60$ ,  $\mu_{médias}=0,50$ ,  $\mu_{longas}=0,49$ ), não foram reveladas diferenças estatisticamente significativas relativamente às distâncias percorridas ( $\chi^2_2=5,147$ ,  $p=0,076$ ).

Sobre as amostras das **distâncias curtas**, o teste não-paramétrico Friedman revelou existir um efeito muito significativo das interfaces utilizadas, sobre as frequências das ultrapassagens dos alvos ( $\chi^2_2=17.690$ ,  $p<0,001$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon identifica diferenças estatisticamente significativas entre a interface GUD-WIP e o *Joystick* ( $p<0,001$ ), entre este último e a interface SAS-WIP ( $p<0,033$ ), e entre as duas interfaces de locomoção física ( $p<0,004$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias curtas**, relativamente às ultrapassagens de alvos, o *joystick* é a interface que oferece maior eficácia, seguida pela SAS-WIP. A interface GUD-WIP é das três aquela que oferece menor eficácia na tarefa de paragem antes dos alvos.

Relativamente às **distâncias médias**, o teste não-paramétrico de Friedman revela que há um efeito principal das interfaces sobre as frequências de ultrapassagens dos alvos ( $\chi^2_2=9,950$ ,  $p=0,007$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon demonstrou a existência de diferenças estatisticamente significativas entre o *Joystick* e a GUD-WIP ( $p=0,013$ ). Não foram exibidas diferenças estatísticas entre a GUD-WIP e a SAS-WIP ( $p=0,080$ ), e entre esta última interface e o *joystick* ( $p=0,248$ ). Conclui-se que na tarefa de paragem antes dos alvos, em caminhos de distâncias médias, a eficácia oferecida pelas duas interfaces CNL é semelhante, mas o *Joystick* supera nesse critério de desempenho a interface GUD-WIP.

Relativamente às **distâncias longas**, o teste não-paramétrico de Friedman mostra a existência de um efeito estatístico das interfaces sobre as ultrapassagens dos alvos ( $\chi^2_2=10,033$ ,  $p=0.007$ ). A aplicação do teste *post-hoc* Wilcoxon mostra a existência de diferenças estatísticas entre a interface GUD-WIP ( $p=0,011$ ) e o *Joystick*, e entre este e a SAS-WIP ( $p=0,021$ ). Entre as duas interfaces CNL não se verificam diferenças estatísticas nas ultrapassagens dos alvos ( $p=0,856$ ). Estes resultados permitem inferir que, após distâncias longas, as duas interfaces CNL oferecem uma eficácia semelhante nas frequências das ultrapassagens dos alvos. No entanto, o *Joystick* supera as duas interfaces CNL neste critério de desempenho.

## Conclusões

Relativamente às nove distâncias originais, revelou-se existir diferenças entre as três interfaces, sobre a frequência de ultrapassagens dos alvos. Neste caso, o *Joystick* é a interface que oferece maior eficácia (menor frequência de ultrapassagens) de todas as interfaces, seguida da interface SAS-WIP, e finalmente pela GUD-WIP.

Os resultados obtidos mostram existir diferenças entre as nove distâncias na frequência de ultrapassagens dos alvos. Essas diferenças ocorreram entre os caminhos de maior comprimento (menor frequência de ultrapassagens), e os de menor distância percorrida. Isto sugere que durante distâncias maiores é mais fácil prever a posição da paragem, do que nas distâncias curtas.

Na Tabela 11 é possível visualizar a comparação entre as interfaces para cada uma das três classes de distâncias.

Interface/ Distância	Todas	Curtas	Médias	Longas
<b>Joystick</b>	> SAS-WIP	> SAS-WIP	~ SAS-WIP	> SAS-WIP
	> GUD-WIP	> GUD-WIP	> GUD-WIP	> GUD-WIP
<b>SAS-WIP</b>	> GUD-WIP	> GUD-WIP	~ GUD-WIP	~ GUD-WIP

**Tabela 11: Comparação da eficácia disponibilizada pelas interfaces ("~"- Semelhante a, ">"-Superior a, "<" - Inferior a)**

Na análise do efeito das interfaces, nas **distâncias curtas**, concluiu-se que o *Joystick* supera a eficácia fornecida pelas duas interfaces CNL, mas que a interface SAS-WIP supera a disponibilizada pela interface GUD-WIP. Nas **distâncias maiores (médias e longas)**, o *Joystick* supera as interfaces CNL, nesse critério de desempenho (com

excepção nas distâncias médias para a interface SAS-WIP). Nestas distâncias não existem diferenças na eficácia oferecida pelas duas interfaces CNL. Este facto talvez se justifique porque, quando as distâncias percorridas são mais longas, há mais tempo e mais espaço para prever a paragem, daí que as interfaces CNL ofereçam um nível de eficácia muito semelhante entre si.

Concluindo, o *Joystick* revela-se globalmente a interface mais eficaz em tarefas de paragem o mais próximo possível antes do alvo, para qualquer distância percorrida. Isto pode dever-se ao facto de os participantes já terem globalmente uma experiência no uso desta interface, nestas tarefas, e, por outro lado, ao facto de o controlo motor exercido pelas mãos e pelos dedos ser mais preciso do que com os pés. Relativamente às duas interfaces CNL, os resultados sugerem que a interface SAS-WIP disponibiliza maior eficácia aos participantes, do que a GUD-WIP, somente nas distâncias curtas. São estas as distâncias que mais põem à prova a precisão de controlo que uma interface disponibiliza para, num espaço curto, prever a posição de paragem. Os resultados sugerem que os participantes estabelecem uma relação mais consistente entre as métricas da interface SAS-WIP e a velocidade virtual, do que entre as métricas da GUD-WIP e a mesma velocidade, em tarefas de precisão de paragem da posição.

### **6.1.2 Precisão na distância final aos alvos**

Durante a tarefa de paragem do deslocamento virtual antes dos alvos, foi registada a distância entre a posição de paragem e a posição do respetivo alvo, para o caso de eles não terem sido ultrapassados. O valor dessa distância determina o nível de precisão que uma dada interface disponibiliza na tarefa de aproximação aos alvos, e que constitui um dos critérios de desempenho usados neste estudo. Nesta experiência, definiu-se que, quanto menor for a distância final ao alvo, maior é a sua precisão. Estes valores foram processados para a análise estatística, a partir das amostras de dados da métrica “**Distância Final ao Alvo**”.

#### **Análise para as nove distâncias percorridas**

Nesta análise dos dados, tentou-se perceber qual é o efeito que as interfaces e as diferentes distâncias percorridas têm na distância final ao alvo, registados na tarefa de percorrer os nove caminhos.



A análise descritiva da **distância final ao alvo**, registrada por cada interface, mostra-se na Tabela 12, a qual revela que o *Joystick* apresenta, em média, uma distância menor ao alvo ( $\mu=0,056$ ), seguido pela SAS-WIP ( $\mu=0,073$ ), e finalmente pelo GUD-WIP ( $\mu=0,132$ ). Foi aplicado o teste não-paramétrico de Friedman, que revela a existência de um efeito das interfaces, relativamente à distância final ao alvo ( $\chi^2_2=8,538$ ,  $p=0,014$ ).

Interface	Média (m)	Desvio Padrão (m)
SAS_WIP	0,073	0,071
GUD-WIP	0,132	0,129
Joystick	0,056	0,032

**Tabela 12: Média e desvio padrão da distância final ao alvo por interface**

O teste *post-hoc* Wilcoxon demonstrou a existência de diferenças estaticamente significativas entre o *Joystick* e a interface GUD-WIP ( $p=0,002$ ), e entre esta e a SAS-WIP ( $p=0,006$ ). Os testes mostram que **não há diferenças estatisticamente significativas entre o Joystick e a SAS-WIP** ( $p=0,408$ ). Isto revela que, para os nove alvos, o *Joystick* e a interface SAS-WIP asseguram ao participante um grau de precisão semelhante, no caso dos alvos não terem sido ultrapassados, que por sua vez é superior ao disponibilizado pela interface GUD-WIP.

Na Tabela 13 é possível observar a média e o desvio padrão das distâncias finais ao alvo, em cada uma das nove distâncias percorridas. Existem algumas diferenças nas suas médias, com destaque para as referentes aos alvos A3 e A8.

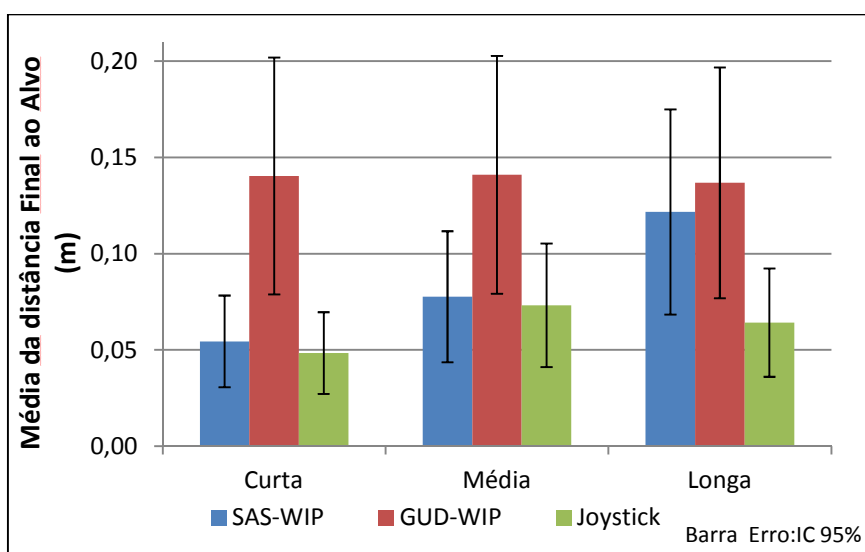
Alvo	Distância (m)	Classe de Distância	Média (m)	Desvio Padrão (m)
A1	6,0	Média	0,075	0,053
A2	1,0	Curta	0,055	0,020
A3	12,0	Média	0,105	0,072
A4	0,5	Curta	0,057	0,021
A5	24,0	Longa	0,089	0,054
A6	1,5	Curta	0,066	0,029
A7	3,0	Curta	0,084	0,032
A8	48,0	Longa	0,121	0,125
A9	2,0	Curta	0,056	0,013

**Tabela 13: Média e desvio padrão da distância final aos alvos por distância percorrida**

A aplicação do teste não-paramétrico de Friedman revela, no entanto, que não existem diferenças estatisticamente significativas entre as distâncias percorridas, relativamente à respetiva distância final ao alvo ( $\chi^2_8=6,115$ ,  $p=0,634$ ).

### Análise para as três classes de distâncias agrupadas

Para conhecer o efeito das interfaces sobre a distância final ao alvo, para as três classes de distâncias (curtas, médias e longas), foram analisados os dados resultantes do desenho seguinte: 3 interfaces x 3 classes de distância. Na Figura 30, é possível visualizar graficamente as médias da distância final ao alvo, de cada interface, por cada classe de distância. Verifica-se que a interface GUD-WIP apresenta, em média, um valor de distância final ao alvo superior ao das outras duas interfaces, em contraste com o *Joystick*, que apresenta o menor valor médio, para as três classes de distâncias.



**Figura 30: Média da distância final ao alvo por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ )**

Relativamente à distância final ao alvo para as três classes de distâncias ( $\mu_{curtas} = 0,05m$ ,  $\mu_{médias} = 0,07m$ ,  $\mu_{longas} = 0,10m$ ), não foram reveladas diferenças estatísticas entre as classes de distâncias ( $\chi^2_2 = 0,000$ ,  $p = 1,000$ ), o que sugere que o nível de precisão na tarefa depende da interface utilizada.

Para as amostras das **distâncias curtas**, aplicou-se o teste não-paramétrico Friedman mostra que há um efeito das interfaces sobre a distância final ao alvo ( $\chi^2_2 = 9,237$ ,  $p = 0,010$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon revelou a existência de diferenças estatisticamente muito significativas entre o *Joystick* e a interface GUD-WIP ( $p = 0,001$ ), e entre esta última e a interface SAS-WIP ( $p = 0,002$ ). Não se verificaram diferenças estatísticas entre o *Joystick* e o SAS-WIP ( $p = 0,368$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias curtas**, o *Joystick* e a interface SAS-WIP oferecem um grau de precisão muito semelhante, e que é superior ao disponibilizado pela interface GUD-WIP.

Para as amostras das **distâncias médias**, o teste não-paramétrico Friedman indica que há um efeito das interfaces sobre esta classe de distâncias ( $\chi^2_2=9.300$ ,  $p=0.010$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon mostra a existência de diferenças estatísticas entre o *Joystick* e a interface GUD-WIP ( $p=0,017$ ), e entre esta última e a interface SAS-WIP ( $p=0,015$ ). Não se verificaram diferenças estatisticamente significativas entre o *Joystick* e o SAS-WIP ( $p=0.737$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias médias**, e relativamente à distância final ao alvo, o *joystick* e a interface SAS-WIP oferecem um grau de precisão muito semelhante, e que é superior ao disponibilizado pela interface GUD-WIP.

Para as amostras das **distâncias longas** foi aplicado o teste não-paramétrico Friedman que revela que há um efeito das interfaces sobre esta classe de distâncias ( $\chi^2_2=12,961$ ,  $p=0,002$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon permite encontrar diferenças estatisticamente significativas entre a interface GUD-WIP e o *Joystick* ( $p=0,005$ ), e entre este último e a interface SAS-WIP ( $p=0,004$ ). Não são reveladas diferenças estatísticas entre as interfaces GUD-WIP e SAS-WIP ( $p=0,466$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias longas**, e relativamente à distância final ao alvo, o *Joystick* oferece um grau de precisão superior ao das duas interfaces CNL, e que estas disponibilizam um nível de precisão semelhante.

## Conclusões

Os resultados da análise estatística entre as interfaces, para as nove distâncias percorridas, sugerem que o *Joystick* e a interface SAS-WIP oferecem uma precisão semelhante entre si, e que a mesma é superior à disponibilizada pela interface GUD-WIP. Verificou-se também que as nove distâncias aos alvos não provocam nenhum efeito na distância final ao alvo.

Na Tabela 14, é possível visualizar a comparação do desempenho oferecido pelas interfaces para cada uma das três classes de distâncias.

Interface/ Distância	Todas	Curtas	Médias	Longas
<b>Joystick</b>	~ SAS-WIP > GUD-WIP	~ SAS-WIP > GUD-WIP	~ SAS-WIP > GUD-WIP	> SAS-WIP > GUD-WIP
<b>SAS-WIP</b>	> GUD-WIP	> GUD-WIP	> GUD-WIP	~ GUD-WIP

**Tabela 14: Comparação da precisão disponibilizada pelas interfaces para diferentes distâncias (“~”- Semelhante, “>”-Superior a, “<” - Inferior a)**

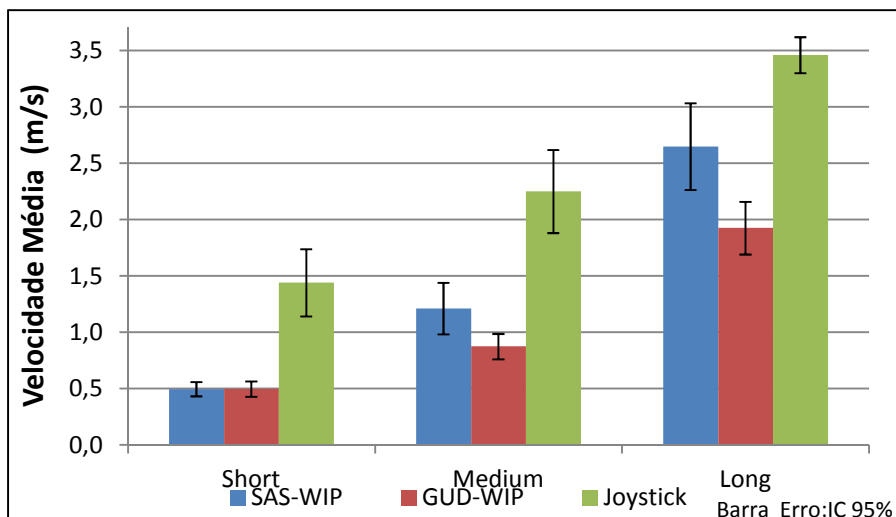
Nas **distâncias curtas e médias**, é possível verificar que a interface SAS-WIP oferece um nível de precisão semelhante ao do *Joystick*. Isto sugere que, quando o participante não ultrapassa o alvo, as duas interfaces asseguram-lhe um posicionamento antes do alvo, semelhante entre si, e superior ao disponibilizado pela interface GUD-WIP. Este resultado é encorajador, porque estão em comparação interfaces que usam partes do corpo com graus de controlo motor diferente, como foi referido no caso da análise da eficácia das interfaces. Somente para as **distâncias longas**, a precisão do *Joystick* é superior à das duas interfaces CNL. Esta última conclusão é consistente com a descoberta relativamente ao estudo das frequências de ultrapassagens dos alvos.

### 6.1.3 Rapidez no deslocamento dos caminhos

Durante a tarefa do deslocamento virtual, foram registados os tempos gastos e as distâncias percorridas, em cada caminho, entre dois alvos consecutivos, desde a posição de arranque, até à posição de paragem. Isto permitiu calcular a velocidade média usada em cada caminho, pelas três diferentes interfaces. Desta forma, é possível concluir que quanto maior for a velocidade média ocorrida, maior é a rapidez disponibilizada pela interface. Nesta análise estatística, usamos a métrica “**Velocidade Média**”, como a medida da rapidez que a interface oferece aos participantes. É de realçar que foi pedido aos participantes que percorressem os caminhos de dimensões curtas e médias, com uma velocidade confortável, e os caminhos longos com a máxima velocidade possível.

#### Análise para as três classes de distâncias

Para conhecer o efeito das interfaces, na velocidade média de deslocamento, em três classes de distâncias diferentes, foram analisados os dados resultantes do desenho seguinte: 3 interfaces x 3 classes de distâncias (curtas, médias e longas). Na Figura 31, é possível visualizar graficamente as médias das velocidades registadas, por cada uma das interfaces, agrupadas por cada classe de distância. Verifica-se que o *Joystick* apresenta, em média, para todas as classes de distâncias, a maior velocidade média de deslocamento, em contraste com a interface GUD-WIP, que apresenta a média menor das três interfaces. No entanto, no caso das distâncias curtas, a diferença de velocidade entre as duas interfaces físicas é muito pequena.



**Figura 31: Média das velocidades médias ocorridas por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança (alfa<0,05)**

Aplicando a ANOVA-Dois Factores (interface e classe de distância), de medidas repetidas, sobre as nove amostras, verifica-se que as interfaces ( $F_{2,0,32,0} = 65,480$ ,  $p < 0,001$ ) e as classes de distâncias ( $F_{2,0,32,0} = 375,350$ ,  $p < 0,001$ ) exercem um efeito principal sobre o tempo de deslocamento. Verifica-se também a existência de interações entre os dois factores ( $F_{2,332,37,320} = 4,255$ ,  $p = 0,017$ ). Na sequência destes resultados tentou-se descobrir quais as diferenças entre as interfaces e as distâncias, relativamente à velocidade média de deslocamento.

Relativamente as três interfaces ( $\mu_{\text{SAS-WIP}} = 1,429$  m/s,  $\mu_{\text{GUD-WIP}} = 1,098$  m/s,  $\mu_{\text{Joystick}} = 2,413$  m/s), o teste *post-hoc* Bonferroni permitiu identificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre a interface SAS-WIP e a interface GUD-WIP ( $p = 0.035$ ), e de diferenças entre esta última interface e o Joystick ( $p < 0,001$ ). Também se encontrou uma diferença significativa entre o Joystick e a interface SAS-WIP ( $p < 0,001$ ). Isto revela que o Joystick é a interface que permite maior rapidez no deslocamento dos caminhos, em diferentes distâncias, seguido pela SAS-WIP, e finalmente pela GUD-WIP.

Relativamente às três classes de distâncias dos caminhos ( $\mu_{\text{curtas}} = 2,693$  m/s,  $\mu_{\text{médias}} = 7,590$  m/s e  $\mu_{\text{longas}} = 14,375$  m/s), o teste *post-hoc* Bonferroni identificou a existência de diferenças estatisticamente muito significativas ( $p < 0,001$ ) entre elas. Ou seja, em distâncias maiores, atingem-se velocidades médias superiores.

Para as **distâncias curtas**, a ANOVA-Um Factor (interface), de medidas repetidas, revela que a interface exerce um efeito principal na velocidade média de deslocamento ( $F_{1,062} = 41,984$ ,  $p < 0,001$ ). O teste *post-hoc* Bonferroni permitiu identificar a existência de diferenças estatisticamente muito significativas, entre a interface SAS-WIP e o *Joystick* ( $p < 0,001$ ), e entre este último e a interface GUD-WIP ( $p < 0,001$ ). Não se verificaram diferenças estatisticamente significativas entre a GUD-WIP e a SAS-WIP ( $p = 1,000$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias curtas**, o *Joystick* é a interface que permite o deslocamento mais rápido, seguido pelas duas interfaces CNL, que disponibilizam velocidades médias semelhantes entre si.

Relativamente às **distâncias médias**, a ANOVA-Um Factor, de medidas repetidas, revelou a existência de um efeito principal da interface, na velocidade média de deslocamento ( $F_{1,332} = 53,927$ ,  $p < 0,001$ ). O teste *post-hoc* Bonferroni permitiu identificar a existência de diferenças estatisticamente muito significativas entre a interface SAS-WIP e o *Joystick* ( $p < 0,001$ ), entre este último e a interface GUD-WIP ( $p < 0,001$ ), e entre esta interface a SAS-WIP ( $p = 0,019$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias médias**, o *Joystick* é a interface que permite uma velocidade média superior, seguido pela interface SAS-WIP, e finalmente pela GUD-WIP.

Relativamente às **distâncias longas**, a ANOVA-Um Factor (interface), de medidas repetidas, revelou a existência de um efeito principal da interface, na velocidade média de deslocamento ( $F_{1,415} = 29,026$ ,  $p < 0,001$ ). O teste *post-hoc* Bonferroni permitiu identificar a existência de diferenças estatisticamente muito significativas entre a interface SAS-WIP e o *Joystick* ( $p = 0,003$ ), entre este último e a interface GUD-WIP ( $p < 0,001$ ), e entre esta última e a interface SAS-WIP ( $p = 0,038$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias longas**, o *Joystick* continua a ser a interface que permite a velocidade média superior, seguido pela interface SAS-WIP. A interface GUD-WIP é a que disponibiliza a menor velocidade média virtual.

## Conclusões

Os resultados obtidos sugerem que o *Joystick* é a interface que permite, globalmente, para todas as distâncias, o deslocamento mais rápido das três interfaces. Por sua vez, a interface SAS-WIP supera a rapidez disponibilizada pela interface GUD-WIP, em distâncias médias e longas. Somente nas distâncias curtas, é que a interface GUD-WIP

induz uma rapidez semelhante à SAS-WIP. Verificou-se, naturalmente, que para diferentes distâncias, a rapidez de deslocamento é diferente.

Na Tabela 15, é possível visualizar a comparação entre as três interfaces, relativamente à rapidez que disponibilizam aos participantes, para as diferentes distâncias analisadas.

Interface/ Distância	Todas	Curtas	Médias	Longas
<b>Joystick</b>	> SAS-WIP	> SAS-WIP	> SAS-WIP	> SAS-WIP
	> GUD-WIP	> GUD-WIP	> GUD-WIP	> GUD-WIP
<b>SAS-WIP</b>	> GUD-WIP	~ GUD-WIP	~ GUD-WIP	> GUD-WIP

***Tabela 15: Comparação da rapidez disponibilizada pelas interfaces ("~"- Semelhante, ">"-Superior a, "<" – Inferior a)***

A rapidez é um critério muito importante nas tarefas do deslocamento em AV's, principalmente em distâncias mais longas. Nas distâncias curtas são mais importantes a eficácia e a precisão na paragem do deslocamento. No entanto, para que isso aconteça, é necessário que o sujeito consiga controlar corretamente a relação entre as ações efetuadas e a velocidade pretendida, por forma a obter o posicionamento pretendido. Os resultados anteriores sugerem que nas **distâncias curtas** o *joystick* é superior às duas interfaces CNL, e estas por sua vez asseguram velocidades semelhantes entre si. A justificação para a superioridade do joystick pode estar ligada à maior experiência dos participantes com esta interface, e com o controlo motor mais fino que as mãos e dedos podem exercer. Desta forma, é possível fazer movimentos mais precisos entre o valor máximo e mínimo da velocidade pretendida.

Nas **distâncias médias e longas**, mantém-se o padrão da superioridade do *joystick* sobre as interfaces físicas. Por sua vez, estas interfaces oferecem uma rapidez semelhante entre si, em **distâncias médias**, mas a interface SAS-WIP supera a GUD-WIP em distâncias longas. Nestas últimas distâncias foi explorada a velocidade máxima que os participantes conseguiriam obter de cada uma das interfaces. Isto sugere que a SAS-WIP assegura uma maior rapidez nas distâncias longas, que são aquelas em que os sujeitos pretendem demorar menos tempo, ou ter um menor desgaste energético na tarefa. O que se verificou durante os testes, é que a GUD-WIP pode gerar velocidades bastante elevadas, mas que é difícil para alguns sujeitos executarem movimentos físicos, que asseguram uma frequência dos passos compatível com as suas pretensões.

#### 6.1.4 Fluidez e continuidade da interação

Durante a tarefa do deslocamento virtual entre os alvos, foram registadas paragens no deslocamento, em cada um dos caminhos percorridos. Estas paragens podem ser entendidas como um erro, ou como uma estratégia de ajustamento da velocidade do deslocamento. As paragens das interfaces CNL ocorrem quando o participante pára os passos no lugar, enquanto que as paragens com o *joystick* acontecem quando o participante posiciona a vareta na posição neutra, parando o movimento virtual. O número dessas paragens fornece uma medida da fluidez e da continuidade de interação disponibilizada por cada interface. Desta forma, quanto maior for o número de paragens no deslocamento, menor será essa fluidez e continuidade. Os valores processados na análise estatística são baseados na variável dependente “**Número de paragens**” do movimento.

##### Análise para as nove distâncias originais

Nesta análise de dados, tentou-se perceber qual é o efeito que as interfaces e as diferentes distâncias percorridas têm no número de paragens do movimento, ao longo dos nove caminhos.

A análise descritiva do **número de paragens** do deslocamento nos nove caminhos, para cada interface, é mostrada na Tabela 16, e revela que a interface *Joystick* é a que apresenta, em média, o maior número de paragens ( $\mu=2,518$ ), seguida pela interface GUD-WIP ( $\mu=1,666$ ), e finalmente pela interface SAS-WIP ( $\mu=1,637$ ).

Interface	Média	Desvio Padrão
SAS_WIP	1,56	0,53
GUD-WIP	1,67	0,56
Joystick	2,46	1,31

**Tabela 16: Média e desvio padrão do número de paragens do deslocamento por interface**

A aplicação do teste Friedman mostra que as interfaces exercem um efeito estatisticamente significativo, sobre o número de paragens nos deslocamentos ( $\chi^2_2=7,091$ ,  $p=0,029$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon revela diferenças estatísticas entre a interface SAS-WIP e o *Joystick* ( $p=0,002$ ), e entre este e a GUD-WIP ( $p=0,048$ ). Não há diferenças estatisticamente significativas entre as duas interfaces CNL ( $p=0,727$ ),



Estes dados permitem concluir que o Joystick é, das três interfaces, aquela que assegura menor fluidez e continuidade de interação. Por sua vez, as duas interfaces CNL não apresentam diferenças significativas nesse critério, contudo superam a fluidez e continuidade de interação asseguradas pelo *Joystick*.

A Tabela 17 mostra as médias e os desvios padrões do número de paragens do deslocamento em cada um dos nove caminhos percorridos. Verifica-se que se registam, em média, um maior número de paragens nas distâncias médias e longas, relativamente às distâncias curtas.

<b>Caminho</b>	<b>Classe de Distancia</b>	<b>Média (m)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>C1</b>	Média	2,333	0,804
<b>C2</b>	Curta	1,625	0,717
<b>C3</b>	Média	2,225	0,862
<b>C4</b>	Curta	1,733	0,691
<b>C5</b>	Longa	2,433	1,196
<b>C6</b>	Curta	1,399	0,312
<b>C7</b>	Curta	1,709	0,571
<b>C8</b>	Longa	2,358	0,949
<b>C9</b>	Curta	1,617	0,614

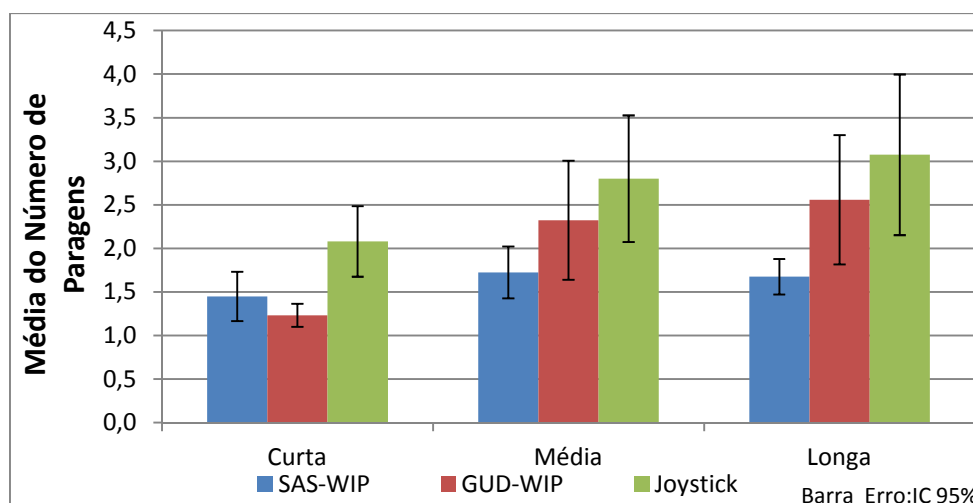
***Tabela 17: Média e desvio padrão do número de paragens nos nove caminhos de diferentes distâncias***

O teste não-paramétrico Friedman indica que há um efeito das diferentes distâncias dos caminhos sobre os valores das paragens do movimento registadas ( $\chi^2_8=48,081$ ,  $p<0,001$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon revelou a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os caminhos de distâncias curtas, e os das distâncias médias e longas. Devido ao elevado número de pares comparados, reportam-se aqui, como exemplo, os resultados do teste *post-hoc* Wilcoxon entre os caminhos C2 e C3 ( $p=0,028$ ), e os caminhos C2 e C5 ( $p=0.001$ ).

### **Análise para as três classes de distâncias agrupadas**

Para conhecer o efeito das interfaces sobre o número de paragens nos deslocamentos, para as três classes de distâncias (curtas, médias e longas), foram analisados os dados resultantes do desenho seguinte: 3 interfaces x 3 classes de distâncias. Na Figura 32, é possível visualizar graficamente as médias do número de paragens de cada interface, por cada classe de distância. Verifica-se que a interface *Joystick* apresenta, em todas as classes de distâncias, um número médio de paragens superior ao das outras duas interfaces CNL. Nas distâncias médias e longas, a interface GUD-WIP apresenta, em

média, um número de paragens superior ao da interface SAS-WIP, contrariamente ao que ocorre nas distâncias curtas.



**Figura 32: Média do número de paragens no deslocamento, por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ )**

O teste não-paramétrico Friedman revelou haver diferenças estatísticas significativas ( $\chi^2_2=18,110$ ,  $p<0,001$ ) entre as três classes de distâncias ( $\mu_{curtas}=1,60$ ,  $\mu_{médias}=2,28$ ,  $\mu_{longas}=2,42$ ) relativamente ao número de paragens do deslocamento. O teste *post-hoc* Wilcoxon revelou a existência de diferenças entre as distâncias médias e curtas ( $p<0,001$ ), e entre estas últimas e as longas ( $p<0,001$ ). Não se revelaram diferenças entre as distâncias médias e longas ( $p=0,407$ ). Estes resultados vêm reforçar os que foram obtidos relativamente ao estudo dos nove alvos originais, que apontam para o facto de as distâncias médias e longas serem aquelas em que ocorrem maior número de paragens.

Relativamente às **distâncias curtas**, o teste não-paramétrico Friedman revela um efeito das interfaces sobre o número de paragens ( $\chi^2_2=16,987$ ,  $p<0,001$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon permitiu identificar a existência de diferenças estatísticas entre a interface GUD-WIP e o *Joystick* ( $p=0,001$ ), e entre este último e a interface SAS-WIP ( $p=0,007$ ). Não se verificaram diferenças estatísticas entre a GUD-WIP e a SAS-WIP ( $p=0,295$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias curtas**, as duas interfaces CNL asseguram uma fluidez de interação semelhante entre si, e que é superior à disponibilizada pelo *Joystick*.

Nas **distâncias médias**, o teste não-paramétrico Friedman revelou não existir um efeito das interfaces, sobre o número de paragens do deslocamento ( $\chi^2_2=5,155$ ,  $p=0,076$ ).

No respeitante às **distâncias longas**, o teste não-paramétrico Friedman indica que há um efeito das interfaces sobre os valores das paragens do movimento ( $\chi^2_2=7,972$ ,  $p=0,019$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon permite identificar a existência de diferenças estatísticas entre o *Joystick* e a interface SAS-WIP ( $p=0,001$ ), e entre esta última e a interface GUD-WIP ( $p=0,021$ ). Não foram reveladas diferenças entre o *Joystick* e a interface GUD-WIP ( $p<0.433$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias longas**, a interface SAS-WIP é aquela que assegura a maior fluidez e continuidade de interação, seguida pela interface GUD-WIP. O *Joystick* é a interface que apresenta menor fluidez na interação.

## Conclusões

Na análise dos resultados do número de paragens do deslocamento, para as nove distâncias originais, verifica-se que as duas interfaces CNL asseguram uma fluidez e uma continuidade de interação muito semelhante entre si, e que é superior à disponibilizada pelo *Joystick*. Verificou-se também que as diferentes distâncias dos nove caminhos provocam um diferente número de paragens do deslocamento. Nas distâncias curtas, ocorre um menor número de paragens do que nas médias e longas, e estas, por sua vez, não diferem entre si.

Na Tabela 18, é possível visualizar a comparação entre as três interfaces, relativamente à fluidez e continuidade de interação, para as diferentes distâncias analisadas.

Interface/ Distância	Todas	Curtas	Médias	Longas
<b>Joystick</b>	< SAS-WIP	< SAS-WIP	~ SAS-WIP	< SAS-WIP
	< GUD-WIP	< GUD-WIP	~ GUD-WIP	~ GUD-WIP
<b>SAS-WIP</b>	~ GUD-WIP	~ GUD-WIP	~ GUD-WIP	> GUD-WIP

**Tabela 18: Comparação das interfaces relativamente à fluidez e continuidade de interação disponibilizada ("~"- Semelhante, ">"-Superior a, "<" - Inferior a)**

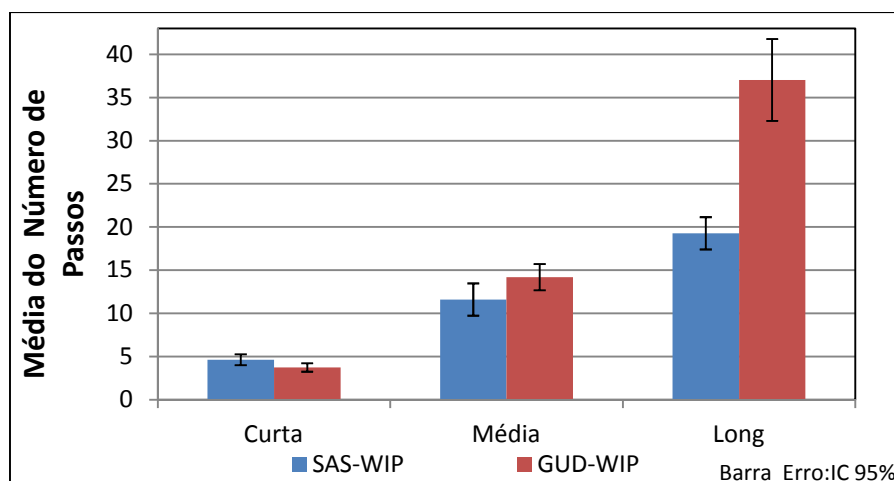
O *Joystick* é a interface que, em termos globais, disponibiliza menos fluidez e continuidade de interação aos seus participantes, independentemente das distâncias percorridas. Isto pode dever-se à maior precisão de controlo motor das mãos e dedos, e ao facto da pequena distância que a vareta percorre entre os valores máximo e mínimo, que leva os sujeitos a controlar a velocidade mais descontínua. As interfaces CNL permitem um comportamento muito semelhante aos participantes, com exceção nas distâncias longas, em que a interface SAS-WIP supera a GUD-WIP. No caso destas

interfaces, as paragens deveram-se a tentativas de reajustar o movimento, principalmente perto do local onde deveriam parar.

### 6.1.5 Eficiência das interfaces CNL

Durante a tarefa do deslocamento virtual entre alvos, foi registado o número de passos efetuados em cada um dos caminhos percorridos. Arguimos que o número de passos fornece uma medida da eficiência que uma dada interface pode disponibilizar. Assim, quanto maior for o número de passos efetuados num dado caminho, maior será o esforço, e, conseqüentemente, menor será a eficiência disponibilizada pela interface. Os valores processados nesta análise estatística baseiam-se na variável dependente “Número de Passos”.

Para conhecer o efeito das interfaces, relativamente ao número de passos durante os deslocamentos, para as três classes de distâncias (curtas, médias e longas), foram analisados os dados resultantes do desenho seguinte: 2 interfaces x 3 classes de distâncias. Na Figura 33, é possível visualizar graficamente o número médio de passos efetuados, com cada uma das duas interfaces, e por cada classe de distância. Verifica-se que a interface GUD-WIP apresenta, nas distâncias médias e longas, um maior número de passos do que a SAS-WIP, mas que nas distâncias curtas requer menos passos.



**Figura 33: Média do número de passos por interface, para cada classe de distância. As barras de erro representam o intervalo de confiança (alfa<0,05)**

Aplicando a ANOVA-Dois Factores (interface e classe de distância), de medidas repetidas, sobre as seis amostras, verifica-se um efeito significativo da interface ( $F_{1,0,14.0} = 38,522$ ,  $p < 0,001$ ) e das classes de distâncias ( $F_{2,0,28.0} = 160,112$ ,  $p < 0,001$ ) sobre o

número de passos efetuados. Também foram encontradas interações entre os dois fatores ( $F_{1,103} = 15.446$ ,  $p = 0.001$ ). Na sequência destes resultados tentou-se descobrir as diferenças entre as interfaces e as distâncias, relativamente ao número de passos efetuados.

No que concerne às interfaces ( $\mu_{\text{SAS-WIP}} = 12,213$ ,  $\mu_{\text{GUD-WIP}} = 18,322$ ), aplicou-se o teste *post-hoc* Bonferroni, que revela a existência de diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,001$ ) entre a interface SAS-WIP e a interface GUD-WIP. Isto revela que a SAS-WIP permite, em média, a realização de menos passos do que a GUD-WIP, independentemente da distância percorrida.

Relativamente ao efeito das distâncias dos caminhos ( $\mu_{\text{curtas}} = 4,120$ ,  $\mu_{\text{médias}} = 13,250$ ,  $\mu_{\text{longas}} = 28,430$ ), o teste *post-hoc* Bonferroni mostra a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as três distâncias ( $p < 0,001$ ), relativamente ao número de passos efetuados, como seria expectável.

Para as **distâncias curtas**, foi aplicado o teste-t, de amostras emparelhadas, que mostrou haver um efeito da interface no número de passos efetuados ( $t_{14} = 3,450$ ,  $p = 0,004$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias curtas**, a interface GUD-WIP ( $\mu = 3,73$ ) é mais eficiente do que a interface SAS-WIP ( $\mu = 4,50$ ), em virtude de possibilitar, em média, um menor número de passos.

Relativamente às **distâncias médias**, foi aplicado o teste-t, de amostras emparelhadas, e os resultados revelam que há um efeito da interface no número de passos efetuados ( $t_{14} = -2,419$ ,  $p = 0.030$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias médias**, a interface SAS-WIP ( $\mu = 14,20$ ) requer a realização de mais passos do que a interface GUD-WIP ( $\mu = 12,30$ ).

No que concerne as **distâncias longas**, o teste-t, de amostras emparelhadas, revelou que há um efeito da interface no número de passos efetuados ( $t_{14} = -6,095$ ,  $p < 0,001$ ). Isto permite concluir que, para as **distâncias longas**, a interface SAS-WIP ( $\mu = 19,83$ ) também requer a realização de um menor número de passos do que a interface GUD-WIP ( $\mu = 37,03$ ).

## Conclusões

A análise dos resultados sugere que para as médias e longas distâncias, a interface SAS-WIP disponibiliza aos participantes uma maior eficiência de utilização do que a GUD-WIP. Como é expectável, verificou-se também que as diferentes classes de distâncias percorridas implicam um diferente número de passos efetuados.

Na Tabela 19, é possível visualizar a comparação entre as duas interfaces, relativamente à sua eficiência, para as diferentes distâncias analisadas.

Interface/ Distância	Todas	Curtas	Médias	Longas
SAS-WIP	> GUD-WIP	< GUD-WIP	> GUD-WIP	> GUD-WIP

*Tabela 19: Comparação das interfaces CNL relativamente à eficiência disponibilizada (">"-Superior a, "<" - Inferior a)*

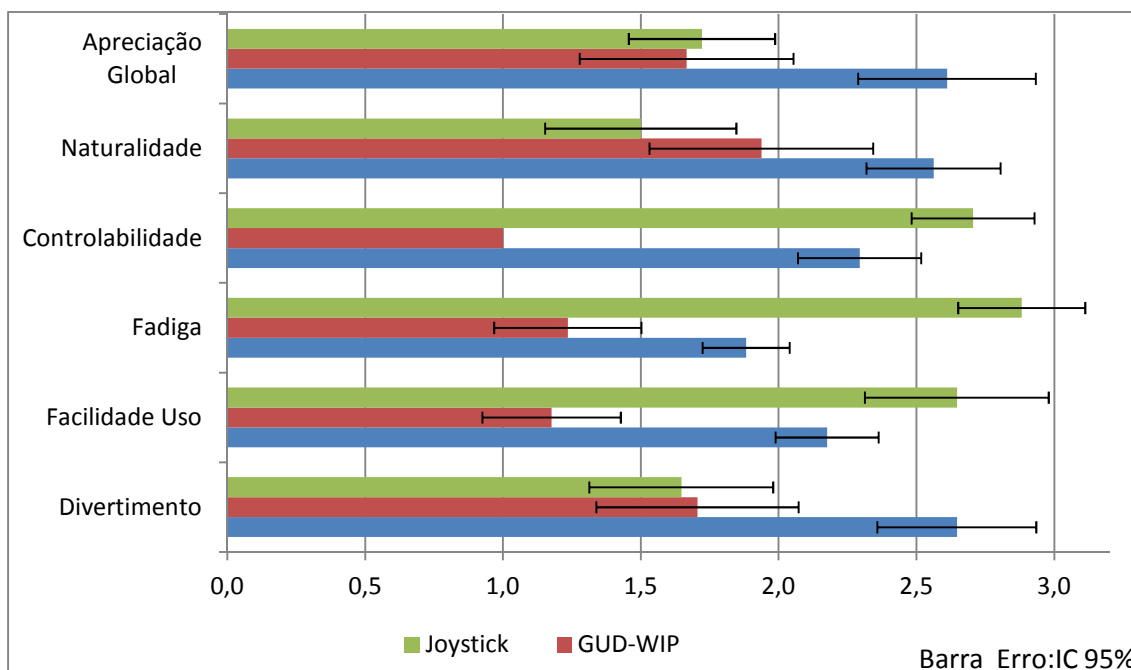
Nas **distâncias curtas**, a interface GUD-WIP permite a realização de menos passos do que a SAS-WIP. A linguagem gestual da primeira interface ilustra bem estes resultados. Quando se pretende andar mais devagar, os passos devem demorar mais tempo, logo os pés elevam-se mais, resultando numa menor ocorrência de passos. Já na interface SAS-WIP, os pés elevam-se menos, mesmo que com velocidades baixas, provocando uma maior ocorrência de passos.

A eficiência é um critério de desempenho muito importante para longas distâncias, em que o esforço alocado e o desgaste energético é superior. Os resultados deste estudo sugerem que há um padrão comum nas interfaces relativamente às **distâncias médias e longas**: a interface SAS-WIP requer, em média, a realização de menos passos do que a GUD-WIP, assegurando assim menos esforço, e logo uma maior eficiência de utilização.

### 6.1.6 Avaliação subjetiva baseada em questionário

Após o término das sessões de testes com as três interfaces, solicitou-se a cada participante o preenchimento de um questionário pós-teste, no qual ele ordenou as três interfaces (SAS-WIP, GUD-WIP e *Joystick*), segundo as suas preferências relativamente a seis critérios subjetivos: (a) Divertimento, (b) Facilidade de Uso, (c) Fadiga, (d) Controlabilidade, (e) Naturalidade e (f) Apreciação Global.

Para ordenar as três interfaces, relativamente a cada critério, os participantes classificaram cada uma delas, numa escala de três valores: de 1 (menor preferência) a 3 (maior preferência), sem repetições. A Figura 34 mostra os resultados obtidos, para cada uma das interfaces, relativos a cada critério de apreciação. Relativamente ao critério “Fadiga”, o valor 3 significa que a interface disponibiliza a menor fadiga de todas.



**Figura 34: Resultados médios da apreciação subjetiva dos critérios seguintes: Divertimento, Facilidade de Uso, Fadiga, Controlabilidade, Naturalidade e Apreciação Global**

A aplicação do teste Friedman permitiu descobrir que existem efeitos estatisticamente significativos na apreciação dos participantes relativamente às três interfaces, sobre os critérios seguintes: Divertimento ( $\chi^2_2=10,706$ ,  $p=0,005$ ), Facilidade de Uso ( $\chi^2_2=19,176$ ,  $p<0,001$ ), Fadiga ( $\chi^2_2=28,353$ ,  $p<0,001$ ), Controlabilidade ( $\chi^2_2=26,941$ ,  $p<0,001$ ), Naturalidade ( $\chi^2_2=9,125$ ,  $p=0,010$ ), e Apreciação Global ( $\chi^2_2=10,111$ ,  $p=0,006$ ).

Foi aplicado o teste *post-hoc* Wilcoxon para verificar as diferenças entre as interfaces relativamente aos seis critérios. Para o critério **Divertimento**, somente entre o Joystick e a interface GUD\_WIP, não existem diferenças estatisticamente significativas ( $p=0,861$ ). O mesmo aconteceu relativamente à **Facilidade de Uso**, em que somente não existem diferenças estatisticamente significativas entre o Joystick e a interface SAS\_WIP, ( $p=0,074$ ). No que concerne os critérios **Fadiga e Controlabilidade**, foram encontradas diferenças estatisticamente significativas, entre todos os três pares de interfaces. Relativamente ao critério **Naturalidade**, foi encontrada somente uma diferença

significativamente estatística, entre o *Joystick* e a SAS-WIP ( $p=0,003$ ). Já relativamente ao critério **Apreciação Global**, somente entre o *Joystick* e a interface GUD\_WIP, não existem diferenças estatisticamente significativas ( $p=0,870$ ).

Concluindo, os resultados do questionário mostram que a interface SAS-WIP foi a mais apreciada das três, relativamente aos critérios Divertimento e Apreciação Global. O *Joystick* foi percebido como a interface que causa menos fadiga aos participantes. As interfaces SAS-WIP e *Joystick* foram apreciadas de forma semelhante relativamente aos critérios Facilidade de Uso e Precisão, e de forma superior à interface GUD-WIP. Já relativamente ao critério Naturalidade, os participantes manifestaram uma preferência muito semelhante face às duas interfaces físicas, e que é favorável sobre o *Joystick*. Este último indicador está alinhado com estudos prévios (Usoh et al., 1999) focados na imersão em AV's, no qual os participantes classificam a interface CNL e CR como mais naturais do que o joystick.

Os resultados sugerem que, em termos globais, os participantes escolheriam a interface SAS-WIP para realizar estas tarefas de controlo de velocidade, em detrimento das outras duas interfaces. No entanto, verifica-se que os participantes percebem um melhor controlo da sua posição virtual com o uso do joystick, para além de lhes induzir menos fadiga.

## 6.2 Controlo da Direção Virtual

A experiência foi desenhada para avaliar comparativamente as interfaces de controlo de direção seguintes: abordagens IVAC e IVAV, e o *Joystick* do dispositivo WiiMote Nunchuk (Nintendo, 2012). A tarefa proposta foi a realização de um *slalom*, no qual os participantes têm que passar através de sete pórticos. Estes encontram-se em diferentes posições do AV, originando caminhos com diferentes direções entre pórticos consecutivos. A sequência de passagem pelos pórticos é fixa.

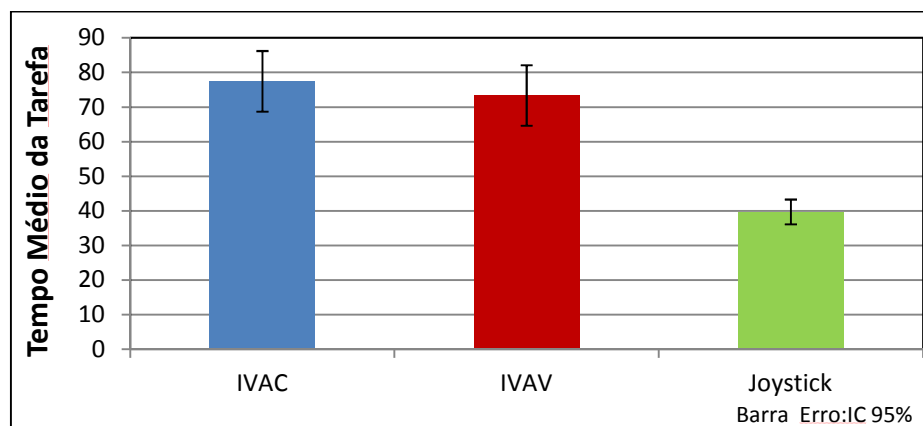
As métricas objetivas utilizadas para medir o desempenho dos participantes foram as quatro seguintes: (i) Tempo da Tarefa, (ii) Percentagem de Alvos Transpostos, (iii) Percentagem de Tempo das Viragens de Direção e (iv) Número de Viragens de Direção. As preferências subjetivas dos utilizadores foram obtidas através da aplicação de um questionário, baseadas em seis critérios: (i) Divertimento, (ii) Facilidade de Uso, (iii)



Fadiga, (iv) Controlabilidade, (v) Naturalidade e (vi) Apreciação Global. Nas próximas secções serão descritos os resultados obtidos, a sua análise estatística e a respetiva interpretação.

### 6.2.1 Tempo da Tarefa

O tempo é uma métrica importante na realização de uma dada tarefa, porque pode indicar o esforço despendido para a realizar, como pode ser um indicador de erros cometidos na sua realização. O sistema de registos dos dados de interação da experiência permitiu determinar o momento inicial em que o utilizador iniciou cada sessão, e o momento final em que ele ultrapassa o último dos seis alvos. Isto permitiu obter os dados da métrica **“Tempo da Tarefa”** para todos os participantes e para cada uma das três interfaces utilizadas. A análise estatística efetuada, e que a seguir se descreve, tentou perceber qual é o efeito das três interfaces sobre o tempo de realização da tarefa. A análise descritiva do tempo da tarefa, para cada interface, revela que o *Joystick* apresenta em média o tempo de tarefa menor ( $\mu=8,20s$ ), seguida pela interface IVAV ( $\mu=73,36s$ ), e finalmente pela interface IVAC ( $\mu=70,45s$ ), conforme pode ser visualizado na Figura 35.



*Figura 35: Tempo médio de realização da tarefa por cada interface. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ )*

Como nem todas as amostras das três interfaces apresentaram uma distribuição normal, foi aplicado o teste não paramétrico Friedman para perceber qual é a diferença entre elas. A aplicação do teste revela a existência de um efeito significativo das interfaces sobre o tempo de realização da tarefa ( $\chi^2_2=30,100$ ,  $p<0,001$ ). O teste post-hoc Wilcoxon revela a existência de diferenças significativas entre o *Joystick* e a interface IVAC

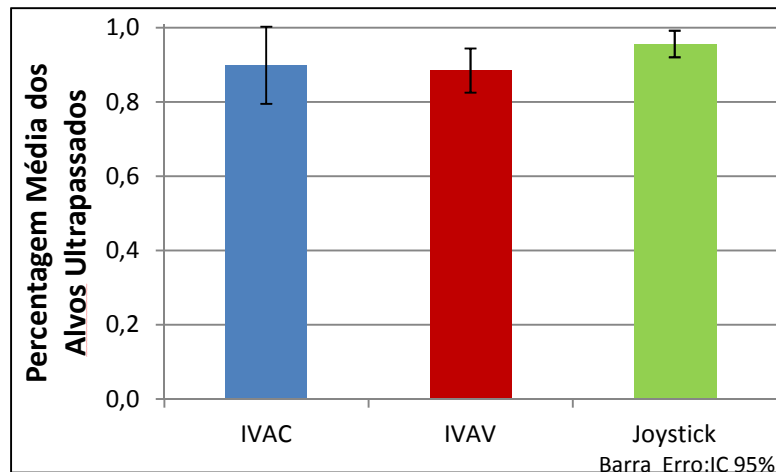
( $p < 0,001$ ), e a IVAV ( $p < 0,001$ ), respetivamente. Por outro lado, não foram reveladas diferenças entre as duas abordagens físicas ( $p = 0,737$ ) de controlo de direção, relativamente ao tempo de realização da tarefa.

Dos resultados anteriores, pode-se concluir que o *Joystick* é a interface que disponibiliza maior rapidez na realização da tarefa aos participantes, e que não existem diferenças significativas no tempo médio dispendido, usando as duas interfaces físicas. Isto sugere que estas duas abordagens não provocam nos participantes grandes diferenças na forma como controlam a sua direção, num cenário que requer o deslocamento em caminhos não-lineares com diferentes trajetórias.

### 6.2.2 Percentagem de Alvos Transpostos

O *slalom* proposto aos participantes tem como principal objetivo que os participantes passem nos pórticos, sobre as suas respetivas bases, posicionadas no chão do cenário 3D. Nesta tarefa, considera-se um erro, quando o participante passa fora dos limites da arcada. Nesse sentido, foi medido o número de alvos corretamente transpostos pelos participantes, por cada interface, a partir dos dados das posições virtuais registadas nos ficheiros gerados nos testes. Assim, foi definida a métrica “**percentagem de alvos transpostos**”, que representa a proporção entre os alvos ultrapassados e o número total de alvos do ambiente virtual. Esta medida determina o grau de eficácia proporcionada aos participantes pelas interfaces.

Pela análise estatística efetuada, e que a seguir se descreve, tentou-se perceber qual é o efeito das três interfaces sobre a percentagem de alvos transpostos. A análise descritiva dessa variável, para cada interface, revela que o Joystick apresenta, em média, a maior percentagem de alvos transpostos ( $\mu = 0,96$ ), seguido pela IVAC ( $\mu = 0,90$ ), e finalmente pela IVAC ( $\mu = 0,89$ ), conforme pode ser visualizado na Figura 36.



*Figura 36: Percentagem média dos alvos ultrapassados. As barras de erro representam o intervalo de confiança (alfa<0,05)*

Como nem todas as amostras das três interfaces apresentaram uma distribuição normal, então aplicou-se o teste não paramétrico Friedman para perceber a diferença entre elas. A aplicação do teste mostra que não existem diferenças significativas ( $\chi^2_2=3,191$ ,  $p=0,203$ ). Isto sugere que as abordagens físicas asseguram aos utilizadores a mesma eficácia que o *Joystick*, em tarefas de transposição de alvos e que requeira a alteração da direção do deslocamento dos respetivos caminhos.

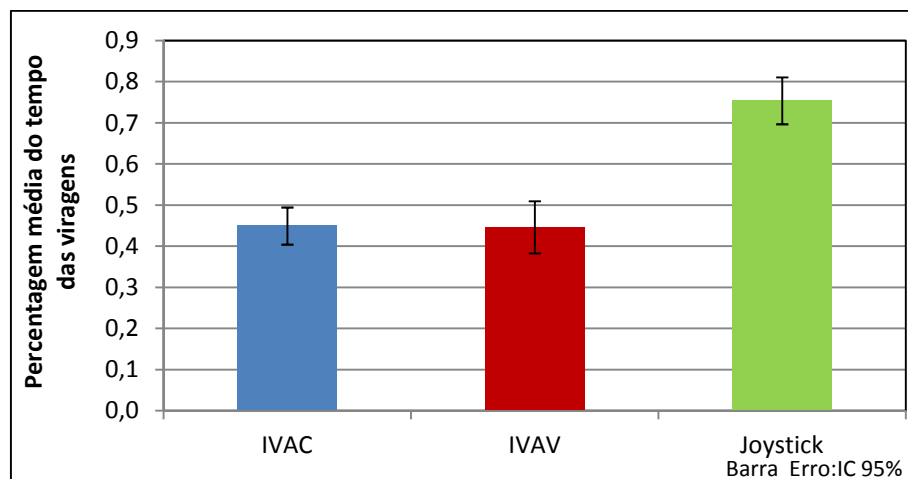
Os resultados sugerem que as abordagens físicas asseguram uma eficácia semelhante à disponibilizada pelo joystick, para esta tarefa e no contexto deste AV. Este resultado mostra que as abordagens propostas têm potencial para a tarefa de controlo de direção.

### 6.2.3 Percentagem de Tempo das Viragens de Direção

Para alterar a direção do deslocamento, o utilizador pode escolher diferentes estratégias. Para tal, ele pode efetuar viragens mais ou menos amplas da direção, acompanhadas dos respetivos ajustes. As interfaces físicas requerem a rotação dos pés para alterar a direção do vetor do deslocamento virtual. O *Joystick* também requer o desvio horizontal da sua vareta para orientar os deslocamentos não lineares. Tentou-se perceber se estas interfaces motivam diferentes comportamentos de controlo de direção nos participantes. Para obter esses dados foi identificada a métrica “**percentagem de tempo das viragens de direção**”, que permite medir a proporção entre o tempo despendido em operações de controlo da direção e o tempo total da tarefa.

Durante os testes foram registados os dados de interação, que permitiram determinar quando é que o utilizador está a deslocar-se de forma linear ou não linear. Este último caso ocorre nas duas abordagens físicas, quando os participantes estão a rodar os pés fora da zona neutra. E ocorre com o *Joystick*, quando a sua vareta efetua algum deslocamento horizontal.

Pela análise estatística efetuada, que a seguir se descreve, tentou-se perceber qual é o efeito das três interfaces sobre a percentagem de tempo das viragens de direção. A análise descritiva dessa variável, para cada interface, mostra que o *Joystick* apresenta, em média, a maior percentagem de tempo das viragens ( $\mu=0,75$ ), seguido pelas interfaces IVAV ( $\mu=0,45$ ) e IVAC ( $\mu=0,45$ ), que apresentam os mesmos valores, conforme pode ser visualizado na Figura 37.



**Figura 37: Percentagem média do tempo das viragens de direção por cada interface. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ )**

Como nem todas as amostras das três interfaces apresentaram uma distribuição normal, então foi aplicado o teste não paramétrico Friedman, para se perceber a diferença entre elas. A aplicação do teste revela a existência de um efeito significativo das interfaces, sobre a percentagem média do tempo de rotação dos pés ( $\chi^2=24,400$ ,  $p < 0,001$ ). O teste post-hoc Wilcoxon revela a existência de diferenças significativas entre o Joystick e a interface IVAC ( $p < 0,001$ ) e a IVAV ( $p < 0,001$ ), respetivamente. Por outro lado, não foram reveladas diferenças entre as duas abordagens físicas ( $p=0,911$ ), relativamente a essa variável dependente.

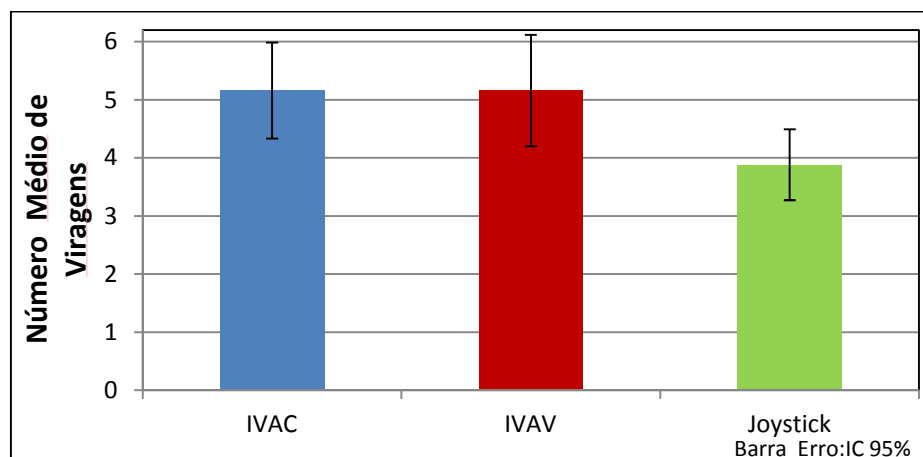
Face aos resultados anteriores, pode-se concluir que este *Joystick* que foi utilizado na experiência, é, das três interfaces, aquela que proporcionalmente apresenta mais tempo

em operações de alteração da direção virtual. Isto ocorre porque a estratégia usada para controlar o deslocamento com o *Joystick* é efetuar pequenos ajustamentos na direção do movimento. Esta operação é fácil de realizar pelos participantes, porque os dedos/mãos apresentam uma grande precisão nos seus movimentos. As duas abordagens físicas não apresentam diferenças significativas entre si, relativamente à métrica em análise. Isto sugere que as duas interfaces induzem os participantes a executarem estratégias semelhantes na alteração da direção virtual, em virtude de elas permitirem um nível de controlo dessa operação muito semelhante.

#### 6.2.4 Número de Viragens da direção

Tentámos também perceber o comportamento dos participantes, na tarefa de controlo de direção, através do número de viragens do vetor da direção virtual, que foram registados durante os testes, entre dois pórticos consecutivos, e por cada interface. Neste sentido, a métrica “**número de viragens**” permite identificar qual é o número de ocorrências em que é alterada a orientação do vetor deslocamento.

A análise descritiva da variável **número de viragens**, para cada interface, revela que o *Joystick* apresenta em média o menor número de viragens ( $\mu=3,89$ ), seguida pela interface IVAC ( $\mu=5,16$ ), e finalmente a interface IVAV ( $\mu=5,16$ ) é a que apresenta o maior número de viragens, conforme pode ser visualizado na Figura 38.



**Figura 38: Número médio de viragens por caminho percorrido. As barras de erro representam o intervalo de confiança ( $\alpha < 0,05$ )**

Como nem todas as amostras das três interfaces apresentaram uma distribuição normal, então foi aplicado o teste não paramétrico Friedman, para perceber as diferenças entre

elas. A aplicação do teste revela a existência de um efeito significativo das interfaces sobre o número de viragens na direção em cada caminho ( $\chi^2_2=9,300$ ,  $p=0,010$ ). O teste *post-hoc* Wilcoxon revela a existência de diferenças significativas entre o *Joystick* e a interface IVAC ( $p<0,014$ ) e a IVAV ( $p<0,032$ ), respetivamente. Por outro lado, não foram reveladas diferenças entre as duas abordagens físicas ( $p=0,926$ ) relativamente a esta métrica.

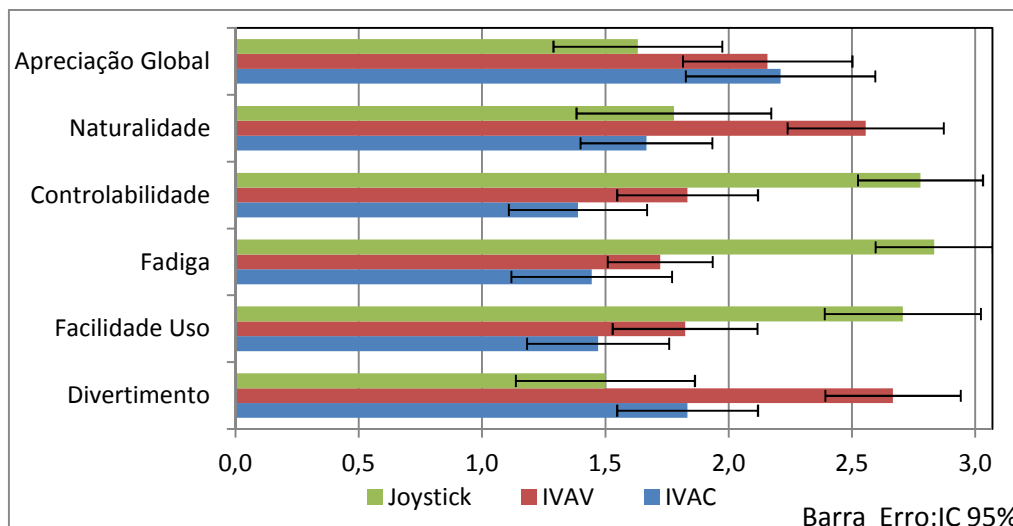
Quando a abordagem IVAV foi desenhada, colocámos a hipótese de que, pelo facto de ela disponibilizar uma gama mais ampla de valores de velocidade angular do que a IVAC, isso permitiria alterar a direção com maior rapidez. Desta forma, permitiria minimizar o tempo e o número das operações necessárias para alterar a direção do deslocamento virtual. No entanto, os resultados mostram que não existem grandes diferenças nestas métricas entre a IVAV e a IVAC. Provavelmente, para uma tarefa que requeira alterações de direção sobre a pressão do tempo, ou em caminhos com um menor comprimento entre os alvos, essa hipótese possa ser validada.

O *Joystick* usado permite um uso bastante diferente do ocorrido com as abordagens físicas. Os resultados revelam que ele induz um menor número de viragens, mas, ao mesmo tempo, disponibiliza uma maior percentagem de tempo ocorrido durante cada viragem de direção. Estes dois resultados parecem contraditórios, pois mostram que os participantes controlam com o *Joystick*, durante mais tempo o movimento não linear do que o linear, em tarefas em que é necessário tomar caminhos com mudanças de direção. Para tal, eles fazem ajustamentos contínuos da direção virtual. Já com as interfaces físicas, os participantes fazem mais operações de transição no controlo entre o movimento linear e não-linear, mas estão menos tempo neste último estado. Rodam os pés para alterar a direção virtual, a seguir voltam ao estado de movimento linear, e se necessário voltam a ajustar a direção com outra rotação dos pés.

#### **6.2.5 Avaliação subjectiva baseada em questionário**

Após o término das sessões de testes com as três interfaces, foi solicitado a cada participante o preenchimento de um questionário pós-teste, no qual eles ordenaram as três interfaces (IVAC, IVAV e *Joystick*), segundo as suas preferências relativamente a seis critérios subjetivos: (a) Divertimento, (b) Facilidade de Uso, (c) Fadiga, (d) Controlabilidade, (e) Naturalidade e (f) Apreciação Global.

Para ordenar as três interfaces, relativamente a cada critério, os participantes classificaram cada uma delas, numa escala de três valores: de 1 (menor preferência) a 3 (maior preferência), sem repetições. A Figura 39 mostra os resultados obtidos, para cada uma das interfaces, relativo a cada critério de apreciação. Relativamente ao critério “Fadiga”, o valor 3 significa que a interface disponibiliza a menor fadiga de todas.



**Figura 39: Resultados médios da apreciação subjetiva dos critérios seguintes: Divertimento, Facilidade de Uso, Fadiga, Controlabilidade, Naturalidade e Apreciação Global**

A aplicação do teste Friedman permitiu descobrir que existem efeitos estatisticamente significativos da apreciação dos participantes às três interfaces, relativamente aos critérios, Divertimento ( $\chi^2_2=13,000$ ,  $p=0,002$ ), Facilidade de Uso ( $\chi^2_2=13,778$ ,  $p=0,001$ ), Fadiga ( $\chi^2_2=19,444$ ,  $p<0,001$ ), Controlabilidade ( $\chi^2_2=18,111$ ,  $p<0,001$ ) e Naturalidade ( $\chi^2_2=18,111$ ,  $p=0,15$ ). Já relativamente ao critério Apreciação Global não foram reveladas diferenças significativas entre as três interfaces ( $\chi^2_2=3,895$ ,  $p=0,143$ ).

Aplicando o teste *post-hoc* Wilcoxon sobre o critério **Divertimento**, verificaram-se diferenças significativas entre as interfaces IVAC e IVAV ( $p=0,004$ ), e entre esta última e o Joystick ( $p=0,004$ ). Relativamente à **Facilidade de Uso**, verificaram-se diferenças significativas entre a interface IVAC e o Joystick ( $p=0,002$ ), e entre este último e a IVAV ( $p=0,022$ ). No que concerne o critério **Fadiga**, foram encontradas diferenças significativas entre a interface IVAC e o Joystick ( $p=0,001$ ), e entre este último e a IVAV ( $p<0,001$ ). Para o critério **Controlabilidade**, verificaram-se diferenças significativas entre a interface IVAC e o Joystick ( $p=0,001$ ), e entre este último e a IVAV ( $p=0,003$ ). Relativamente ao critério **Naturalidade**, verificou-se existirem

diferenças significativas entre a interface IVAC e a IVAV ( $p=0,005$ ), e entre esta última e o *Joystick* ( $p=0,026$ ).

Os resultados permitem concluir que os participantes dividiram de forma equilibrada a sua escolha entre as três interfaces relativamente à sua preferência, em termos de apreciação global. Não optaram de forma clara por nenhuma em particular. Relativamente aos critérios Facilidade de Uso, Fadiga e Controlabilidade, os resultados revelam que os participantes preferiram o *Joystick*, comparativamente às duas interfaces físicas. Entre estas não há diferenças na preferência. Já no que respeita ao Divertimento proporcionado e à Naturalidade percebida pelos participantes, a sua preferência recai sobre a abordagem IVAV. Esta oferece aos participantes a percepção de que têm uma maior flexibilidade na rapidez com que alteram a direção virtual. No entanto, os dados quantitativos revelam que produz resultados semelhantes aos da abordagem IVAC.





## 7 Conclusões e Trabalho Futuro

Nesta tese desenvolveu-se uma nova abordagem da técnica “Caminhar no Lugar”, de **controlo da velocidade virtual**, denominada SAS-WIP. Esta interface retira proveito das características predominantes do movimento vertical dos pés, durante os passos no lugar, como são o caso da velocidade e da amplitude, que são utilizadas para mapearem o valor da velocidade virtual. A partir de um estudo exploratório, foram especificadas essas variáveis cinemáticas do movimento vertical dos pés. Da análise desses resultados, foi possível obter um algoritmo de cálculo da velocidade virtual, em função dessas duas variáveis cinemáticas, que permite controlar a velocidade na fase rítmica. Foi também proposto um método, que reduz a latência no arranque do movimento, e outro que faz a previsão da paragem do movimento com base na velocidade do pé, durante o passo anterior.

Lamentavelmente existem poucos estudos comparativos entre interfaces CNL (Terziman et al., 2010), avaliações comparativas entre interfaces CNL, e a maior parte dos estudos baseia-se somente na obtenção do retorno dos participantes, através de questionários subjetivos (Whitton et al., 2005). Nesta tese, desenvolveu-se um estudo comparativo entre três interfaces: duas abordagens da técnica CNL (SAS-WIP e GUD-WIP) e uma implementação com o dispositivo físico “Wimote-Nunchuk<sup>tm</sup>”. Este estudo pretendeu validar a hipótese colocada inicialmente, que confronta diretamente as duas interfaces CNL, através dos resultados de desempenho (eficácia, precisão, eficiência, rapidez e fluidez e continuidade de interação) dos participantes, que lhes é proporcionado pelas interfaces, em tarefas comuns de controlo de locomoção virtual. O referido *joystick* é utilizado neste estudo, para ser analisado como uma base de referência comparativa dos resultados das interfaces CNL.

Os resultados mostram que, no deslocamento em **distâncias curtas**, a interface SAS-WIP disponibiliza ao utilizador maior **eficácia e precisão** do que a interface GUD-WIP. Este facto responde ao requisito inicial (secção 1.1) de que a abordagem SAS-WIP disponibiliza uma previsão e um controlo mais precisos da distância virtual a percorrer em cada passo, principalmente no controlo da posição de paragem, para qualquer valor de distância, mas com particular atenção nas distâncias mais curtas. No estudo, o

*joystick* é a interface que disponibiliza mais eficácia e precisão. Este resultado é consistente com o obtido por (Feasel et al., 2008), no estudo comparativo com a interface CNL LLCM-WIP.

No deslocamento em **distâncias longas**, os resultados revelaram que a interface SAS-WIP disponibiliza aos utilizadores mais **eficiência** e maior **rapidez**, do que a interface GUD-WIP. Este resultado responde ao requisito inicial (secção 1.1) de que a abordagem SAS-WIP atinge com facilidade velocidades médias mais elevadas, assegurando continuidade no movimento entre e intra-passos, especialmente em distâncias longas. O resultado também responde a um outro requisito, do facto de a interface SAS-WIP permitir despendar menos energia e logo assegurar menos fadiga aos utilizadores, especialmente em distâncias longas. Também para estes critérios de desempenho, o *joystick* é a interface que disponibiliza mais **eficiência** e maior **rapidez**.

Relativamente à **fluidez e continuidade da interação**, há resultados contraditórios nos valores das duas interfaces CNL. Para **curtas distâncias**, a interface GUD-WIP assegura **mais fluidez** do que a interface SAS-WIP. No entanto, para as **médias e longas distâncias** esta última interface disponibiliza maior fluidez. Estes resultados devem-se às diferentes características do movimento dos pés, que é descrito por duas linguagens gestuais diferentes. Neste critério, o *joystick* apresentou os piores resultados, pelos motivos descritos na discussão deste teste.

Relativamente à avaliação subjetiva que os participantes realizaram das interfaces, os resultados mostram que o **divertimento** induzido pelo movimento físico da interface SAS-WIP foi superior ao das outras interfaces. Os participantes percecionaram o *joystick* como a interface que assegura menos **fadiga** e mais **controlabilidade**. Este resultado é consistente com as características dessa interface. Mas para esses critérios, a interface SAS-WIP foi percecionada como induzindo menos fadiga e maior controlo do que a GUD-WIP. Os resultados mostram que os participantes percecionaram que as interface a SAS-WIP e o *joystick* asseguram a mesma **facilidade de uso** entre si, superando a GUD-WIP. Este resultado é animador, porque sugere que os sujeitos relacionam facilmente as métricas do movimento vertical com a velocidade virtual. As duas interfaces baseadas no movimento físico dos pés foram percecionadas como aquelas que asseguram maior naturalidade na realização da tarefa. Finalmente, os

participantes perceberam a interface SAS-WIP como sendo a globalmente mais apreciada das três.

Resumindo, os resultados mostram que, usando a interface SAS-WIP, os sujeitos controlaram de forma mais precisa a relação entre os seus movimentos físicos e a velocidade virtual que pretendiam obter, do que controlando a relação disponibilizada pela interface GUD-WIP.

Nesta tese foi também desenvolvida uma proposta de uma técnica de **controlo da direção virtual, que gerou** duas abordagens alternativas: **IVAC** (Interface de Velocidade Angular Constante) e **a IVAV** (Interface de Velocidade Angular Variável). Não são conhecidos estudos que usem os pés para controlar a direção virtual, que estejam integrados no ciclo dos passos no lugar. Com a introdução deste conceito, pretendeu-se, nesta tese, validar a viabilidade em controlar a direção do deslocamento virtual, através da relação que o utilizador estabelece entre o movimento de rotação dos pés e alteração de direção que pretende obter, num cenário em que o mesmo está praticamente estacionário, a dar passos no lugar, em frente a um ecrã de larga escala.

Para tal, desenvolveu-se uma experiência que pretendeu medir comparativamente o desempenho (tempo da tarefa, percentagem de alvos transpostos, percentagem de tempo das viragens de direção e número de viragens de direção) proporcionado aos participantes, pelas duas abordagens e por uma implementação do *joystick* do dispositivo físico “Wimote-Nunchuk<sup>™</sup>”), em tarefas de controlo da direção, em sete caminhos não-lineares.

Relativamente ao **tempo da tarefa**, o *Joystick* permitiu aos participantes realizar as tarefas de forma mais rápida do que com as abordagens físicas. Entre estas duas não há diferenças nesta métrica. No entanto, inicialmente, prevíamos que a abordagem baseada na velocidade angular variável permitiria realizar as viragens de direção mais rapidamente e que isso se refletiria na rapidez total da tarefa.

Os resultados da métrica “**percentagem de alvos ultrapassados**” mostram que os participantes passaram um número semelhante de alvos com as três interfaces, sugerindo que elas asseguram a mesma eficácia para esta tarefa. Este resultado é robusto para demonstrar a viabilidade desta técnica no controlo da direção virtual.

Em relação à métrica da “percentagem de tempo das viragens de direção”, os resultados revelam que o *Joystick* é, das três interfaces, aquela que apresenta mais tempo em operações de alteração da direção virtual. Isto ocorre porque os participantes usam estratégias diferentes, quando utilizam as abordagens físicas. Com o *joystick* fazem continuamente pequenos ajustamentos na direção do movimento, enquanto que com as abordagens físicas fazem menos tentativas para definir a direção do deslocamento.

Em relação ao número de viragens, o *Joystick* induz menos do que as abordagens físicas. Este resultado é complementar do obtido para a métrica anterior. Isto também revela a estratégia usada pelos participantes com cada tipo de interface.

Relativamente à avaliação subjetiva que os participantes fizeram das interfaces, os resultados mostram que eles preferiram esta implementação do *joystick* nos critérios Facilidade de Uso, Fadiga e Precisão. São resultados expectáveis. Mas preferiram a abordagem IVAV no divertimento proporcionado e na naturalidade sentida na realização destas tarefas.

Consideramos que os resultados obtidos com o uso das abordagens propostas (IVAC e IVAV) nestas tarefas são animadores e mostram que existe viabilidade mínima no uso em controlar a direção do deslocamento virtual, através da relação que o utilizador estabelece entre o movimento de rotação dos pés e alteração de direção que pretende obter, num cenário em que o mesmo está praticamente estacionário, a dar passos no lugar, em frente a um ecrã de larga escala.

## **Trabalho Futuro**

Existem várias questões que foram levantadas durante o trabalho da tese que são possíveis linhas a investigar no futuro.

Relativamente ao controlo de velocidade, gostaríamos de estudar o efeito da altura dos sujeitos no modelo que sustenta a SAS-WIP. Pretende-se também analisar a viabilidade do uso da abordagem com a captura de movimento baseada no dispositivo Microsoft Kinect. A simulação de outro tipo de movimentos virtuais, como por exemplo, caminhar para trás, traria maior realismo à abordagem. Gostaríamos também de perceber o desempenho disponibilizado pela interface SAS-WIP noutras tarefas, como por exemplo, perseguição de alvos em movimento, estimativa de distâncias virtuais, ou

verificar o efeito cognitivo nos participantes, após a sua utilização, em termos de memorização e registo de informação do ambiente virtual.

Relativamente às abordagens de controlo de direção, pretende-se testá-las comparativamente com outras interfaces e noutros cenários diferentes. Comparar as abordagens propostas com outras interfaces físicas de controlo de direção, como o apontar ou a inclinação do torso. Por outro lado, seria importante também perceber qual é a resposta da técnica em cenários que requeiram uma maior precisão nas alterações da direção, como por exemplo, caminhos pré-definidos com diferentes curvaturas.



# Bibliografia

- (Araújo et al., 2010) Araújo, B., Mariano, D., Jota, R., Ferreira, A., & Jorge, J. (2010). Técnicas de interação para revisão de cenários 3d. In *Proceedings of the 4ª Conferência Nacional Interação Humano-Computador Aveiro*.
- (Asai et al., 2002) Asai, K., Osawa, N., Sugimoto, Y. Y., & Tanaka, Y. (2002). Viewpoint motion control by body position in immersive projection display. In *Proceedings of the 2002 ACM symposium on Applied computing, SAC '02* (pp. 1074–1079). New York, NY, USA: ACM.
- (Barrera et al., 2003) Barrera, S., Romanos, P., Saito, S., Takahashi, H., & Nakajima, M. (2003). Real time detection interface for walking on cave. In *2003 Computer Graphics International (CGI 2003), 9-11 July 2003, Tokyo, Japan* (pp. 105–111).: IEEE Computer Society.
- (Bouguila et al., 2004a) Bouguila, L., Courant, M., & Hirsbrunner, B. (2004a). Active locomotion interface for virtual environments. In *the 14th International Conference on Artificial Reality and Teleexistence: ICAT 2004* South Korea.
- (Bouguila et al., 2004b) Bouguila, L., Evequoz, F., Courant, M., & Hirsbrunner, B. (2004b). Walking-pad: a step-in-place locomotion interface for virtual environments. In *ICMI '04: Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces* (pp. 77–81). New York, NY, USA: ACM.
- (Bouguila et al., 2002) Bouguila, L., Ishii, M., & Sato, M. (2002). Realizing a new step-in-place locomotion interface for virtual environment with large display system. In *Proceedings of the Workshop on Virtual environments 2002 (EGVE '02)* (pp. 197–207). Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association.
- (Bowman et al., 1997) Bowman, D., Koller, D., & Hodges, L. (1997). Travel in immersive virtual environments: An evaluation of viewpoint motion control techniques. In *Proceedings of the 1997 Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS)* (pp. 45–52).
- (Bowman et al., 2001) Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2001). An introduction to 3d user interface design. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(1), 96–108.



- (Bowman et al., 2004) Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2004). *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Addison-Wesley Professional, 1st edition.
- (Brooks Jr., 1986) Brooks Jr., F. (1986). Walk through – a dynamic graphics system for simulating virtual buildings. In *Proceedings of the 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics* (pp. 9–21).
- (Bruno et al., 2010) Bruno, L., Araujo, B., Pereira, J., & Jorge, J. (2010). Locomoção virtual via movimento físico do utilizador: controlo de velocidade do avatar. In D. T. O. Mealha, J. Madeira & B. Santos (Eds.), *Actas da 4a. Conferência Nacional em Interação Humano-Computador (Interação 2010)* (pp. 129–136).: GPCG.
- (Chance et al., 1998) Chance, S., Gaunet, F., Beall, A., & Loomis, M. (1998). Locomotion mode affects the updating of objects encounter during travel: The contribution of vestibular and proprioceptive inputs to path integration. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 168–178.
- (Cruz-Neira et al., 1992) Cruz-Neira, C., Sandin, D., DeFanti, T., Kenyon, R., & Hart, J. (1992). The cave, audio-visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, (pp. 67–72).
- (Darken et al., 1997) Darken, R., Cockayne, W., & Carmein, D. (1997). The omnidirectional treadmill: a locomotion device for virtual worlds. In *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 213–221).
- (Dean, 1965) Dean, G. (1965). An analysis of the energy expenditure in level and grade walking. *Ergonomics*, 8(1), 31–47.
- (Feasel et al., 2008) Feasel, J., Whitton, M. C., & Wend, J. D. (2008). Llcm-wip: Low-latency, continuous-motion walking-in-place. In IEEE (Ed.), *Proceedings of IEEE Symposium on 3D User Interfaces* (pp. 97–104).
- (Hall, 1999) Hall, J. (1999). *Basic Biomechanics*. WCB/McGraw-Hill, 3rd. edition.
- (Hase & Stein, 1999) Hase, K. & Stein, R. B. (1999). Turning strategies during human walking. *Journal of Neurophysiology*, 81, 2914–2922.

- (Hollerbach, 2002) Hollerbach, J. (2002). *Locomotion interfaces*. In *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*.
- (Interrante et al., 2007) Interrante, V., Ries, B., & Anderson, L. (2007). Seven league boots: a new metaphor for augmented locomotion through moderately large scale immersive virtual environments. In I. Press (Ed.), *Proceedings of the Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (pp. 167–170).
- (Iwata, 1999) Iwata, H. (1999). The torus treadmill: Realizing locomotion in ves. In *Proceedings of the IEEE Computer Graphics & Applications*, volume 19 (pp. 30–35).
- (Jota et al., 2010) Jota, R., de Araújo, B. R., Bruno, L. C., Pereira, J. M., & Jorge, J. A. (2010). Immiview: a multi-user solution for design review in real-time. *J. Real-Time Image Processing*, 5(2), 91–107.
- (LaViola, 2001) LaViola, J. (2001). A review of input and output devices for 3d interaction. In *SIGGRAPH*.
- (LaViola et al., 2001) LaViola, J. J., Feliz, D. A., Keefe, D. F., & Zeleznik, R. C. (2001). Hands-free multi-scale navigation in virtual environments. In *Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics (I3D '01)* (pp. 9–15).
- (Mine, 1995) Mine, M. (1995). *Virtual Environment Interaction Techniques*. Tr95-018, UNC Chapel Hill CS Dept.
- (Murray et al., 1964) Murray, M., Drought, A., & Kory, R. (1964). Walking patterns of normal men. *Journal of Bone & Joint Surgery*, 46A, 335–360.
- (Murray et al., 1970) Murray, M., Kory, R., & Sepic, S. (1970). Walking patterns of normal women. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 51, 637–650.
- (Nintendo, 2012) Nintendo (2012). Wiimote webpage: <http://wii.com>.
- (Norkin & Levangie, 1992) Norkin, C. & Levangie, K. (1992). Joint structure and function. a comprehensive analysis. EUA: Library of Congress, 2 edition.

- (Oliveira, 2008) Oliveira, L. (2008). Análise da marcha de indivíduos hemiparéticos submetidos a instabilidade. Tese de mestrado em fisioterapia, Universidade Cidade de São Paulo, Unid. C.
- (OpenSG, 2010) OpenSG (2010). Opensg project webpage: <http://www.opensg.org/>.
- (Optitrack, 2010) Optitrack (2010). Optitrack webpage: <http://www.naturalpoint.com/optitrack/>.
- (Pinto, 2007) Pinto, S. (2007). *A marcha humana em análise*. Technical report, IMM/FM/UL.
- (Razzaque et al., 2002) Razzaque, S., Swapp, D., Slater, M., Whitton, M. C., & Steed, A. (2002). Redirected walking in place. In T. E. Association (Ed.), *Eurographics*.
- (Reitmayr & Schmalstieg, 2005) Reitmayr, G. & Schmalstieg, D. (2005). OpenTracker: A flexible software design for three-dimensional interaction. In *Virtual Reality*, volume 9 (pp. 79–92).
- (Rey et al., 2007) Rey, B., Lozano, J. A., Alcañiz<sup>1</sup>, M., Gamberini<sup>2</sup>, L., Calvet<sup>1</sup>, M., Kerrigan<sup>2</sup>, D., & Martino, F. (2007). Super-feet: A wireless hand-free navigation system for virtual environments. In R. Shumaker (Ed.), *Proceedings of the Virtual Reality, HCII 2007, LNCS 4563* (pp. 348–357).: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- (Santos et al., 2007a) Santos, P., Stork, A., Gierlinger, T., Pagani, A., Araújo, B., Jota, R., Bruno, L., Jorge, J., Pereira, J. M., Witzel, M., Conti, G., Amicis, R. d., Barandarian, I. n., Paloc, C. l., Machui, O., Jiménez, J. M., Bodammer, G., & McIntyre, D. (2007a). Improve: collaborative design review in mobile mixed reality. In *Proceedings of the 2nd international conference on Virtual reality, ICVR'07* (pp. 543–553). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- (Santos et al., 2007b) Santos, P., Stork, A., Gierlinger, T., Pagani, A., Araújo, B., Jota, R., Bruno, L., Jorge, J., Pereira, J. M., Witzel, M., Conti, G., de Amicis, R., Barandarian, I. n., Paloc, C., Hafner, M., & McIntyre, D. (2007b). Improve: advanced displays and interaction techniques for collaborative design review. In

- Proceedings of the 2nd international conference on Virtual reality, ICVR'07* (pp. 376–385). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- (Santos et al., 2007c) Santos, P., Stork, A., Gierlinger, T., Pagani, A., Araújo, B., Jota, R., Bruno, L., Jorge, J., Pereira, J. M., Witzel, M., Conti, G., De Amicis, R., Barandarian, I. n., Paloc, C., Hafner, M., & McIntyre, D. (2007c). Improve: designing effective interaction for virtual and mixed reality environments. In *Proceedings of the 12th international conference on Human-computer interaction: interaction platforms and techniques, HCI'07* (pp. 689–699). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- (Shiratori & Hodgins, 2008) Shiratori, T. & Hodgins, J. K. (2008). Accelerometer-based user interfaces for the control of a physically simulated character. *ACM Transactions on Graphics*, 27(5).
- (Slater et al., 1993) Slater, M., Steed, A., & Usoh, M. (1993). The virtual treadmill: A naturalistic metaphor for navigation in immersive virtual environments. In M. Goebel (Ed.), *Proceedings of the First Eurographics Workshop on Virtual Reality* (pp. 71–86).
- (Slater et al., 1995) Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1995). Taking steps: The influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 2(No. 3), 201–219.
- (Sousa, 2010) Sousa, A. (2010). *Controlo Postural e Marcha Humana: Análise Multifactorial*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- (Steinice et al., 2008) Steinice, F., Ropinski, T., Bruder, G., Hinrichs, K., Frenz, H., & Lappe, M. (2008). A universal virtual locomotion system: Supporting generic redirected walking and dynamic passive haptics within legacy 3d graphics applications. In IEEE (Ed.), *Proceedings of the IEEE Virtual Reality*.
- (Tan et al., 2001) Tan, D. S., Robertson, G. G., & Czerwinski, M. (2001). Exploring 3d navigation: Combining speed-coupled flying with orbiting. In *Proceedings of CHI'01*.

- (Templeman et al., 2006) Templeman, J., Sibert, L., Page, R., & Denbrook, P. (2006). Immersive simulation to train urban infantry combat. *Virtual Media for Military Applications*.
- (Templeman et al., 1999) Templeman, J. N., Denbrook, P. S., & Sibert, L. E. (1999). Virtual locomotion: Walking in place through virtual environments. *Presence, Massachusetts Institute of Technology*, Vol. 8(No. 6), 598–617.
- (Terziman et al., 2010) Terziman, L., Marchal, M., Emily, M., & Multon, F. (2010). Shake-your-head: Revisiting walking-in-place for desktop virtual reality. In *Proceedings of ACM VRST 2010* (pp. 27–34).
- (Usoh et al., 1999) Usoh, M., Arthur, K., Whitton, M. C., Bastos, R., Steed, A., Slater, M., & Frederick P. Brooks, J. (1999). Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 99* (pp. 359 – 364).
- (VIMMI, 2010) VIMMI (2010). Open5 webpage: <http://open5.sourceforge.net/>.
- (Ware & Osborne, 1990) Ware, C. & Osborne, S. (1990). Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments. In *Proceedings of the 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics* (pp. 175–183).
- (Wells et al., 1996) Wells, M., Peterson, B., & Aten, J. (1996). The virtual motion controller: A sufficient-motion walking simulator. In I. C. S. Press (Ed.), *Proceedings of VRAIS '97* (pp. 1–8). Los Alamitos, CA, USA.
- (Wendt et al., 2010) Wendt, J. D., Whitton, M. C., & Frederick P. Brooks, J. (2010). Gud wip: Gait-understanding-driven walking-in-place. In *Proceedings of the IEEE VR2010* (pp. 51–58).
- (Whitton et al., 2005) Whitton, M. C., Cohn, J. V., Feasel, J., Zimmons, P., Razzaque, S., Poulton, S. J., McLeod, B., & Frederick P. Brooks, J. (2005). Comparing ve locomotion interfaces. In *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2005*.
- (Williams et al., 2011) Williams, B., Bailey, S., Narasimham, G., Li, M., & Bodenheimer, B. (2011). Evaluation of walking in place on a wii balance board to explore a virtual environment. *ACM Transactions on Applied Perception*, 8(3).

- (Williams et al., 2006) Williams, B., Narasimham, G., McNamara, T. P., Carr, T. H., Rieser, J. J., & Bodenheimer, B. (2006). Updating orientation in large virtual environments using scaled translational gain. In *APGV '06: Proceedings of the 3rd symposium on Applied perception in graphics and visualization* (pp. 21–28). New York, NY, USA: ACM.
- (Yan et al., 2004) Yan, L., Allison, R., & Rushton, S. (2004). New simple virtual walking method – walking on the spot. In *8th Annual Immersive Projection Technology (IPT) Symposium Electronic Proceedings*.