



PLANEJADOR DE PASSOS PARA O EXOESQUELETO ROBÓTICO ORTHOLEG 2.0 BASEADO EM COMPORTAMENTO HUMANO

José Lindenberg de Andrade^[Orcid: 0000-0002-0150-2243], UFRN, lindenberg.andrade.103@ufrn.edu.br

Márcio Valério de Araújo^[Orcid: 0000-0001-7166-5526], UFRN, marcio.araujo@ufrn.br

Pablo Javier Alsina^[Orcid: 0000-0002-2882-5237], UFRN, pablo@dca.ufrn.br

Resumo. Exoesqueletos robóticos para membros inferiores são equipamentos que podem ajudar na locomoção de pessoas com dificuldade locomotoras, contudo, esses dispositivos não variam o tamanho do passo de forma autônoma, fazendo com que, em determinadas situações, o usuário com o exoesqueleto encontre dificuldades para parar em um determinado ponto exato do percurso. A finalidade deste trabalho é apresentar um Sistema de Auxílio à Locomoção (SAL) dotado de um planejador de passos para o exoesqueleto robótico Ortholeg 2.0 para membros inferiores, com a capacidade de ajustar o tamanho do passo de forma autônoma para um trajeto específico, levando em conta dados antropomórficos. Foram realizados vários experimentos, através de cinemetria externa, com um grupo de dezessete pessoas saudáveis, para verificar como se comporta a variação do tamanho do passo em função das distâncias percorridas em um determinado percurso e com isso reproduzir tal comportamento na marcha antropomórfica do exoesqueleto Ortholeg 2.0. Baseado na análise estatística dos resultados experimentais e por meio do comportamento médio obtido, foi desenvolvida uma estratégia de variação do tamanho do passo para uma marcha antropomórfica.

Palavras chave: Planejamento de passos. Exoesqueleto robótico. Membros inferiores. Cinemetria externa. Marcha antropomórfica.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de exoesqueletos robóticos (Araujo et al, 2015) utilizados para pessoas com dificuldades na locomoção é algo crescente na atualidade (Flores, 2021). Com esses equipamentos o usuário é capaz de realizar tarefas como sentar e levantar, subir e descer escadas, caminhar, transpor alguns tipos de obstáculos, dentre outros (Neves, 2021).

O exoesqueleto robótico Ortholeg 2.0 foi desenvolvido para membros inferiores, sendo um aperfeiçoamento da sua versão anterior, possuindo uma melhor estrutura mecânica, sendo mais leve, mais resistente, discreta e mais adaptável para diversos tamanhos de usuários (Nascimento et al, 2020).

O processo de caminhada em um determinado percurso, é composta de uma sequência de passos constantes, o que se mantém ao longo da caminhada, e uma sequência de passos variados que se adapta para realizar uma ação, seja essa ação parar ou transpor algum obstáculo. A depender do trajeto a ser executado pelo utilizador do exoesqueleto robótico, o tamanho do passo varia para adaptar-se às condições presentes no ambiente sem, porém, perder a naturalidade do movimento da marcha. O tamanho do passo deve ser variado quando, ao longo de um trajeto, o usuário caminha de um ponto inicial até um certo obstáculo aproximando-se o máximo possível do mesmo para depois transpô-lo, e essa aproximação caracteriza o passo variado.

Para o caso do usuário de exoesqueletos robóticos que não variam o tamanho do passo enquanto realizam os movimentos de marcha ao longo de um percurso, pode acontecer de que para um certo ponto final de parada o exoesqueleto robótico não consiga aproximar-se suficientemente do ponto almejado. Como o tamanho do passo para esses exoesqueletos é constante, a distância percorrida do início até o final do trajeto onde ocorre a parada da caminhada é sempre múltipla do passo.

Partindo desse pressuposto este trabalho apresenta um algoritmo de planejamento de passos, denominado Sistema de Auxílio à Locomoção (SAL), baseado no comportamento humano, tornando a marcha a mais natural possível pois um padrão de marcha parecido com o de uma pessoa saudável é muito importante para não causar estranheza ao usuário que utilizará o exoesqueleto. Com isso, o exoesqueleto Ortholeg 2.0 é capaz de ajustar o tamanho do passo ao final do percurso de forma autônoma, garantindo que o usuário deste equipamento robótico se aproxime o máximo possível do ponto final definido parando sempre com os dois pés junto no chão (posição ortostática) quando necessário.

O exoesqueleto Ortholeg 2.0 é dotado de um sistema de visão embarcado (Santos et al, 2019) para estimar as distâncias entre o ponto inicial até um ponto final que pode ser um obstáculo qualquer por exemplo. Em seguida o valor dessa distância é utilizado pelo SAL para realizar o planejamento dos passos até o ponto final identificado pelo sistema de visão. Basicamente o SAL gera para o usuário o *footstep print* que representa as pegadas do exoesqueleto robótico até o ponto final. Com isso toda a trajetória a ser percorrida pode ser observada previamente pelo usuário que escolhe seguir ou não com o planejamento proposto.

2. METODOLOGIA

Esta metodologia será subdividida em duas subseções, na qual na primeira será apresentada o experimento realizado para identificação da variação do tamanho do passo, e, posteriormente, na segunda seção será mostrado como esse comportamento foi implementado para o Sistema de Auxílio a Locomoção.

2.1. Experimento para identificação da variação do tamanho do passo em função da distância percorrida

Para verificar o comportamento da variação do tamanho do passo de um ser humano saudável ao caminhar ao longo de um percurso em linha reta, partindo de um ponto inicial até um ponto final, foram realizadas diversas medidas da variação do tamanho do passo para a perna direita e para a perna esquerda de um grupo de pessoas saudáveis em vários trajetos, utilizando a técnica da cinemetria externa (Silveira et al, 2006).

Foram selecionados, de forma aleatória, dezessete adultos saudáveis, sendo nove homens e oito mulheres, para percorrer várias distâncias escolhidas, também de forma aleatória, (4,0m, 7,0m, 10,0m e 13,0m), cada voluntário fez o percurso para as distâncias propostas três vezes cada. A Tab. (1) mostra as principais características do grupo selecionado para o experimento.

Tabela 1. Principais características do grupo de pessoas.

Sexo	Idade(anos)	Peso(kg)	Altura(m)
Masculino	21-32	56-100	1,69-1,80
Feminino	20-26	53-70	1,53-1,70

O experimento começava com os participantes parados em posição ortostática no ponto de partida inicial (0 m), todos foram orientados a iniciarem o percurso sempre com o pé direito, para padronizar as medidas, não importando qual pé (direito ou esquerdo) chegaria primeiro ao ponto final, pois a orientação dada era que a parada no término do percurso deveria ser feita também na posição ortostática.

Foi utilizada uma fita métrica fixada ao chão, e devidamente posicionada entre os pés de cada pessoa, e na medida em que ela caminhava livremente um sistema de câmeras captava a posição absoluta dos pés ao longo do percurso. Então, na fase de duplo apoio da marcha, correspondente ao início do ciclo padrão, era medido o tamanho do passo (distância absoluta da ponta do pé posicionado na frente menos o valor da distância absoluta da ponta do pé anterior) como também, a posição de cada pé no referido trajeto. A Fig. (1) apresenta uma imagem registrada pelo sistema de câmeras do experimento indicando o tamanho do passo medido. Quando o pé direito estava na frente a medida era definida como o “tamanho do passo direito” sendo tomado o mesmo raciocínio para quando o pé esquerdo se encontrava na frente.



Figura 1. Experimento de análise da variação do tamanho do passo ao longo de uma distância percorrida com o auxílio de uma fita métrica, entre os dois pés, para obtenção do tamanho do passo.

Como para cada trajeto, a mesma pessoa realizava o experimento três vezes, os dados coletados foram submetidos a uma análise estatística para extração dos valores médios do tamanho do passo direito e esquerdo em função da distância percorrida.

Inicialmente, foram gerados gráficos, mostrando a variação do tamanho médio dos passos, tanto esquerdo quanto direito, em função da posição absoluta de cada trajeto para cada pessoa e posteriormente foi retirada uma nova média, considerando os experimentos realizados pelo grupo das mulheres e dos homens.

A Figura (2) apresenta como exemplo, dois gráficos da variação do tamanho do passo em função da distância percorrida, onde em ambos os casos foi constatado como é o comportamento da variação do tamanho do passo ao longo da caminhada. Nos gráficos da Fig. (2) é possível identificar duas regiões distintas, sendo a primeira denominada de “percurso com tamanho de passo constante”, onde se observa que o tamanho médio do passo direito ou esquerdo



praticamente não varia e uma segunda, definida como “percurso com tamanho de passo variado”, onde, o tamanho do passo vai decaindo até chegar no ponto final do trajeto. Como no início e o fim do experimento as pessoas sempre paravam na posição ortostática o tamanho do passo, nestas posições, sempre são iguais a zero.

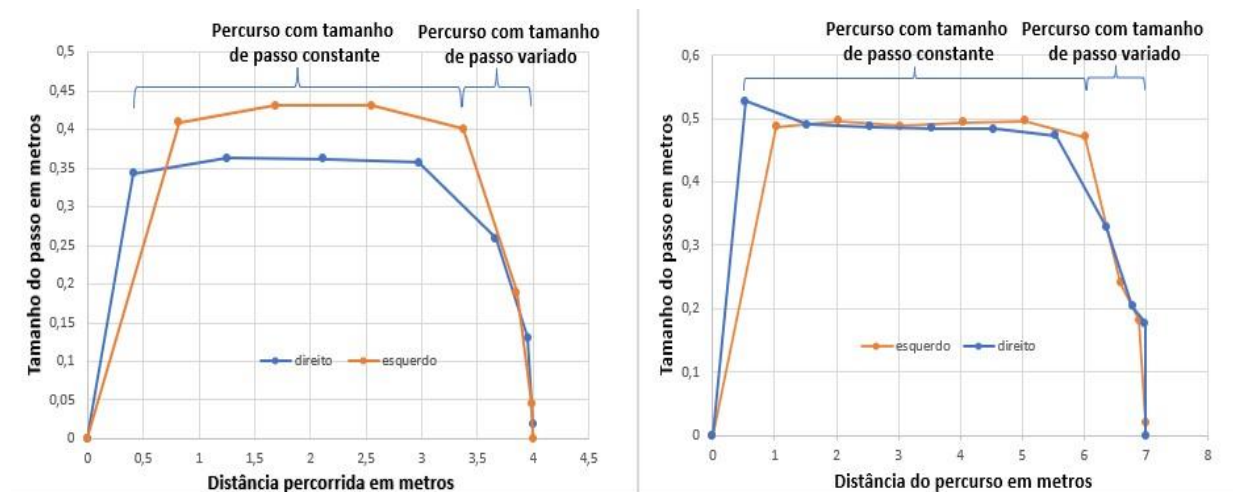


Figura 2. Exemplo de um conjunto de dados coletados mostrando a variação do tamanho do passo em função de uma distância percorrida. O gráfico localizado na esquerda representa a média de todas as mulheres para a distância de 4 metros e o gráfico localizado na direita representa a média de todos os homens para a distância de 7 metros.

Este comportamento típico, com as duas regiões distintas (percurso com tamanho de passo constante e percurso com tamanho de passo variado) foi observado em todos os experimentos realizados para distâncias maiores que 4 metros.

Todavia, algumas diferenças em relação ao tamanho de passo médio direito em relação ao esquerdo foram observadas em todos os experimentos, como também flutuações nos valores médios desses passos na região constante. Para simplificar essa análise e se obter um comportamento que pudesse ser facilmente padronizado, foi calculado o valor do passo médio, considerando assim a média do tamanho do passo direito com a do passo esquerdo tomando como base para isso somente os tamanhos dos passos na região constante.

A Tabela (2) apresenta para 4 distâncias diferentes percorridas por homens e mulheres no experimento, como também as médias dos tamanhos de passos direito e esquerdo e, por fim, a Média dos passos que é o tamanho do passo médio do percurso sendo a média das médias dos passos direito e esquerdo.

Tabela 2. Médias para homens e mulheres para o percurso com o tamanho do passo constante.

Distância percorrida (m)	Tamanho médio dos passos da região de passos constantes (m)					
	Masculino			Feminino		
	Esquerdo	Direito	Média dos passos	Esquerdo	Direito	Média dos passos
4,0	0,466	0,474	0,470	0,417	0,356	0,386
7,0	0,489	0,484	0,486	0,383	0,381	0,382
10,0	0,516	0,516	0,516	0,387	0,380	0,383
13,0	0,542	0,547	0,544	0,399	0,394	0,396

Feitas as referidas simplificações mostradas na tabela anterior, a Fig. (3) apresenta como seria o gráfico da variação do tamanho do passo, considerando os novos dados da média dos passos direito e esquerdo.

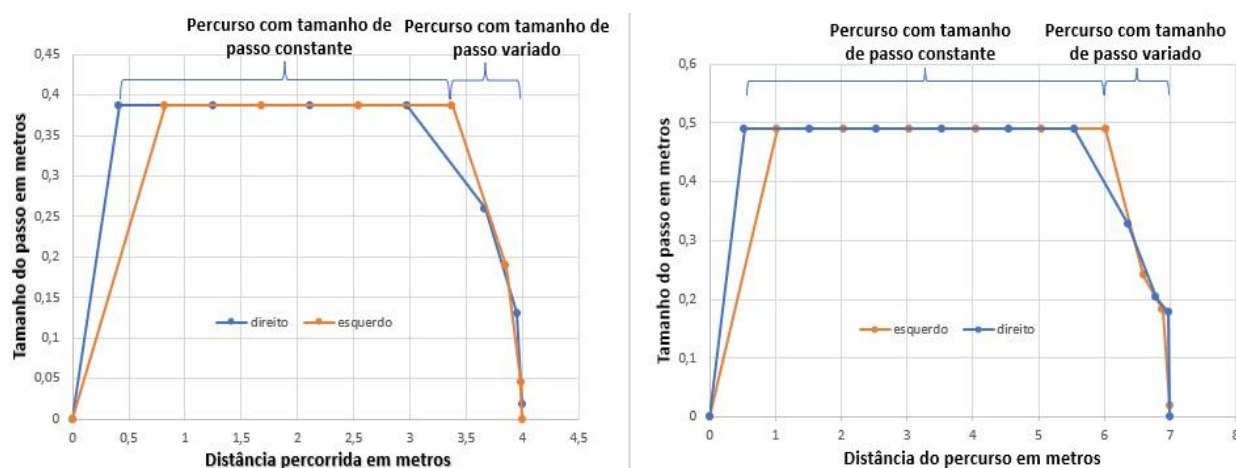


Figura 3. Exemplo de um conjunto de dados coletados mostrando a média do tamanho do passo no percurso com tamanho de passo constante em função de uma distância percorrida. Da mesma forma da figura anterior, o gráfico localizado à esquerda representa o percurso de todas as mulheres para a distância de 4 metros e o gráfico localizado à direita representa o percurso de todos os homens para a distância percorrida de 7 metros.

O comportamento apresentado nos gráficos da Figura (3) serviu como inspiração para o desenvolvimento do SAL. A partir da distância informada pelo sistema de visão, também embarcado no exoesqueleto, o SAL calcula a quantidade de passos como também divide o trajeto nas duas regiões observadas nos experimentos (percurso com tamanho de passo constante e variado).

2.2. Sistema de Auxílio a Locomoção (SAL)

O Sistema de auxílio a locomoção é um algoritmo embarcado no exoesqueleto robótico Ortholeg 2.0, cuja finalidade, como o próprio nome diz, é auxiliar o usuário do exoesqueleto na locomoção em determinados percursos. Como o sistema é bastante amplo e envolve vários subsistemas, somente a parte do SAL responsável pelo planejamento dos passos baseado em comportamento humano observado será apresentado neste trabalho.

Vale salientar que ele faz um ajuste do tamanho do passo de forma autônoma, permitindo que o usuário consiga parar em um determinado ponto reproduzindo o comportamento humano observado na Fig. (2). Para que o usuário de um exoesqueleto robótico de membros inferiores, possa sair de um ponto inicial e parar exatamente em um ponto final este exoesqueleto deve ter a capacidade de ajustar o tamanho dos seus passos e preferencialmente que isto seja feita de forma mais natural possível.

Por questões de simplificação, foi definido no algoritmo do SAL que o os últimos cinco passos do trajeto sofrerão ajustes gradativos para se adaptar a trajetória, de modo que o usuário sempre pare o mais próximo possível do ponto almejado. Para que o usuário tenha a possibilidade de ver o planejamento do percurso, na sua forma mais simples, o SAL gera chamado *footstep print* que nada mais é que uma representação gráfica das pegadas ao longo do trajeto, onde é possível observar, como será a variação do tamanho do passo. Em situações onde o percurso é dotado de obstáculos diversos como buracos, degraus, rampas, dentre outros, o *footstep print* também informa o usuário se é possível ou não transpor tais obstáculos.

Em sua versão atual, o algoritmo não leva em conta o sexo na hora de definir alguns parâmetros iniciais da marcha como o tamanho do passo por exemplo, sendo um algoritmo genérico, servindo para usuários homens e mulheres. Além disso, o algoritmo gerar os ângulos de referência da marcha humana que são enviados para o sistema de controle do exoesqueleto que vai reproduzir os ângulos nas articulações do exoesqueleto robótico.

Na seção a seguir, serão apresentados como resultados o planejamento gerado pelo SAL para diferentes distâncias com o objetivo de apresentar as devidas semelhanças do planejamento de passos baseado no comportamento humano observado.

3. RESULTADOS

Nesta seção será apresentado o *footstep print*, como também o gráfico que apresenta a variação do tamanho do passo em função da distância percorrida ambos gerados pelo SAL. Para fim de comparação, foi inserido no algoritmo um tamanho de passo com 0,386 m para a região constante igual ao tamanho do passo médio mostrado na Tab. (2) que foi obtido com base nos dados dos grupos das mulheres para a distância de 4 metros.



A Figura (4) apresenta o planejamento da caminhada na forma do *foostep print* e também como foi a variação do tamanho do passo para a distância percorrida. Inicialmente o SAL parte do ponto inicial do trajeto com o usuário na posição ortostática, começando a marcha sempre com o pé direito e parando o mais próximo possível do ponto final também na posição ortostática.

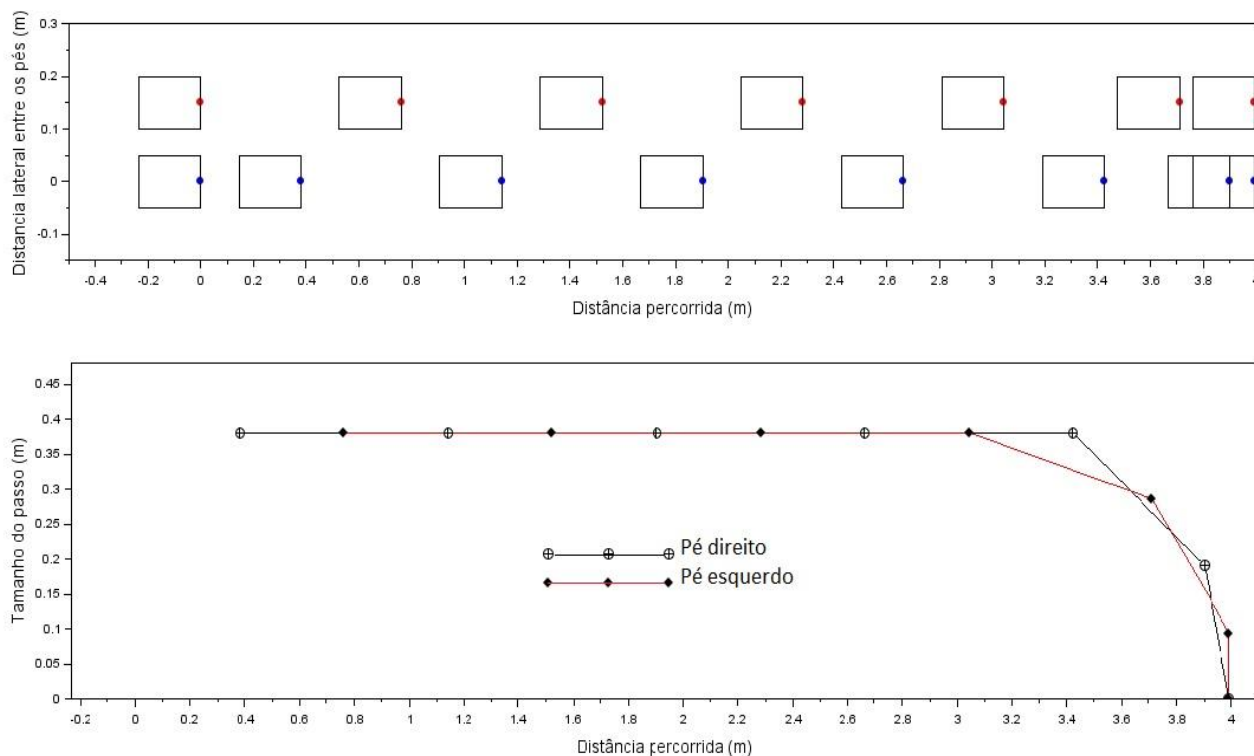


Figura 4. O gráfico superior mostra o *foostep print* para o trajeto de 4 metros e o gráfico inferior apresenta como é a variação do tamanho do passo em função do referido percurso.

No início do caminho, os primeiros passos têm o tamanho constante de 0,386 metros indicando a região com tamanho de passo constante e posteriormente esse valor é decrescido gradativamente na medida em que se aproxima do ponto final (distância de 4 metros) reproduzindo, de modo simplificado o comportamento observado nas Fig. (2) e Fig. (3).

4. CONCLUSÕES

A partir dos experimentos e dos resultados obtidos, foi possível observar que o comportamento da marcha humana ao longo de uma trajetória se divide em duas regiões (região com tamanho de passo constante e tamanho de passo variado). De acordo com o comportamento humano observado na primeira região o tamanho do passo não muda de forma expressiva e na região final é observado um decaimento gradativo do tamanho do passo, que se ajusta para finalizar o percurso.

Com base nestes comportamentos observado e nos dados coletados, foi desenvolvido um algoritmo (SAL) onde é feito o planejamento de passadas para um exoesqueleto robótico para membros inferiores, sendo ele capaz de ajustar, tanto o número quanto o tamanho do passo, para quaisquer distâncias de forma autônoma. Por definição, o SAL varia sempre os quatro últimos passos para finalizar o percurso parando sempre na posição ortostática. Além disso, o ajuste do tamanho do passo, na última fase do trajeto, garante que o usuário do exoesqueleto Ortholeg 2.0 seja capaz de parar o mais próximo possível do ponto final reproduzindo um comportamento antropomórfico e os resultados gerados pelo algoritmo, mesmo que simplificados, mantem, na essência, o comportamento humano observado.

5. REFERÊNCIAS

- ARAUJO, M.V et al. **Powered Orthosis Ortholeg: Design and Development**, Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE América Latina), vol. 13, no. 1, p. 90-95 doi: 10.1109/TLA.2015.7040633.
- FLORES, M.J.M. **Diseño y fabricación de um exoesqueleto robótico flexible para rehabilitación de extremidades inferiores em recién nacidos con espina bípida**. 2021. 145 f. Tesis (Carrera de Ingeniería Mecánica), Universidad de Ingeniería y Tecnología UTEC, Lima, 2021.



- NEVES, M.V.M. **Treinamento de marcha assistida por robô na reabilitação de AVC: um estudo piloto.** 2021. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.
- NASCIMENTO, L.B.P.; SANTOS, V.G.; PEREIRA, D.S.; FERNANDES, D.H.S.; et al. **Path Smoothing Strategy Based on Metaheuristic Algorithms for Probabilistic Foam**, Revista de Sistemas e Computação, Salvador, v. 10, p. 51-58, jan/abr. 2020.
- SANTOS, V.G.; NASCIMENTO, L.B.P.; PEREIRA, D.S.; FERNANDES, D.H.S.; et al. **Deteção e modelagem de rampas para órteses ativas usando uma câmera RGB-D.** 14º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI), 2019, Ouro Preto.
- SILVEIRA, L.S et al. **Relação entre a utilização de cinemetria interna e externa na análise da cinemática articular do joelho.** Salão de iniciação científica (18.: 2006: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.