

StepAmpute: Abordagem de Análise de Marcha de Amputados Baseado na Captura de Movimentos Ópticos Sem Marcadores

Jeam Carlos Braun¹, Tiago Rios Da Rocha¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - *Campus Ibirubá*
Rua Nelsi Ribas Fritsch, 1111 – CEP: 98200-000 – Ibirubá – RS – Brasil

Abstract. *Adapting to the use of prostheses is essential for the autonomy of amputees, whose gait often presents biomechanical alterations. This work proposed an accessible, computer vision-based approach to analyze gait, focusing on step symmetry and cadence through short videos recorded with mobile devices. Libraries such as OpenCV, Mediapipe, and Pandas were used to process data and generate reports. The results showed good accuracy, highlighting the tool's potential to support rehabilitation.*

Resumo. *A adaptação ao uso de próteses é fundamental para a autonomia de pessoas amputadas, mas a marcha desses indivíduos apresenta alterações biomecânicas. Este trabalho propôs uma abordagem acessível para análise da marcha baseada em visão computacional, focando na avaliação da simetria e cadência dos passos por meio de vídeos curtos capturados com celulares. Foram utilizadas bibliotecas como OpenCV, Mediapipe e Pandas para processar os dados e gerar relatórios. Os resultados indicaram boa precisão, demonstrando o potencial da ferramenta como apoio à reabilitação.*

Palavras-chave: Amputação, Análise de Marcha, Reabilitação, Visão Computacional, Simetria, Cadência, Amputação Transfemoral.

1. Introdução

O número de amputações vem crescendo de forma significativa em todo o mundo. No Brasil, entre 2020 e 2021, aproximadamente 56.513 brasileiros foram submetidos ao processo de amputação ou desarticulação de membros inferiores, conforme dados da Sociedade Brasileira de Angiologia e de Cirurgia Vasculare (SBACV) (GRANDA, 2022). As amputações de membros inferiores podem estar relacionadas a diversos fatores, sendo classificadas como congênitas ou adquiridas. Entre as causas adquiridas, destacam-se traumas (como acidentes de trabalho e de trânsito), infecções, neoplasias, doenças vasculares e diabetes (PRADA, 2014).

Para recuperar parte da autonomia e melhorar a qualidade de vida, muitos amputados recorrem ao uso de próteses, que são projetadas para restaurar funções motoras ou estéticas (COUTINHO, 2022). No entanto, mesmo com o uso desses dispositivos, a marcha do indivíduo geralmente apresenta alterações significativas. A necessidade de o membro artificial suportar o peso corporal e garantir mobilidade pode reduzir a velocidade da caminhada e gerar padrões compensatórios, como a flexão lateral do tronco. Com o tempo, tais padrões podem resultar em complicações secundárias, incluindo dores lombares, osteoartrite e osteoporose nas articulações do membro intacto (GAILEY et al., 2008).

Diante desse cenário, cresce a demanda por soluções acessíveis que apoiem o processo de reabilitação. A análise da marcha é uma ferramenta essencial para avaliar a adaptação à prótese, identificar assimetrias e prevenir complicações secundárias (GAILLEY et al., 2008). Em geral, essa avaliação é realizada visualmente por fisioterapeutas ou ortopedistas, sendo um método simples, mas limitado pela subjetividade e pela dificuldade de registrar detalhes com precisão (RIBEIRO, 2023).

Softwares especializados, por outro lado, oferecem análises precisas, especialmente aqueles que utilizam biofeedback com marcadores (ESPITIA-MORA; VÉLEZ-GUERRERO; CALLEJAS-CUERVO, 2024). Contudo, essas ferramentas são caras, complexas, e requerem equipamentos específicos, o que restringe seu uso a centros urbanos de maior porte. Em regiões menores, a escassez desses recursos limita o acompanhamento contínuo da reabilitação e pode comprometer a adaptação adequada.

Considerando esses desafios, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma solução prática e de baixo custo para a análise da marcha de indivíduos amputados, utilizando técnicas de visão computacional aplicadas a vídeos curtos gravados por dispositivos comuns, como smartphones. A proposta busca ampliar o acesso a ferramentas de avaliação da marcha sem a necessidade de marcadores físicos, oferecendo uma alternativa acessível tanto para profissionais de saúde quanto para pacientes.

A solução baseia-se na análise de vídeos que registram o corpo inteiro do indivíduo enquanto ele caminha em um ambiente controlado, com fundo estático e sem elementos visuais que interfiram na detecção dos movimentos. O foco recai sobre dois parâmetros fundamentais: simetria e cadência. Métricas biomecânicas mais complexas, como ângulos articulares ou força de impacto, estão fora do escopo desta etapa inicial do trabalho.

Os objetivos específicos deste estudo são: detectar e rastrear automaticamente pontos anatômicos de interesse, como os calcanhares e as pontas dos pés, por meio de técnicas de visão computacional; implementar algoritmos capazes de calcular métricas da marcha, como a cadência (em passos por minuto) e a simetria das passadas; validar os resultados obtidos comparando-os com métodos tradicionais de análise da marcha, como o software Kinovea; e, por fim, desenvolver visualizações gráficas interativas que auxiliem na análise e interpretação dos dados extraídos.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão bibliográfica; a Seção 3 discute os trabalhos relacionados; a Seção 4 descreve detalhadamente o trabalho desenvolvido; a Seção 5 expõe os resultados obtidos; e, por fim, a Seção 6 traz as conclusões do estudo, destacando as contribuições alcançadas e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Nesta seção, serão apresentados os conceitos teóricos relevantes para este trabalho, os quais incluem termos e definições como: Amputação (Seção 2.1), Próteses (Seção 2.2), Reabilitação (Seção 2.3), Análise de Marcha (Seção 2.4), Alterações biomecânicas na marcha de amputados (Seção 2.5), Cadência (Seção 2.6) e Simetria (Seção 2.7).

2.1. Amputação

A amputação é definida como a perda parcial ou total de um membro. Dependendo da localização da amputação, ela pode ser classificada em diferentes níveis, que determinam o tipo de prótese utilizada e as adaptações necessárias na marcha do paciente. Neste trabalho focaremos em 2 níveis, O nível transtibial ilustrado na Figura 1, refere-se a uma amputação que envolve a perda parcial da tíbia e da fíbula, mas preserva o joelho, o que possibilita ao paciente manter algumas funções motoras e sensitivas (O'SULLIVAN; SCHMITZ, 2010). Este nível permite um maior controle sobre a prótese, e resulta em uma marcha mais próxima do padrão normal. Em contrapartida, o nível transfemoral, conforme ilustrado na Figura 2, caracteriza-se pela amputação na parte distal do fêmur (O'SULLIVAN; SCHMITZ, 2010). Essa condição exige uma prótese mais complexa, e a reabilitação costuma ser mais desafiadora devido à adaptação necessária para o controle da prótese, impactando diretamente o padrão de marcha do paciente.

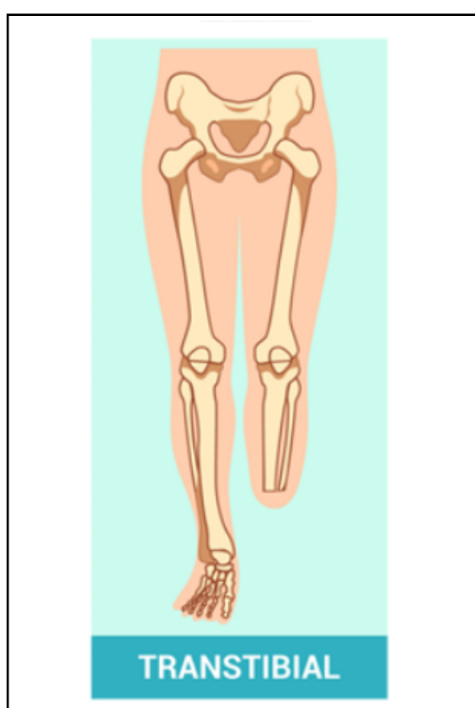


Figura 1. Nível de amputação Transtibial

Fonte: Adaptado de (RIBEIRO, 2023).

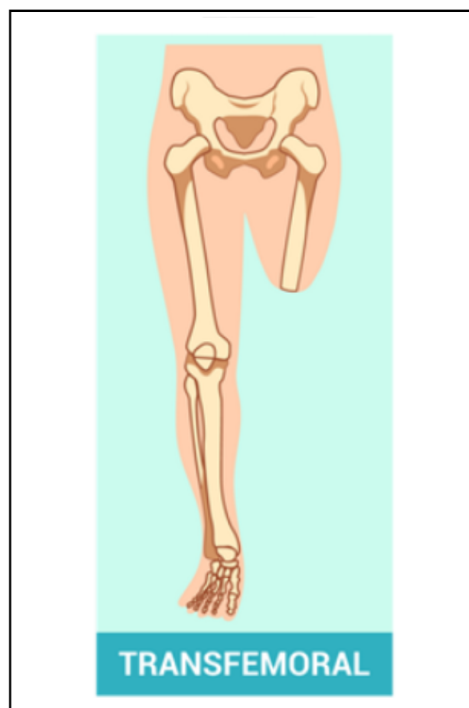


Figura 2. Nível de amputação Transfemoral

Fonte: Adaptado de (RIBEIRO, 2023).

2.2. Prótese

Uma prótese é um dispositivo acoplado ao corpo humano para substituir a ausência de uma parte do corpo perdida, permitindo recuperar, em diferentes níveis, a mobilidade e funcionalidade dos membros ausentes (CASTANEDA, 2021). As próteses são divididas em dois tipos principais: endoesqueléticas ilustrado na Figura 3 que oferecem maior liberdade no alinhamento e mobilidade e exoesqueléticas ilustrado na Figura 4 são estruturas mais simples com a principal função de parecer uma perna e com menor mobilidade (COUTINHO, 2022). A escolha da prótese é adaptada conforme as necessidades

específicas de cada usuário. Próteses transtibiais, por exemplo, são projetadas para substituir membros abaixo do joelho, enquanto próteses transfemorais substituem a coxa e o joelho em casos de amputação acima do joelho. Esses dispositivos podem incluir articulações mecânicas, sensores e, em casos mais avançados, sistemas de controle eletrônico que respondem aos sinais musculares do usuário, proporcionando um movimento mais natural e responsivo (COUTINHO, 2022).



Figura 3. Prótese endoesquelética com joelho C-LEG 4
Fonte: Elaborado pelos autores.



Figura 4. Prótese exoesquelética fornecida pelo SUS
Fonte: Elaborado pelos autores.

2.3. Reabilitação

Os pacientes amputados passam por um processo de reabilitação que visa a recuperação da mobilidade e da funcionalidade. Trata-se de um processo dinâmico, que deve ser personalizado conforme as necessidades de cada indivíduo. A elaboração de um plano de reabilitação e a escolha da prótese mais adequada dependem de diversos fatores, como idade, nível de mobilidade, amplitude de movimento, comprimento do membro residual e força muscular (O’SULLIVAN; SCHMITZ, 2010). A reabilitação costuma envolver treinos frequentes, com ênfase na adaptação ao uso da prótese e na correção de padrões de marcha atípicos, aspectos essenciais para promover maior independência e melhorar a qualidade de vida.

2.4. Análise de marcha

A análise da marcha pode ser realizada de forma visual ou com tecnologias avançadas, como câmeras de alta definição, marcadores reflexivos e plataformas de força, que compõem a análise tridimensional (3D) e oferecem dados precisos, embora com alto

custo e complexidade (COUTINHO, 2022; O’SULLIVAN; SCHMITZ, 2010). Como alternativa, a análise bidimensional (2D) utiliza apenas uma câmera posicionada lateralmente para capturar o movimento no plano sagital, permitindo observar parâmetros como o comprimento da passada, tempo de cada passo e possíveis assimetrias, sendo uma solução mais acessível e prática, especialmente em contextos com recursos limitados (COUTINHO, 2022).

2.5. Análise das alterações biomecânicas na marcha em amputados

A amputação de membros inferiores causa alterações significativas na biomecânica da marcha, impactando diretamente a forma como o corpo se movimenta e mantém o equilíbrio. Essas mudanças são influenciadas pelo nível da amputação, nas amputações transfemorais para Ribeiro (2017) eles apresentam alterações biomecânicas de marcha nos parâmetros de velocidade, cadência, simetria de marcha menores que não amputados, onde o membro intacto realiza movimentos diferentes em comparação com o membro protetizado. Isso ocorre porque a falta de um membro afeta a capacidade do corpo de gerar forças adequadas para impulsionar o movimento e manter a estabilidade durante o ciclo da marcha. Como resultado, o lado não amputado frequentemente assume uma carga maior, levando a um padrão de marcha assimétrico e, muitas vezes, mais sobrecarregado (O’SULLIVAN; SCHMITZ, 2010).

2.6. Cadência

A cadência é uma das principais variáveis temporais utilizadas na análise da marcha, representando o número de passos realizados por minuto. Essa métrica permite avaliar o ritmo da caminhada e é frequentemente utilizada para monitorar o progresso na reabilitação de indivíduos amputados, além de identificar padrões assimétricos ou irregulares na marcha.

A Equação (1) define o cálculo da cadência com base na frequência dos passos durante a caminhada. O número total de passos, representado por **Passos Contados**, é dividido pelo tempo total da marcha, em segundos (**Tempo(s)**). O resultado é então multiplicado por **60**, convertendo o tempo para minutos e expressando a cadência em passos por minuto (ppm) (COUTINHO, 2022).

$$\text{Cadência (passos/min)} = \frac{\text{Passos Contados} \times 60}{\text{Tempo (s)}} \quad (1)$$

2.7. Simetria

A simetria da marcha é um indicador importante na análise de marcha, especialmente em indivíduos amputados. Ela se refere ao grau de semelhança entre os movimentos dos membros inferiores durante a locomoção. Alterações na simetria podem estar associadas à má adaptação à prótese, desequilíbrios musculares ou compensações posturais, podendo impactar negativamente a eficiência da marcha e a saúde do membro intacto.

Neste trabalho, a simetria foi avaliada por meio da comparação das distâncias entre o calcanhar de um pé e a ponta do pé oposto, calculadas a partir de cada frame do vídeo. Essas distâncias correspondem ao tamanho da passada em cada direção, e são obtidas

com base na fórmula da distância euclidiana no plano cartesiano, conforme Equações (2) e (3).

$$\text{Distância CE-PPD} = \sqrt{(\text{PPD}_x - \text{CE}_x)^2 + (\text{PPD}_y - \text{CE}_y)^2} \quad (2)$$

$$\text{Distância CD-PPE} = \sqrt{(\text{PPE}_x - \text{CD}_x)^2 + (\text{PPE}_y - \text{CD}_y)^2} \quad (3)$$

Variáveis: PPD_x , PPD_y são as coordenadas x e y da ponta do pé direito. CE_x , CE_y são as coordenadas x e y do calcanhar esquerdo. PPE_x , PPE_y são as coordenadas x e y da ponta do pé esquerdo. CD_x , CD_y são as coordenadas x e y do calcanhar direito.

Após calcular as distâncias em cada frame, é possível avaliar a simetria comparando os valores obtidos ao longo do tempo. Uma marcha simétrica tende a apresentar valores semelhantes entre as duas direções. Já discrepâncias relevantes entre as distâncias indicam assimetrias, que podem sinalizar a necessidade de intervenções clínicas ou ajustes na prótese durante o processo de reabilitação.

3. Trabalhos Relacionados

Nesta seção, são apresentados alguns trabalhos que possuem relação com o projeto proposto.

O primeiro trabalho Schurr et al. (2017) comparou medições quantitativas de tarefas funcionais das extremidades inferiores utilizando técnicas em 2D e 3D. Foram analisados 26 adultos saudáveis, onde foram gravados três testes de agachamento com uma perna, observando o deslocamento das articulações do tronco, quadril, joelho e tornozelo nos planos frontal e sagital, durante a execução de uma tarefa em comparação à posição em pé sobre uma perna. Os resultados indicam que, embora as medições 2D apresentem limitações em termos de precisão e na captura de rotações, elas oferecem um método pragmático para avaliar o deslocamento articular no plano sagital. a diferença média dos resultados foi comparável ao erro padrão de medida com goniometria.

O segundo trabalho Coutinho (2022) propoem o desenvolvimento de um software para análise da marcha de amputados de membro inferior focado para procedimentos de alinhamento de próteses mais objetivo e prático para os técnicos de ortoprotesia. Para analisar foi utilizado um smartphone, marcadores de 2 cm colocados nos pés, joelhos, quadril, ombros, cotovelos e braços e foi usado o aplicativo Kinovea após a configuração ele salvou os dados de cada frame em um arquivo csv e através do aplicação web na linguagem python com as seguintes funcionalidades, importar o arquivo csv, escolha do nível de amputação, perna amputada, plano de análise, distância dos marcadores, análise, resumo e gráficos dos resultados. O autor analisou a marcha de 10 amputados, 3 transfemorais e 7 transtibiais, onde em todos foi encontrado algum desvio, no entanto a maioria apresentou um padrão de marcha relativamente estável.

O terceiro trabalho Espitia-Mora, Vélez-Guerrero e Callejas-Cuervo (2024) uma abordagem inovadora para a análise de marcha por meio de um sistema de captura de movimento utilizando a linguagem python sem marcadores, acessível e de baixo custo. Utilizando câmeras de profundidade e técnicas avançadas de processamento de imagem,

o sistema captura os movimentos corporais em tempo real, dispensando equipamentos caros. A pesquisa valida a eficácia do método em comparação com sistemas tradicionais, destacando sua capacidade de identificar pontos articulares e medir variáveis críticas da marcha. Essa solução tem potencial para ser aplicada em clínicas de fisioterapia e laboratórios de pesquisa, oferecendo uma ferramenta acessível para profissionais da saúde e pesquisadores, beneficiando um amplo espectro de usuários, incluindo amputados e pessoas com distúrbios de mobilidade.

A tabela 1 apresenta um comparativo entre os artigos voltados para a análise de marcha. Esse levantamento busca evidenciar as principais características, vantagens e limitações das ferramentas disponíveis, servindo como base para justificar a escolha e o desenvolvimento do sistema proposto neste trabalho.

Tabela 1. Comparativo entre artigos de Análise de Marcha

Artigo	Equipamento Necessário	Análise Realizada	Erro Reportado
Trabalho 1 (SCHURR et al., 2017)	Câmeras, sistema de captura de movimento 3D (Flock of Birds)	Comparação de deslocamentos articulares nos planos frontal e sagital	Não informado
Trabalho 2 (COUTINHO, 2022)	Marcadores no corpo, smartphone, software Kinovea	Análise da marcha de amputados focada no alinhamento de próteses	Erro médio absoluto de 1,89%
Trabalho 3 (ESPITIA-MORA; VÉLEZ-GUERRERO; CALLEJAS-CUERVO, 2024)	Câmera de profundidade estéreo Intel D415, esteira (opcional)	Quantificação de parâmetros antropométricos e da marcha	Desvio médio absoluto de 3,14%

Fonte: Elaborado pelos autores.

A proposta deste projeto se diferencia dos trabalhos apresentados ao focar em uma solução simples e acessível, utilizando câmeras de celular e sem a necessidade de marcadores físicos ou equipamentos caros. Enquanto os estudos de Escamilla-Nunez, Michelini e Andrysek (2020) e Coutinho (2022) envolvem sistemas mais complexos e equipamentos específicos para reabilitação e análise de amputados, o projeto propõe uma análise mais prática e voltada para a simplicidade, concentrando-se na simetria, cadência. Além disso, assim como o trabalho de Espitia-Mora, Vélez-Guerrero e Callejas-Cuervo (2024), que utiliza técnicas de baixo custo e captura sem marcadores, a proposta busca uma solução eficiente e acessível, mas com um foco mais específico nas características da marcha sem a complexidade de sistemas 3D.

4. StepAmpute: Abordagem Proposta

O nome StepAmpute foi atribuído à ferramenta desenvolvida neste trabalho, cujo objetivo é analisar a marcha de indivíduos amputados por meio de vídeos. A nomenclatura

combina os termos “step” (passo) e “ampute” (amputado), refletindo a proposta central do sistema: fornecer uma análise automatizada, acessível e objetiva da simetria e da cadência dos passos.

A Figura 5 apresenta o fluxograma completo das etapas do trabalho desenvolvido. O processo tem início com a gravação de vídeos curtos da marcha, capturados lateralmente em um ambiente controlado. Em seguida, aplica-se visão computacional para extrair, quadro a quadro, pontos anatômicos relevantes como calcanhar e ponta do pé. Os dados obtidos são exportados em formato `.csv` e, posteriormente, submetidos a etapas de limpeza e filtragem utilizando filtros digitais, com o objetivo de reduzir ruídos e aprimorar a qualidade dos sinais. Por fim, os dados tratados são utilizados para a geração de gráficos analíticos, permitindo uma avaliação visual e quantitativa da marcha, o que facilita a identificação de assimetrias e padrões importantes para o processo de reabilitação.



Figura 5. Etapas do StepAmpute para Análise de Marcha

Fonte: Elaborado pelos autores.

Gravação dos vídeos: Os vídeos utilizados no sistema foram capturados com a câmera de um smartphone, a uma distância aproximada de 5 metros do paciente. A gravação foi realizada em ambientes com boa iluminação e fundo estático, com o smartphone em modo paisagem, garantindo a nitidez das imagens e a estabilidade da cena. Durante a gravação, o amputado caminhou da esquerda para a direita (como ilustrado na Figura 5, representado pelo número 1), enquanto o celular permaneceu fixo no lado oposto (número 2), capturando toda a trajetória da marcha.

Extração de pontos anatômicos: Após a captura dos vídeos, o algoritmo desenvolvido em Python foi responsável por processar os dados e realizar a extração dos pontos anatômicos relevantes. Foram utilizadas bibliotecas específicas como *OpenCV* (CV2), para leitura e manipulação dos vídeos frame a frame, e *Mediapipe*, para detecção e rastreamento dos marcos corporais. Essa etapa, representada pelo número 3 na Figura 5, permitiu identificar as coordenadas (X, Y) dos calcanhares e das pontas dos pés em cada quadro do vídeo.

A Figura 6 ilustra um exemplo de frame capturado durante esse processo, com a sobreposição automática dos pontos anatômicos identificados pelo algoritmo, evidenciando a eficácia da detecção mesmo com vídeos gravados em ambiente comum, com uso de câmera de smartphone.



Figura 6. Exemplo de frame capturado do vídeo, com os pontos anatômicos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Limpeza e filtragem dos dados: Para melhorar a qualidade dos dados coletados, foi aplicada uma filtragem utilizando a biblioteca *SciPy*, representada na Figura 5 pelo número 5. O filtro utilizado foi um filtro Butterworth, com frequência de corte de 5 Hz e frequência de amostragem de 30 Hz. Esse tipo de filtro é eficiente na atenuação de ruídos de alta frequência e suaviza os sinais sem comprometer as características principais do movimento. A filtragem foi aplicada nas distâncias entre os pontos anatômicos dos pés, permitindo maior suavidade nas curvas geradas e maior clareza na visualização dos padrões de marcha. Essa etapa contribuiu para uma análise mais robusta e para a diminuição de falsos positivos nas detecções dos marcos corporais.

Geração de gráficos analíticos: Os dados filtrados foram utilizados para a criação de gráficos interativos por meio da biblioteca *Plotly*, como representado pelo número 6 na Figura 5. Essa etapa permitiu visualizar informações cruciais como simetria, cadência e tempo de apoio de cada perna. A interface interativa dos gráficos facilitou a análise permitindo uma exploração visual dinâmica e intuitiva dos dados de marcha.

5. Resultados Experimentais

Para validar o sistema desenvolvido, foram analisados três vídeos de um paciente do sexo masculino, com 23 anos, amputado transfemoral do membro inferior direito. No primeiro vídeo, o paciente utilizava uma prótese fornecida pelo Sistema Único de Saúde (SUS) e vestia calção. No segundo, usava uma prótese com joelho eletrônico C-Leg 4 e pé Taleo, também com calção. No terceiro, manteve a mesma configuração protética, porém vestindo calça.

Os resultados gerados automaticamente pelo StepAmpute foram comparados àqueles obtidos manualmente por meio do software Kinovea, ferramenta amplamente utilizada na análise de movimento, embora com maior dependência do operador. A validação considerou a maior distância entre a ponta do pé e o tornozelo contralateral ao longo do ciclo da marcha.

A Figura 7 apresenta uma comparação gráfica entre os valores extraídos pelos dois métodos. Observa-se que, para ambas as próteses avaliadas, tanto a fornecida pelo SUS quanto a C-Leg 4, os dados seguem tendências semelhantes, indicando concordância entre as medições manuais e automáticas. Essa representação visual reforça a confiabilidade do sistema proposto, evidenciando seu potencial como ferramenta eficaz para a análise automatizada da marcha.

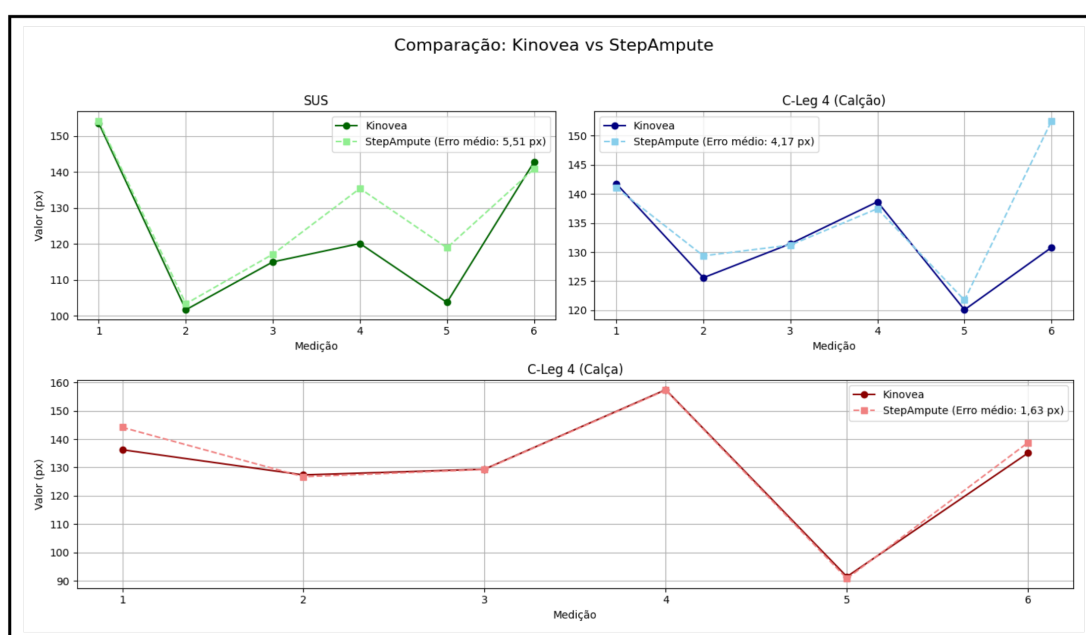


Figura 7. Comparação gráfica entre medições do Kinovea e do StepAmpute

Fonte: Elaborado pelos autores.

Além da representação visual, os dados também foram analisados de forma quantitativa, considerando a diferença média entre os métodos. Esses valores estão sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2. Diferença média entre as medições do StepAmpute e do Kinovea

Condição	Diferença Média (pixels)
Prótese SUS (Calção)	5,51
C-Leg 4 (Calção)	4,17
C-Leg 4 (Calça)	1,63

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em termos quantitativos, a Tabela 2 apresenta as diferenças médias entre os va-

lores obtidos automaticamente pelo StepAmpute e aqueles registrados manualmente no Kinovea para cada uma das condições analisadas. Observa-se que a maior discrepância ocorreu com a prótese fornecida pelo SUS (5,51 *pixels*), seguida pela C-Leg 4 com calção (4,17 *pixels*) e, por fim, a C-Leg 4 com calça (1,63 *pixels*). Esses resultados indicam boa precisão do sistema automatizado, com desempenho ainda mais consistente quando há menor interferência visual, como ocorre com o uso de vestimentas ajustadas, que possivelmente favorecem a identificação dos pontos anatômicos relevantes.

A Tabela 3 apresenta os valores médios de cadência, expressos em passos por minuto, bem como as médias das distâncias entre os pés, considerando a maior e a menor separação entre os pontos anatômicos monitorados durante a marcha. Esses dados oferecem uma visão quantitativa sobre o desempenho e a estabilidade proporcionados pelos diferentes dispositivos. Observa-se que a melhor simetria e controle motor foram obtidos com a prótese C-Leg 4 associada ao uso de calça, o que pode estar relacionado à menor interferência visual no processo de detecção.

Tabela 3. Comparação dos resultados entre as próteses analisadas

Análise	Cadência (passos/min)	Média Pés Fora (px)	Média Pés Dentro (px)
Prótese do SUS	92,80	201,78	117,34
C-Leg 4 (Calção)	112,08	235,71	132,61
C-Leg 4 (Calça)	89,53	269,52	134,88

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base nos dados apresentados, observa-se que a maior cadência foi registrada com o uso da prótese C-Leg 4 em conjunto com calção, sugerindo maior fluidez e dinamismo durante a marcha. Por outro lado, a menor cadência ocorreu com o uso da mesma prótese associada à calça, embora acompanhada dos maiores valores médios de afastamento entre os pés. Essa combinação indica uma passada mais ampla e estável, mesmo com menor frequência de passos. A prótese fornecida pelo SUS apresentou uma cadência intermediária, porém associada a menores distâncias médias entre os pés, o que pode refletir um padrão de marcha mais restrito, provavelmente limitado pelas características mecânicas do dispositivo.

Além da análise numérica apresentada na Tabela 3, foram elaborados gráficos que ilustram a simetria entre os passos do pé direito e do pé esquerdo ao longo do tempo. As Figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos com a prótese fornecida pelo SUS e com a C-Leg 4 acompanhada de calça. Nesses gráficos, a linha verde representa a distância entre o calcanhar direito e a ponta do pé esquerdo, correspondente à perna amputada. A linha azul, por sua vez, representa a distância entre o calcanhar esquerdo e a ponta do pé direito.

Essas representações visuais permitem uma observação intuitiva do padrão de movimento dos membros inferiores, das variações de cadência e da regularidade da marcha. A análise gráfica complementa os dados numéricos, reforçando as diferenças de desempenho, simetria e estabilidade entre os dois dispositivos avaliados.

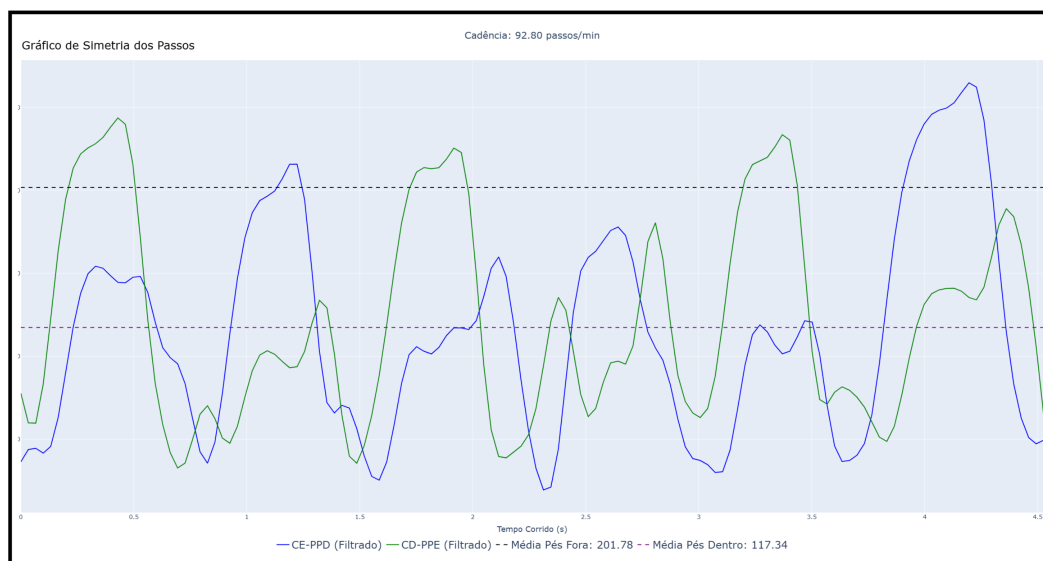


Figura 8. Resultados com a prótese fornecida pelo SUS

Fonte: Elaborado pelos autores.

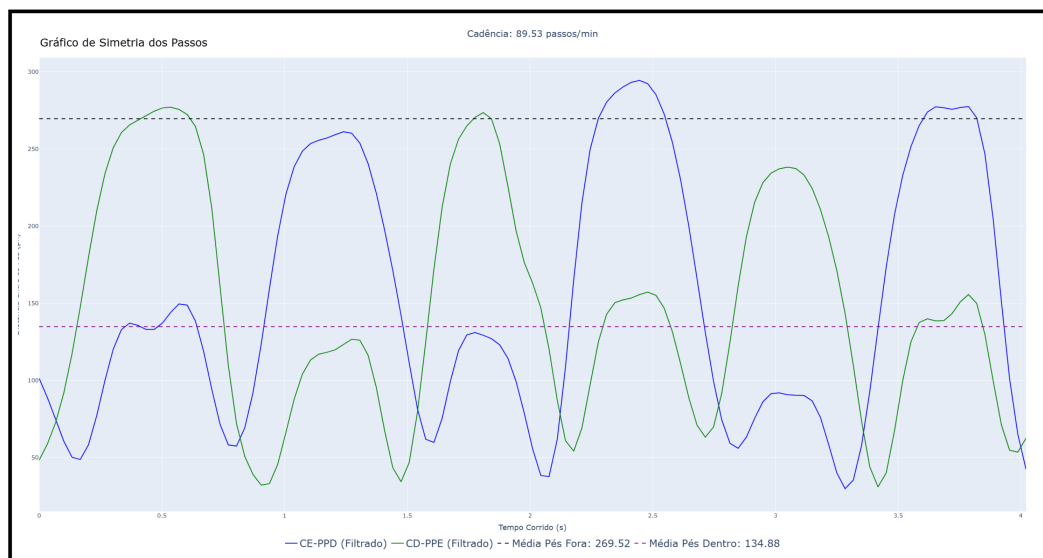


Figura 9. Resultados com a prótese C-Leg 4 (Calça)

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir da análise visual dos gráficos, é possível identificar padrões distintos de marcha associados a cada prótese. A configuração com a prótese fornecida pelo SUS apresentou maior irregularidade nas curvas de distância entre os pés, indicando menor controle motor e menor regularidade na cadência. Por outro lado, a prótese C-Leg 4 utilizada com calça evidenciou excelente estabilidade e maior amplitude entre os passos, favorecendo a simetria e a precisão na detecção dos marcos corporais. Esses resultados reforçam tanto a eficácia do sistema automatizado proposto quanto a influência direta do tipo de prótese e da vestimenta no padrão de marcha analisado.

6. Conclusão

Neste trabalho, foi desenvolvido uma abordagem de análise de marcha baseado em vídeo, com foco na extração automática de dados relacionados à cadência e à simetria dos passos de indivíduos amputados. A solução empregou técnicas de visão computacional, utilizando as bibliotecas *Mediapipe* e *OpenCV* para detectar e rastrear pontos-chave dos membros inferiores em vídeos capturados por dispositivos móveis. Os dados espaciais extraídos de cada frame foram organizados em arquivos CSV com o auxílio da biblioteca *Pandas*, permitindo a posterior geração de gráficos e cálculos de métricas biomecânicas.

Os resultados demonstraram que é viável realizar uma análise quantitativa da marcha utilizando apenas recursos computacionais de código aberto e vídeos gravados com um celular. O sistema foi capaz de detectar pontos anatômicos com boa consistência, calcular a cadência, analisar a simetria dos passos e apresentar visualizações intuitivas.

A comparação entre os dados extraídos pelo sistema automatizado e os obtidos pelo software de referência Kinovea indicou uma boa proximidade entre os resultados, com diferenças médias de 5,51 *pixels* para a prótese fornecida pelo SUS, 4,17 *pixels* para a C-Leg 4 (Calção) e apenas 1,63 *pixels* para a C-Leg 4 (Calça). Tais valores reforçam a precisão da metodologia e indicam sua aplicabilidade como ferramenta auxiliar em ambientes clínicos de reabilitação.

Na análise comparativa, a prótese C-Leg 4 (Calção) apresentou cadência de 112,08 passos por minuto, com médias de 235,71 *pixels* (pé fora) e 132,61 *pixels* (pé dentro). A C-Leg 4 (Calça) registrou cadência menor, de 89,53 passos por minuto, com médias de 269,52 e 134,88 *pixels*, influenciada pelo ritmo mais lento do paciente no vídeo. A prótese fornecida pelo SUS teve cadência de 92,80 passos por minuto e médias de 201,78 (pé fora) e 117,34 *pixels* (pé dentro). Esses dados indicam que a C-Leg 4 promove marcha mais próxima da fisiológica, com maior simetria e controle motor.

Durante o desenvolvimento do sistema, foram identificadas algumas limitações que impactaram diretamente sua performance. A principal delas esteve relacionada à biblioteca *Mediapipe*, que apresentou dificuldades na detecção precisa dos pontos anatômicos quando o paciente utilizava prótese de forma visível, especialmente em vídeos com deslocamento mais rápido. Nesses casos, a segmentação do membro protético foi menos eficaz, o que resultou em pequenas falhas na continuidade da detecção dos marcos corporais ao longo dos frames.

Outra limitação importante esteve na aplicação dos filtros de suavização. Embora essenciais para tornar os gráficos mais compreensíveis e atenuar ruídos oriundos de instabilidades nos vídeos ou falhas de rastreamento, os filtros aplicados, como o Butterworth passa-baixa que introduziram pequenas distorções nos valores originais. Foi necessário realizar diversos testes com diferentes combinações de parâmetros (frequência de corte e ordem do filtro) até atingir um equilíbrio entre fidelidade dos dados e legibilidade dos resultados visuais.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a criação de um banco de dados com vídeos de marcha de pessoas amputadas, abrangendo diferentes níveis de amputação, tipos de prótese, padrões de marcha e variações de terreno. Esse acervo permitirá o treinamento de algoritmos de inteligência artificial mais generalizáveis, facilitando a detecção automática de assimetrias e anormalidades na locomoção. Além disso, pretende-se in-

corporar variáveis biomecânicas avançadas, como ângulos articulares, tempos de apoio e oscilação, e análise conjunta dos segmentos corporais. Essas melhorias visam transformar o stepampute em uma ferramenta clínica robusta para apoiar diagnósticos, reabilitação e adaptação de próteses.

Referências

CASTANEDA, L. Próteses de membros superiores e inferiores: indicações e confecção. *São Luís In: UNIVERSIDADE ABERTA DO SUS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO*, 2021.

COUTINHO, T. M. C. Software para a análise da marcha em amputados de membro inferior. *Escola Católica superior de biotecnologia de Porto*, p. 1–109, 2022. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.14/41111>>.

ESCAMILLA-NUNEZ, R.; MICHELINI, A.; ANDRYSEK, J. Biofeedback systems for gait rehabilitation of individuals with lower-limb amputation: A systematic review. *Sensors*, v. 20, n. 6, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/6/1628>>.

ESPITIA-MORA, L. A.; VÉLEZ-GUERRERO, M. A.; CALLEJAS-CUERVO, M. Development of a low-cost markerless optical motion capture system for gait analysis and anthropometric parameter quantification. *Sensors*, MDPI, v. 24, n. 11, p. 3371, 2024.

GAILEY, R. et al. Review of secondary physical conditions associated with lower-limb amputation and long-term prosthesis use. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, v. 45, n. 1, 2008.

GRANDA, A. *A cada hora, 3 brasileiros sofrem amputação de pernas ou pés*. 2022. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2022-06/cada-hora-3-brasileiros-sofrem-amputacao-de-pernas-ou-pes#:~:text=Entre%202020%20e%202021%2C%20em,m%C3%A9dia%20de%2077%2C4%20cirurgias.>> Último acesso em: 25/06/2022.

O'SULLIVAN, S. B.; SCHMITZ, T. J. *Fisioterapia: avaliação e tratamento*. São Paulo: Manole, 2010.

PRADA, L. M. Análise cinemática da marcha de amputados transfemorais pré e pós a aplicação de um protocolo de reabilitação. *São Paulo, Brazil: Hospital das Clinicas da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto*, 2014.

RIBEIRO, A. S. Análise das alterações biomecânicas na marcha em amputados transfemorais: Revisão bibliográfica. [sn], 2017.

RIBEIRO, L. C. Principais recomendações e exercícios na fase pós-cirúrgica de uma pessoa amputada. In: UNIVERSIDADE ABERTA DO SUS, UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO. *Atenção à Pessoa com Deficiência I: Pessoa amputada*. São Luís: UNA-SUS; UFMA, 2023.

SCHURR, S. A. et al. Two-dimensional video analysis is comparable to 3d motion capture in lower extremity movement assessment. *International journal of sports physical therapy*, North American Sports Medicine Institute, v. 12, n. 2, p. 163, 2017.