SENSORES VESTÍVEIS E IOT NO MONITORAMENTO DA MARCHA DE USUÁRIOS DE PRÓTESES DE MEMBRO INFERIOR

Bianca Sampaio Paulo, Marcello Scarpel Contini.

Universidade do Vale do Paraíba, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, **bsampaiopaulo@gmail.com**

Resumo

Sensores vestíveis permitem avaliar a marcha fora de laboratórios e representam uma base tecnológica importante para sistemas conectados de reabilitação. Este trabalho teve como objetivo analisar o papel de unidades de medida inercial (IMU), sensores de pressão e eletromiografia (EMG) no monitoramento de usuários de próteses de membro inferior e discutir sua integração em uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT). Foi realizada revisão narrativa estruturada de estudos sobre análise da marcha, detecção de eventos, controle protético e monitoramento conectado. Os estudos mostram que IMUs são amplamente utilizadas para identificação de eventos e assimetrias, sensores de pressão fornecem informação sobre contato e carga e o EMG acrescenta informação relacionada à intenção motora, embora apresente maior sensibilidade a variabilidade e ruído. A literatura específica sobre IoT destaca a necessidade de sincronização, processamento em borda, conectividade segura e gerenciamento energético. Com base nesses achados, propõe-se uma arquitetura conceitual com aquisição multimodal, processamento local e transmissão para uma plataforma de acompanhamento. Conclui-se que a integração é promissora, mas exige validação clínica, interoperabilidade, segurança e privacidade.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Sensores vestíveis. Marcha. Próteses. Engenharia Biomédica.
Área do Conhecimento: Engenharias - Engenharia Biomédica.
Natureza do Trabalho: Trabalho de Disciplina.

Introdução

A análise da marcha é uma ferramenta relevante para avaliar a mobilidade, adaptação protética e resposta ao processo de reabilitação de pessoas com amputação de membro inferior. Sistemas laboratoriais baseados em câmeras e plataformas de força fornecem medidas detalhadas, porém apresentam custo elevado e restringem a avaliação a ambientes controlados. Sensores vestíveis oferecem uma alternativa portátil para registrar o movimento durante tarefas funcionais e, potencialmente, no cotidiano do usuário.

Entre as tecnologias mais utilizadas estão as unidades de medida inercial (IMU), que medem aceleração e velocidade angular; sensores de pressão, capazes de caracterizar contato e carga; e a eletromiografia (EMG), associada à ativação muscular e à intenção motora. Estudos com usuários de próteses demonstram que IMUs podem identificar eventos e assimetrias da marcha (Bastas et al., 2018; Clemens et al., 2020), enquanto sensores de pressão podem auxiliar na classificação de fases e na avaliação mecânica da interface entre usuário e prótese (Liu et al., 2024). Em aplicações de controle, a literatura também investiga EMG isoladamente ou em fusão com sinais mecânicos (Ahkami et al., 2023).

A Internet das Coisas (IoT) acrescenta a possibilidade de conectar esses sensores a unidades de processamento, dispositivos móveis e serviços remotos. Entretanto, utilizar sensores vestíveis não torna um sistema automaticamente uma solução IoT. Uma arquitetura conectada precisa contemplar aquisição, sincronização, processamento, comunicação, armazenamento e segurança dos dados. Revisões sobre avaliação habitual da marcha destacam justamente a passagem do sensor isolado para infraestruturas capazes de processar dados na borda e transmiti-los para acompanhamento remoto (Young et al., 2023). Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a contribuição de IMU, pressão e EMG para o monitoramento de usuários de próteses de membro inferior e, a partir da literatura, propor uma arquitetura conceitual de IoT coerente com os requisitos desta aplicação.

Metodologia

Foi realizada revisão de literatura, com busca atualizada em agosto de 2026 nas bases PubMed/MEDLINE, IEEE Xplore e Google Scholar. Foram empregados os termos "gait analysis", "lower limb prosthesis", "inertial measurement unit", "pressure sensor", "electromyography", "wearable sensor" e "Internet of Things", isoladamente e em combinações relacionadas ao objetivo. Foram considerados dois grupos de publicações: estudos que caracterizam o desempenho dos sensores na marcha e estudos que discutem detecção em tempo real, controle protético ou arquiteturas conectadas.

A inclusão dos dois grupos foi adotada porque uma arquitetura IoT depende da definição prévia das variáveis que cada sensor consegue medir e do processamento necessário para convertê-las em informação útil. Foram priorizados estudos com usuários de próteses e revisões relevantes para aplicações de marcha em tempo real. Estudos com indivíduos sem amputação ou com robôs assistivos foram utilizados somente quando contribuem para aspectos tecnológicos de fusão sensorial ou processamento, sem extrapolação direta para a população amputada. A síntese final utilizou dez publicações diretamente discutidas e foi organizada segundo função do sensor, requisitos de processamento e posição potencial na arquitetura conectada.

Resultados

As IMUs constituem a tecnologia com maior maturidade para monitoramento portátil da marcha. Na revisão sistemática de Prasanth et al. (2021), 1.262 publicações foram identificadas e 113 analisadas em texto completo; as IMUs foram os sensores vestíveis mais utilizados, embora menos de um terço dos métodos tivesse sido validado com marcha patológica. Esse resultado é importante porque demonstra elevada disponibilidade tecnológica, mas também uma lacuna entre desempenho experimental e validação em populações clínicas.

Em usuários de próteses, Bastas et al. (2018) avaliaram 33 participantes com prótese de membro inferior e 14 controles, comparando algoritmos baseados em uma IMU lumbopélvica. Os autores observaram que a escolha do algoritmo altera a qualidade das métricas espaço-temporais e que um método baseado no cruzamento por zero da aceleração anteroposterior apresentou melhor desempenho que a detecção por picos. Clemens et al. (2020), por sua vez, utilizaram sensores inerciais para caracterizar simetria e repetibilidade em pessoas com amputação unilateral, demonstrando que medidas segmentares acrescentam informação sobre diferenças entre níveis de amputação e entre os membros.

Os sensores de pressão acrescentam uma dimensão complementar. Liu et al. (2024) propuseram um sistema vestível com sensores de filme fino para análise de fases da marcha em pessoas com amputação femoral, incluindo aquisição, redução de ruído, extração de características e classificação por máquina de vetores de suporte. Para aplicações protéticas, esse tipo de informação pode contribuir para a detecção de eventos e para a avaliação da interação mecânica entre usuário e dispositivo.

O EMG apresenta interesse especial quando o objetivo deixa de ser apenas monitorar a marcha e passa a incluir inferência de intenção motora. Em seis usuários com amputação transfemoral, Wentink et al. (2014) observaram que sinais de EMG do membro protético podiam antecipar o início do movimento em até 138 ms quando a perna protética iniciava a marcha, mostrando potencial para complementar sensores inerciais. Entretanto, revisões de controle mioelétrico ressaltam que estabilidade do sinal, posicionamento dos eletrodos, variação entre sessões e robustez ainda dificultam a aplicação cotidiana em próteses de membro inferior (Ahkami et al., 2023).

Tabela 1 - Contribuições e limitações dos sensores analisados.

Sensor	Contribuição principal	Limitações para integração
IMU	Eventos da marcha, aceleração, velocidade angular, simetria e características cinemáticas.	Deriva, posicionamento, calibração e dependência do algoritmo.
Pressão	Contato, distribuição de carga, identificação de fases e informação mecânica na interface usuário-prótese.	Histerese, ruído, desgaste, calibração e sensibilidade ao posicionamento.
EMG	Ativação muscular e informação	Artefatos, variabilidade

Sensor	Contribuição principal	Limitações para integração
	relacionada à intenção motora.	interindividual, eletrodos e maior exigência de processamento.

Fonte: elaborado pela autora com base nos estudos analisados.

A literatura específica de controle reforça a necessidade de combinar precisão e baixa latência. Maqbool et al. (2017) demonstraram detecção de eventos da marcha em tempo real voltada ao controle e à avaliação de próteses, enquanto Vu et al. (2020) destacaram, em revisão, que desempenho, segurança, robustez e adequação dos sensores precisam ser considerados conjuntamente. Estudos de fusão entre EMGs e sinais mecânicos, como o de Ryu et al. (2019) em um robô de assistência de membro inferior, ilustram possibilidades de classificação adaptativa, mas seus resultados não devem ser diretamente transferidos para usuários de próteses sem validação específica.

Discussão

Os resultados indicam que a principal contribuição de uma abordagem IoT não é substituir os sensores já empregados na biomecânica, mas conectá-los dentro de uma cadeia de aquisição e processamento capaz de transformar medidas locais em informação clinicamente útil. Essa distinção é importante: uma IMU conectada por Bluetooth, isoladamente, não constitui uma arquitetura completa. É necessário definir como as aquisições serão sincronizadas, quais sinais serão processados no próprio dispositivo, quais dados serão enviados, onde serão armazenados e como o profissional terá acesso aos resultados.

Com base na literatura revisada, propõe-se uma arquitetura conceitual em quatro camadas. A primeira corresponde à aquisição, com IMU e sensores de pressão como núcleo de monitoramento e EMG como módulo adicional quando houver interesse em intenção motora. A segunda é a camada de borda, implementada em microcontrolador com conectividade, responsável por amostragem, filtragem, extração inicial de características, marcação temporal e redução do volume de dados. A terceira corresponde ao gateway, como smartphone ou computador, responsável por comunicação, autenticação e encaminhamento. A quarta é a aplicação, responsável por armazenamento, visualização de indicadores e acompanhamento longitudinal.

Tabela 2 - Arquitetura conceitual proposta para monitoramento conectado da marcha.

Camada	Função	Requisito principal
Aquisição	IMU, pressão e, quando necessário, EMG registram movimento, contato e atividade muscular.	Sincronização e taxa de amostragem compatível com cada sinal.
Borda	Filtragem, detecção preliminar de eventos, extração de características e organização dos pacotes.	Baixa latência, consumo energético e processamento determinístico.
Gateway	Recebe os dados por comunicação sem fio e gerencia o envio para aplicação remota.	Interoperabilidade, conexão segura e tolerância a falhas.
Aplicação	Armazena séries temporais e apresenta indicadores de marcha e evolução do usuário.	Privacidade, rastreabilidade e apresentação clinicamente interpretável.

Fonte: elaborado pela autora com base nos estudos analisados.

Essa organização é compatível com a discussão de Young et al. (2023), que descreve a avaliação habitual da marcha em contexto IoT com sensores, processamento em borda, infraestrutura sem fio e armazenamento remoto. O processamento local é particularmente relevante porque transmitir continuamente todos os dados brutos aumenta o consumo energético e a largura de banda. Para variáveis derivadas, como número de passos, assimetria ou ocorrência de eventos, parte do

processamento pode ocorrer no nó, mantendo dados brutos quando necessários para validação ou análises posteriores.

A combinação dos sensores deve ser orientada pela pergunta clínica. Para monitoramento longitudinal, IMU e pressão formam um conjunto tecnicamente mais simples e fornecem informações complementares sobre movimento e carga. O EMG acrescenta uma camada importante quando o objetivo envolve intenção motora ou controle ativo, mas aumenta a complexidade de aquisição e processamento. Assim, um protótipo inicial baseado em IMU e pressão pode ser metodologicamente coerente se o EMG for mantido como expansão para etapas posteriores.

Outro ponto crítico é a validação. Um sistema conectado não deve ser considerado clinicamente útil apenas porque transmite dados em tempo real. As métricas estimadas precisam ser comparadas a referências adequadas e avaliadas em usuários reais de próteses, em diferentes velocidades, superfícies e condições de uso. O resultado de Prasanth et al. (2021), mostrando validação em marcha patológica em menos de um terço dos estudos analisados, reforça essa lacuna. Além da validade biomecânica, uma arquitetura IoT aplicada à saúde deve contemplar segurança da informação, controle de acesso, criptografia, consumo energético e conectividade intermitente (Young et al., 2023).

A contribuição conceitual deste estudo está, portanto, em organizar os sensores segundo sua função e posicioná-los em uma arquitetura conectada coerente. Em vez de assumir que a literatura já dispõe de sistemas IoT completos e consolidados para usuários de próteses, os achados mostram que existem componentes tecnológicos maduros, mas sua integração clínica ainda demanda padronização, validação e engenharia de sistemas. Essa formulação delimita um caminho experimental factível para trabalhos futuros.

Conclusão

IMUs, sensores de pressão e EMG fornecem informações complementares para análise da marcha e podem compor sistemas conectados destinados ao acompanhamento de usuários de próteses de membro inferior. As IMUs apresentam elevada aplicabilidade para monitoramento cinemático e detecção de eventos; sensores de pressão acrescentam informação mecânica sobre contato e carga; e o EMG é particularmente relevante quando se busca inferir intenção motora. A integração em IoT exige mais do que conectividade sem fio, envolvendo sincronização, processamento em borda, gerenciamento energético, segurança e validação clínica. Como proposta inicial, uma arquitetura baseada em IMU e pressão, com EMG como expansão para aplicações de controle, apresenta boa relação entre viabilidade e conteúdo informacional. Estudos futuros devem implementar e validar essa arquitetura em condições reais de uso.

Referências

AHKAMI, B. et al. Electromyography-based control of lower limb prostheses: a systematic review. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, v. 5, n. 3, p. 547-562, 2023. DOI: 10.1109/TMRB.2023.3282325.

BASTAS, G.; FLECK, J. J.; PETERS, R. A.; ZELIK, K. E. IMU-based gait analysis in lower limb prosthesis users: comparison of step demarcation algorithms. Gait & Posture, v. 64, p. 30-37, 2018. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.05.025.

CLEMENS, S. et al. Inertial sensor-based measures of gait symmetry and repeatability in people with unilateral lower limb amputation. Clinical Biomechanics, v. 72, p. 102-107, 2020. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2019.12.007.

LIU, N.; LIU, X.; SU, Z.; WANG, J. Research on the gait phase analysis method of femoral amputation patients based on the thin film pressure sensor. Wireless Personal Communications, v. 137, n. 2, p. 1233-1250, 2024. DOI: 10.1007/s11277-024-11460-1.

MAQBOOL, H. F. et al. A real-time gait event detection for lower limb prosthesis control and evaluation. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, v. 25, n. 9, p. 1500-1509, 2017. DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2636367.

PRASANTH, H. et al. Wearable sensor-based real-time gait detection: a systematic review. Sensors, v. 21, n. 8, art. 2727, 2021. DOI: 10.3390/s21082727.

RYU, J.; LEE, B. H.; MAENG, J.; KIM, D. H. sEMG-signal and IMU sensor-based gait sub-phase detection and prediction using a user-adaptive classifier. Medical Engineering & Physics, v. 69, p. 50-57, 2019. DOI: 10.1016/j.medengphy.2019.05.006.

VU, H. T. T. et al. A review of gait phase detection algorithms for lower limb prostheses. Sensors, v. 20, n. 14, art. 3972, 2020. DOI: 10.3390/s20143972.

WENTINK, E. C. et al. Detection of the onset of gait initiation using kinematic sensors and EMG in transfemoral amputees. Gait & Posture, v. 39, n. 1, p. 391-396, 2014. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2013.08.008.

YOUNG, F.; MASON, R.; MORRIS, R. E.; STUART, S.; GODFREY, A. IoT-enabled gait assessment: the next step for habitual monitoring. Sensors, v. 23, n. 8, art. 4100, 2023. DOI: 10.3390/s23084100.