

Plataforma Vestível para Avaliação da Cinemática do Joelho Utilizando Sensores Inerciais

Lucas Martins Primo
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0009-0001-6129-0852

Heitor Pereira Nunes F. Cunha
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0009-0001-0081-3568

Marcos Gabriel Barbosa dos Santos
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0009-0007-7271-4984

Marcella Thamires Ramos de Sousa
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: 0009-0001-0081-3568

Abstract—The development of wearable technology for biomechanical analysis has become increasingly important for injury prevention and rehabilitation. This project focuses on creating a wearable platform integrated into a knee brace, utilizing inertial sensors to assess knee kinematics. The primary objective is to measure the range of motion of the knee and transmit the data to a mobile application via Bluetooth, enabling real-time analysis and monitoring. The methodology involved several key steps: a comprehensive literature review to define the parameters to be measured, selection and initial testing of hardware components (including the MPU-6050 inertial sensor and ESP32 microcontroller), development of a prototype attachment for the knee brace, design and fabrication of a compact PCB, and creation of firmware for data processing and transmission. Additionally, a mobile application was developed to receive, display, and store the data, providing real-time feedback and historical analysis. Algorithms were implemented to detect abnormalities in knee movement patterns, aiding in the identification of conditions such as osteoarthritis and ligament injuries. Pilot tests with volunteers were conducted to validate the system's usability and effectiveness, leading to final adjustments based on user feedback.

Keywords — *Biomechanical Feedback, Biomechanics, Bluetooth Communication, Clinical Trials, Data Fusion Algorithms*

I. INTRODUÇÃO

A biomecânica, área dedicada ao estudo do movimento humano e suas variações, desempenha um papel crucial na prevenção de lesões e na reabilitação de pacientes. Dentre as articulações mais acometidas por problemas como lesões ligamentares, osteoartrite e limitações pós-cirúrgicas, o joelho se destaca pela sua complexidade estrutural e importância funcional na locomoção e sustentação do corpo [3], [4]. A necessidade de um monitoramento constante e preciso dessa articulação é evidente, especialmente para garantir a eficácia dos tratamentos e a qualidade de vida dos pacientes. Métodos tradicionais de análise biomecânica, como sistemas de captura óptica e plataformas de força, embora altamente precisos, são frequentemente restritos a laboratórios especializados, apresentando limitações quanto à acessibilidade e custo [5].

Neste contexto, os avanços na tecnologia vestível têm permitido o desenvolvimento de dispositivos compactos e de fácil utilização para monitoramento da cinemática articular. Sensores inerciais, como acelerômetros e giroscópios, têm sido amplamente explorados na literatura por sua capacidade de medir parâmetros biomecânicos de forma precisa e em tempo real, possibilitando aplicações tanto em ambientes clínicos quanto no cotidiano dos pacientes [6], [7]. Além disso, a integração desses sensores a dispositivos vestíveis, como joelheiras, pode proporcionar um monitoramento contínuo, auxiliando na reabilitação de indivíduos com disfunções no joelho, permitindo ajustes personalizados nas intervenções terapêuticas [1], [2].

Com base nesses avanços, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma vestível inovadora, integrada a uma joelheira, que utiliza sensores inerciais para avaliar a cinemática do joelho. O dispositivo tem como objetivo principal medir a amplitude de movimento da articulação e transmitir os dados coletados para um aplicativo móvel via Bluetooth, permitindo uma análise em tempo real. Essa abordagem facilita o acompanhamento contínuo tanto por profissionais de saúde quanto pelos próprios pacientes, contribuindo para a personalização dos tratamentos e para a detecção precoce de anormalidades biomecânicas [6], [7].

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a aplicação dessa plataforma, discutindo sua potencial contribuição para a biomecânica e a reabilitação, bem como os desafios e perspectivas futuras para a utilização de tecnologias vestíveis na área da saúde. São abordados aspectos relacionados à calibração e validação dos sensores inerciais, bem como sua precisão na mensuração da cinemática articular [8]. Além disso, são discutidos os impactos da tecnologia proposta no aprimoramento dos processos clínicos, promovendo maior acessibilidade à análise biomecânica e possibilitando novas abordagens para monitoramento remoto de pacientes.

II. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo envolveu o desenvolvimento de uma plataforma vestível para avaliação da cinemática do joelho utilizando sensores inerciais. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica para definir os parâmetros de interesse, como amplitude de movimento, velocidade angular e aceleração. O sistema foi composto por um sensor IMU (MPU-6050), um microcontrolador ESP32 com conectividade Bluetooth, uma bateria recarregável e uma PCB personalizada.

Com isso, o sensor foi integrado a uma joelheira para garantir estabilidade durante os movimentos. O firmware do ESP32 foi programado para coletar e processar os dados do IMU, aplicando filtros de Kalman e Complementar para melhorar a precisão das medições. Os dados foram transmitidos para um aplicativo móvel desenvolvido em Java/Kotlin (Android), que exibiu os resultados em tempo real e permitiu o registro do histórico das medições.

Sendo assim, para análise dos dados, foram implementados algoritmos capazes de identificar padrões anômalos, como redução da amplitude de movimento e instabilidades na velocidade angular. O sistema foi testado com voluntários para validar sua precisão e usabilidade, sendo comparado com métodos de referência. O fluxo de funcionamento envolveu a captação dos dados pelo sensor, processamento pelo microcontrolador e transmissão para o aplicativo, permitindo um monitoramento eficiente da mobilidade do joelho.

Sensores Inerciais (MPU-6050): são sensores que combinam um acelerômetro e um giroscópio, ambos triaxiais, ou seja, medem movimentos nos três eixos espaciais (X, Y e Z). Em relação ao motivo para serem utilizados, o acelerômetro vai medir a aceleração do movimento em cada eixo, detectando inclinações e mudanças de posição, enquanto o giroscópio mede a velocidade angular, ou seja, a rotação do sensor em torno de cada eixo [].

ESP32: é um microcontrolador, que inclui Wi-Fi e Bluetooth Low Energy (BLE), permitindo a comunicação sem fio[]. No caso, ele recebe os dados dos sensores MPU-6050, processa essas informações e envia os resultados via BLE para um aplicativo móvel. Funciona com uma bateria recarregável de íon-lítio (3,7V, 700mAh), e um conversor DC-DC regula a tensão para 3,3V, garantindo a alimentação adequada dos componentes.

Flutter: é uma ferramenta que auxilia no desenvolvimento de aplicativos móveis para Android e iOS usando a mesma base de código[]. Sendo assim, o aplicativo recebe os dados do ESP32 via BLE, decodifica as informações e apresenta ao usuário de forma intuitiva. Além disso, ele pode enviar os dados coletados para um banco de dados na nuvem.

Firestore Realtime Database: é um serviço de banco de dados baseado na nuvem, que permite armazenar e acessar dados em tempo real. O aplicativo envia os dados para o Firestore Realtime Database, onde eles ficam armazenados de forma estruturada. Com isso, os dados podem ser acessados por profissionais autorizados, de qualquer lugar, permitindo monitoramento remoto. Firebase Authentication: é um serviço de autenticação do Firebase que garante a segurança dos dados. Daí, somente usuários autenticados (ex.: pacientes e profissionais de saúde) podem acessar os dados. Ele pode ser utilizado login via e-mail/senha, Google, Facebook ou outras opções. No firmware do microcontrolador ESP32, desenvolveu-se uma aplicação em C/C++ (utilizando o framework Arduino/ESP-IDF) responsável pela aquisição dos dados inerciais e sua transmissão via BLE. Inicialmente, o ESP32 configura a comunicação I²C para ler em tempo real os sensores MPU-6050 fixados na coxa e na perna. São obtidas as leituras de aceleração tri-axial e velocidade angular tri-axial de cada sensor em uma frequência de amostragem definida (por exemplo, 50 Hz).

Em seguida, o firmware processa essas leituras para calcular a cinemática do joelho. No presente trabalho, calcula-se o ângulo de flexão do joelho a partir das orientações relativas entre os sensores – um procedimento comum em sistemas de dois IMUs por articulação [9]. Esse cálculo envolve alinhar os eixos dos sensores durante uma posição de referência (joelho em extensão neutra) e, então, determinar em tempo real o ângulo relativo entre os segmentos da perna e da coxa. Alternativamente, pode-se transmitir os dados brutos de aceleração/giroscópio e realizar os cálculos no aplicativo; ambas abordagens são suportadas, mas optou-se por enviar já o valor filtrado do ângulo para simplificar o aplicativo [9]. Para a comunicação sem fio, adotou-se o Bluetooth Low Energy (BLE) devido a suas vantagens em dispositivos vestíveis. O ESP32 foi programado no papel de periférico BLE, anunciando um serviço GATT customizado com características correspondentes aos dados do sensor. Após o pareamento e conexão, o firmware envia pacotes contendo os dados do joelho (por exemplo, ângulo de flexão atual e/ou valores de aceleração e giro) em intervalos regulares.

A escolha do BLE em vez de Wi-Fi melhora a eficiência energética e dispensa a necessidade de um ponto de acesso de rede para a comunicação local com o smartphone. Estudos sugerem que tecnologias de transmissão como BLE são mais adequadas para enviar pequenos pacotes de dados em sistemas embarcados de baixo poder de processamento. Conforme recomendado na literatura, mantiveram-se os pacotes BLE enxutos (apenas alguns bytes com identificador do sensor e valor do ângulo) para assegurar uma latência baixa e confiabilidade na transmissão [9].

Adicionalmente, implementaram-se no firmware rotinas de calibração inicial e tratamento de erros de conexão. Ao ser ligado, o ESP32 aguarda uma calibração de postura zero (joelho estendido) para sincronizar os referenciais dos dois IMUs. Em seguida, começa a transmissão contínua dos dados via BLE. Em caso de perda

de conexão Bluetooth, o firmware entra em modo de advertising novamente, permitindo que o aplicativo restabeleça a ligação. Essa lógica garante robustez na comunicação, aspecto crítico em aplicações médicas em tempo real. Ressalta-se que o uso do BLE mostrou-se suficiente para a taxa de transmissão escolhida, sem perdas significativas de pacotes. Trabalhos anteriores com arquitetura semelhante – ESP32 enviando dados de IMU por BLE – demonstraram viabilidade da comunicação em tempo real para reabilitação motora [9].

O aplicativo móvel desenvolvido em Flutter funciona como interface do usuário e gateway de dados para a nuvem. Ao iniciar uma sessão de avaliação, o aplicativo escaneia dispositivos BLE próximos e conecta-se ao módulo ESP32 do sistema vestível. Uma vez conectado, o app subscreve as características BLE disponibilizadas pelo firmware, recebendo notificações com os dados do joelho praticamente em tempo real (tipicamente, a latência do BLE é da ordem de milissegundos). Os dados recebidos – seja a série temporal do ângulo de flexão ou os valores brutos dos sensores – são então armazenados localmente e enviados ao Firebase Realtime Database.

A integração com o Firebase Realtime Database permite que cada amostra de dados seja gravada imediatamente em um banco de dados remoto assim que chega ao aplicativo, aproveitando a conectividade Internet do smartphone (Wi-Fi ou rede móvel). Adotou-se uma estrutura de armazenamento hierárquica no Firebase, organizando os dados por usuário, sessão e carimbo de tempo, o que facilita consultas posteriores. Essa solução segue a abordagem de outros sistemas de tele-reabilitação, nos quais os dados coletados pelo dispositivo vestível são primeiro armazenados no aplicativo e posteriormente sincronizados com a nuvem para acesso dos profissionais de saúde [10]. Diferentemente de soluções que enviam os dados apenas ao término da sessão, nosso aplicativo pode transmitir continuamente para a nuvem, possibilitando monitoramento em tempo real se necessário. Contudo, também é possível operar de modo off-line: caso o dispositivo móvel esteja sem internet durante a coleta, os dados ficam em memória local e o upload ao Firebase ocorre assim que a conexão for restabelecida, garantindo que nenhuma informação de uma sessão seja perdida [11].

Para acessar o aplicativo e os dados, os usuários devem efetuar login por meio do Firebase Authentication. Cada paciente possui credenciais únicas, assim como os fisioterapeutas ou médicos que acompanharão remotamente o progresso. A autenticação robusta assegura que somente indivíduos autorizados tenham acesso às informações sensíveis, em conformidade com exigências éticas e legais na área da saúde. Uma vez autenticado, o profissional pode visualizar gráficos da evolução do ângulo do joelho, tanto em tempo real durante um exercício quanto históricos armazenados no banco de dados. A segurança da plataforma é reforçada pelos próprios mecanismos do Firebase [10].

Por fim, o aplicativo apresenta ao usuário final (paciente) feedback visual e sonoro dos movimentos realizados. Durante os exercícios, o ângulo do joelho é

exibido em um mostrador digital ou gráfico animado, permitindo ajuste imediato da execução conforme necessário. Essa função de biofeedback é fundamental para engajamento do paciente e correção de movimentos, e é viabilizada pela baixa latência da comunicação BLE e atualização em tempo real na interface do Flutter. Em suma, o aplicativo móvel atua como elo entre o dispositivo vestível e a nuvem, concretizando um sistema integrado de reabilitação telemonitorada. Essa arquitetura distribuída – sensor vestível, aplicativo e banco de dados remoto – alinha-se com tendências atuais em telessaúde e reabilitação assistida por tecnologia, permitindo monitoramento contínuo e com maior conforto para o paciente [10,12]. Estudos destacam que tal abordagem permite realizar avaliações funcionais fora do ambiente clínico com praticidade, viabilizando acompanhamento contínuo e de longo prazo que antes era impraticável. Em suma, a combinação do aplicativo Flutter com o backend Firebase confere à plataforma vestível uma infraestrutura de computação em nuvem robusta e escalável, capaz de suportar a expansão para numerosos usuários e cenários clínicos. A solução proposta, portanto, se alinha com tendências atuais de saúde digital, oferecendo um sistema de avaliação cinemática do joelho em tempo real, remoto e centrado no usuário, com potencial de aprimorar tanto a pesquisa biomecânica quanto o cuidado terapêutico [12].

III. Resultados

IV. Discussão

Referências

[1] Patel G, et. al. **Validation of wearable inertial sensor-based gait analysis system for measurement of spatiotemporal parameters and lower extremity joint kinematics in sagittal plane**

[2] Prisco G, et. al. **Validity of Wearable Inertial Sensors for Gait Analysis: A Systematic Review.**

[3] DELP, S. L.; ANDERSON, F. C.; ARNOLD, A. S.; LOAN, P.; HABIB, A.; JOHN, C. T.; GUENDELMAN, E.; THELEN, D. G. **OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 54, n. 11, p. 194

[4] ESCAMILLA, R. F. **Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 32, n. 1, p. 127–141, 2020.

[5] FLEISCHER, C.; D'ANGELO, M. G.; BORTOLAMI, A.; CAROTTA, V.; RIGOLDI, C. **Wearable sensor-based technology for knee joint assessment: A systematic review. Sensors**, v. 19, n. 11, p. 2435, 2019.

[6] PICERNO, P. **25 years of lower limb joint kinematics by using inertial and magnetic sensors: A review of methodological approaches. Gait & Posture**, v.

51, p. 239–246, 2017.

[7] LEITE, T. H.; SILVA, J. G.; SOUZA, F. C.; LIMA, P. F. **Development of an inertial sensor-based system for knee joint angle measurement.** *Journal of Biomechanics*, v. 140, p. 111201, 2022.

[8] TAO, W.; LIU, T.; ZHENG, R.; FENG, H. **Gait analysis using wearable sensors.** *Sensors*, v. 12, n. 2, p. 2255–2283, 2012.

[9] KESKINOĞLU, C.; AYDIN, A. **Wearable wireless low-cost electrogoniometer design with Kalman filter for joint range of motion measurement and 3D modeling of joint movements.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, v. 235, n. 2, p. 222–231, 13 nov. 2020.

[10] YOUNG, F. et al. **IoT-Enabled Gait Assessment: The Next Step for Habitual Monitoring** *Sensors*, v. 23, n. 8, p. 4100–4100, 19 abr. 2023.

[11] FRANCO, T. et al. **Motion Sensors for Knee Angle Recognition in Muscle Rehabilitation Solutions.** *Sensors*, v. 22, n. 19, p. 7605, 7 out. 2022.

[12] PATEL, S. et al. **A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation.** *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, v. 9, n. 1, p. 21, 2012.