DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DE MOVIMENTOS DOS MEMBROS SUPERIORES OU INFERIORES

Matteus Souza Rossoni Sisquini (matteus.sisquini@edu.ufes.br), Geraldo Rossoni Sisquini (geraldo.sisquini@ufes.br), Fransérgio Leite da Cunha (fransergio.cunha@ufes.br)

Universidade Federal do Espírito Santo; Centro Tecnológico; Departamento de Engenharia Mecânica
Vitória, Espírito Santo, Brasil

RESUMO: *Este estudo aborda a aplicação da biomecânica e da robótica na captura de movimento dos membros superiores e inferiores do corpo humano, com o objetivo de desenvolver um sistema acessível e de baixo custo para reabilitação de pessoas com deficiência. Utilizando placas Micro:bit, que possuem acelerômetros e magnetômetros, que permitem a captura de informações sobre aceleração, velocidade e posição dos membros durante movimentos específicos. A análise cinemática dos dados permitiu obter informações sobre a posição angular e velocidade de cada articulação do braço. Diversos métodos foram explorados para a obtenção precisa dos dados, incluindo a calibração do magnetômetro e o uso combinado do acelerômetro e magnetômetro. O estudo demonstrou que o uso de acelerômetros é mais eficaz para a medição da inclinação das articulações e permitiu a criação de uma interface gráfica para simulação de movimentos em próteses virtuais. Esse sistema de baixo custo oferece potencial para aprimorar a reabilitação personalizada e acessível a indivíduos com deficiências físicas. Além disto, o objetivo é* disponibilizar um laboratório de baixo custo para instituições interessadas em utilizar essa tecnologia em suas aulas, pesquisas ou tratamentos de pacientes.

PALAVRAS-CHAVE: *Biomecânica; Micro:bit; Captura de movimento; Reabilitação humana; baixo custo.*

DEVELOPMENT OF A LOW-COST SYSTEM FOR ANALYSIS OF MOVEMENTS OF UPPER OR LOWER LIMBS

ABSTRACT: This study addresses the application of biomechanics and robotics in motion capture of the upper and lower limbs of the human body, with the aim of developing an accessible and low-cost system for the rehabilitation of people with disabilities. Using Micro:bit boards, which have accelerometers and magnetometers, which allow the capture of information about acceleration, velocity and position of the limbs during specific movements. The kinematic analysis of the data provided information on the angular position and velocity of each arm joint. Several methods were explored for obtaining accurate data, including magnetometer calibration and the combined use of accelerometer and magnetometer. The study demonstrated that the use of accelerometers is more effective for measuring joint inclination and allowed the creation of a graphical interface for simulating movements in virtual prostheses. This low-cost system offers the potential to enhance personalized and accessible rehabilitation for individuals with physical disabilities. In addition, the objective is to provide a low-cost laboratory for institutions interested in using this technology in their classes, research or treatment of patients.

KEYWORDS: *Biomechanics; Micro:bit; Motion capture; Human rehabilitation; low cost.*

1. INTRODUÇÃO

A biomecânica é uma ciência que se dedica ao estudo do movimento em organismos vivos, incluindo o corpo humano, com ênfase em suas características mecânicas, anatômicas e fisiológicas (HALL, 2020). Os avanços tecnológicos têm permitido obter informações detalhadas sobre a anatomia humana, utilizando equipamentos e softwares de alta tecnologia para avaliar tridimensionalmente os movimentos do corpo (HALL, 2020).

Dentre as diversas vertentes da biomecânica, destaca-se a cinemática, que descreve os movimentos lineares e angulares com base na posição, velocidade e aceleração. Entretanto, muitos dos equipamentos tradicionais utilizados para medição em tempo real são inacessíveis para a maioria das instituições, especialmente as públicas. Nesse contexto, surge a relevância de adotar tecnologias de baixo custo, como o Micro:bit, para realizar essas medições.

O Micro:bit é um hardware com sistema embarcado baseado em ARM (Advanced RISC Machine) projetado pela BBC (British Broadcasting Corporation) para fins educacionais na área da computação (ROCKS, 2016). Ele consiste em uma placa compacta, contendo processador, memória, sensores e matriz de LEDs, que tem como propósito estimular a participação ativa de crianças na criação de software e geração de novas ideias. Além disso, o Micro:bit é projetado para trabalhar em conjunto com outros sistemas, como o Raspberry Pi, ampliando suas aplicações no campo da educação.

Para programar o Micro:bit, várias opções estão disponíveis, sendo a mais comum a utilização do MakeCode (MAKECODE, 2023), uma interface de programação visual baseada em blocos. No entanto, também é possível programar o Micro:bit utilizando linguagens de programação de texto, como Python e JavaScript, por meio de ambientes de desenvolvimento específicos.

Destaca-se que o Micro:bit possui diversas aplicações, desde a criação de jogos simples até sua integração em projetos de robótica, possibilitando o controle de motores, sensores e outras partes de um robô. Isso viabiliza a concepção de pequenos robôs ou veículos controlados remotamente. Com amplas possibilidades, o Micro:bit se destaca como uma plataforma acessível e versátil, promovendo a criatividade e o aprendizado por meio da programação e eletrônica.

1.2. Contextualização e justificativa

A relevância do desenvolvimento de tecnologias para a reabilitação de pessoas com deficiência é evidenciada pelos dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Segundo a Pesquisa Nacional de Saúde (PNS) de 2019, cerca de 8,4% da população brasileira acima de dois anos, o que corresponde a 17,3 milhões de pessoas, apresentam algum tipo de deficiência. Desse total, 3,8% da população acima de dois anos (aproximadamente 7,8 milhões de pessoas) têm deficiência física nos membros inferiores, enquanto 2,7% possuem deficiência nos membros superiores (IBGE, 2021).

Diante desse cenário, é necessário desenvolver ferramentas que garantam o acesso das pessoas com deficiência aos meios físicos, serviços e instalações, tanto públicas como privadas (LUSTOSA et al., 2015). Entre as soluções para atender às necessidades dessas pessoas, destacam-se

os dispositivos voltados para a reabilitação, como próteses, órteses e cadeiras de rodas, entre outros. No entanto, é essencial fornecer informações detalhadas para o sistema de controle de tecnologias assistivas a fim de adequar esses dispositivos de forma precisa às características físicas de cada indivíduo (LUSTOSA et al., 2015).

Nesse contexto, a captura de movimentos desempenha um papel crucial na reabilitação humana, permitindo a avaliação, monitoramento e auxílio no processo de recuperação de pacientes com lesões ou deficiências físicas. A captura precisa dos movimentos é fundamental para o desenvolvimento de terapias personalizadas e dispositivos de assistência que visam melhorar a qualidade de vida e a funcionalidade dos indivíduos em reabilitação.

1.2. Objetivos

O objetivo do projeto é desenvolver um sistema para capturar a aceleração dos membros superiores (braço, antebraço e mão) e dos membros inferiores (coxa, perna e pé), utilizando principalmente acelerômetros de baixo custo de três eixos embarcados em uma placa Micro:bit. Com base nos sinais dos acelerômetros, busca-se obter informações precisas sobre a velocidade e a posição de cada membro por meio da cinemática inversa. Dessa forma, será possível simular os movimentos em uma prótese virtual, utilizando uma interface gráfica como aplicação dos resultados. O objetivo final é disponibilizar um laboratório de baixo custo de forma open-source (código aberto) para instituições interessadas em utilizar essa tecnologia em suas aulas, pesquisas ou tratamentos de pacientes que necessitem de análise de movimentos, permitindo sua reprodução sem grandes investimentos.

1.3. Revisão bibliográfica

A biomecânica, ao aplicar conceitos da mecânica, permite analisar aspectos anatômicos e funcionais de organismos vivos (HALL, 2020). Nesse contexto, a robótica desempenha um papel importante, fornecendo uma plataforma prática para explorar e compreender os princípios fundamentais da cinemática e dinâmica (SPONG et al., 2020). A cinemática é responsável pela descrição geométrica do movimento, incluindo posição, orientação e trajetória do robô, sendo essencial para o planejamento de trajetórias e controle de movimento. O estudo da dinâmica dos robôs é crucial para entender como as forças e torques se propagam no sistema, sendo fundamental para o desenvolvimento de algoritmos de controle eficientes e estáveis (CRAIG, 2017). Isso garante a execução segura e precisa de tarefas pelos robôs, incluindo movimentos suaves, controle da força aplicada ao ambiente e estabilidade durante as operações.

A biomecânica é essencial para compreender os movimentos do corpo humano, buscando entender como os sistemas musculoesqueléticos e fisiológicos interagem para gerar ações motoras eficientes e adaptativas (HALL, 2020). No presente projeto, o foco está na medição dos movimentos dos membros do corpo humano, utilizando a cinemática e acelerômetros de três eixos. Essa abordagem é relevante para a reabilitação humana, permitindo o desenvolvimento e monitoramento de terapias personalizadas. Com a captura precisa dos movimentos, é possível avaliar desempenho

motor, coordenação, amplitude de movimento e outros parâmetros que influenciam a funcionalidade do paciente. Além disso, permite o desenvolvimento de dispositivos de assistência personalizados, melhorando a qualidade de vida dos indivíduos em processo de reabilitação (LUSTOSA et al., 2015).

Os desafios no estudo dos movimentos humanos incluem a busca por tecnologias de baixo custo para a captura de movimentos, especialmente para instituições de saúde, especialmente as públicas. Nesse contexto, a utilização do Micro:bit como uma opção de tecnologia acessível pode ser uma solução promissora, tornando as ferramentas de captura de movimento mais amplamente disponíveis e contribuindo para terapias personalizadas e efetivas.

A robótica é uma área com diversas aplicações práticas, incluindo a criação de robôs manipuladores utilizados em indústrias e processos de reabilitação (MILLER; MILLER, 2017). Os robôs manipuladores industriais são capazes de realizar movimentos e tarefas diversas, dependendo do número de Graus de Liberdade (GDL) que possuem. No presente projeto, será abordado um manipulador planar com dois elos e juntas de revolução, assemelhando-se aos movimentos do braço humano e antebraço no plano sagital (SPONG et al., 2020). Essa configuração simplificada permitirá a aplicação de formulações disponíveis na literatura e o desenvolvimento de um sistema acessível.

Dessa forma, a abordagem proposta neste trabalho baseia-se na utilização do Micro:bit como uma plataforma de baixo custo para capturar os movimentos dos membros superiores e inferiores do corpo humano. Por meio da cinemática e dos acelerômetros, busca-se obter informações precisas sobre a aceleração, velocidade e posição de cada membro, possibilitando a simulação dos movimentos em uma prótese virtual através de uma interface gráfica. Essa tecnologia pode contribuir para a reabilitação personalizada e acessível a um maior número de pessoas com deficiências físicas.

O presente trabalho ressalta a importância da biomecânica e da robótica no estudo dos movimentos do corpo humano e no desenvolvimento de tecnologias para a reabilitação. A viabilidade da utilização do Micro:bit como uma plataforma de baixo custo para captura de movimentos mostra-se promissora, permitindo a obtenção de dados precisos sobre aceleração, velocidade e posição dos membros. Essas informações podem ser aplicadas na simulação de movimentos em uma prótese virtual, possibilitando a avaliação e desenvolvimento de terapias personalizadas para pessoas com deficiências físicas.

Em suma, a integração da biomecânica, robótica e tecnologia do Micro:bit oferece um potencial significativo para o avanço na área da reabilitação humana. O projeto busca desenvolver um sistema acessível e versátil, impulsionando a pesquisa e o tratamento de pacientes que necessitam de análise detalhada de movimentos. A disponibilização do laboratório de baixo custo de forma open-source abre novas perspectivas para a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico nesse campo, visando melhorar a qualidade de vida e funcionalidade de indivíduos com deficiências físicas.

1.3.1. Captura de movimento

A captura do movimento dos membros humanos é essencial para a análise e compreensão dos seus movimentos. Para isso, os sensores de movimento desempenham um papel fundamental, fornecendo informações cruciais sobre a cinética e dinâmica dos robôs manipuladores (CORKE,

2017). Os sensores de movimento permitem medir com precisão a posição, velocidade, aceleração, forças e torques envolvidos no sistema, possibilitando o ajuste adequado das ações (fisioterapia, protetização, etc.) para atingir os objetivos desejados (SPONG et al., 2020).

Existem diferentes tipos de sensores de movimento, tais como sensores ópticos, acelerômetros, magnetômetros, giroscópios, sensores de detecção de proximidade e de visão computacional, cada um com suas características e aplicações específicas (LI; LIU, 2019). Para o desenvolvimento do projeto em questão, foram utilizados o acelerômetro e o magnetômetro disponíveis na placa adotada, proporcionando informações importantes sobre a aceleração linear e a orientação do robô (CORKE, 2017).

O acelerômetro mede a aceleração linear de um objeto em relação a um sistema de referência inercial, e sua utilização é relevante para detectar mudanças na velocidade ou direção do robô, bem como colisões, permitindo ajustes no comportamento do robô em resposta a essas mudanças (CORKE, 2017). Já o magnetômetro mede a magnitude e a direção do campo magnético em relação a um sistema de coordenadas, possibilitando a determinação da orientação do robô em relação ao campo magnético da Terra, além de auxiliar na correção de erros acumulados por outros sensores, como acelerômetros e giroscópios (RONG et al., 2019).

A integração desses sensores de movimento proporciona informações mais precisas sobre o ambiente, sua própria posição e os movimentos dos objetos ao seu redor (ZHU; ZHOU, 2004). Esses dados são fundamentais para a estimativa da cinética do sistema e para a compreensão dos efeitos dinâmicos, como inércia, gravidade e atrito, que influenciam o movimento (CRAIG, 2017).

O acelerômetro, embora permita estimar velocidade e posição dos membros estudados através da integração, requer cuidado devido aos erros de integração e acúmulo de imprecisões, tornando-o mais adequado para estimativas de breve duração e situações onde a precisão não é crítica (W3C, 2023). Por essa razão, a combinação do acelerômetro com outros sensores, como o magnetômetro, é comum para melhorar a precisão das estimativas (LI; LIU, 2019).

É importante destacar que o uso do magnetômetro pode ser afetado por interferências magnéticas externas, o que pode levar a erros e imprecisões na estimativa da orientação. Portanto, métodos de calibração e filtragem dos dados obtidos pelo magnetômetro são necessários para garantir medições precisas (ROETENBERG et al., 2005).

1.3.2.a. Micro:bit V1

A versão V1, lançada em fevereiro de 2016, inclui componentes como acelerômetro de três eixos, magnetômetro de três eixos, rede sem fio Bluetooth de baixa energia (2.4 GHz), 256 Kbps de memória flash e 16 KB de memória RAM.

Inicialmente, para o projeto em questão, a V1 foi utilizada com o posicionamento de um Micro:bit no braço e outro no antebraço para obter a aceleração em ambos os segmentos durante o movimento do braço. A linguagem de programação escolhida foi Python. Entretanto, os editores disponíveis apresentaram limitações na interação com o Micro:bit, e a baixa capacidade de memória RAM inviabilizou o uso do Bluetooth e certos recursos disponíveis na V2 (MICROBIT, 2022; MAKECODE, 2023).

1.3.2.b. Micro:bit V2

A V2, lançada em outubro de 2020, apresenta melhorias, como processador aprimorado, microfone, auto-falante, 512 KB de memória flash e 128 KB de memória RAM.

Devido ao aumento na memória RAM, o Bluetooth e editores mais dedicados puderam ser utilizados com o Micro:bit V2, o que gerou resultados satisfatórios para o projeto. O componente LSM303AGR é responsável por reunir o acelerômetro e o magnetômetro na parte traseira do Micro:bit (LSM303AGR, 2022).

1.3.2.c. Configuração e programação do Micro:bit

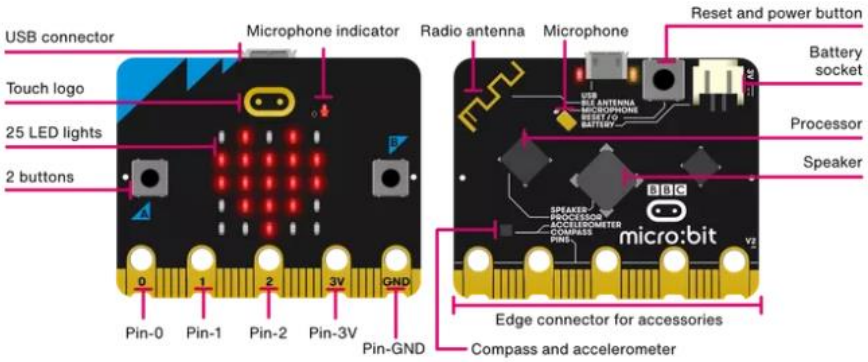
Para utilizar o Micro:bit V2, é necessário ativar os recursos desejados, como o Bluetooth, acelerômetro e magnetômetro, através da plataforma Microsoft MakeCode, carregando um arquivo hex com os parâmetros necessários, incluindo o processo de calibração para o magnetômetro. Em seguida, os Micro:bits são pareados com o computador e podem ser programados em Python através da biblioteca Kasper's Micro:bit, contornando problemas encontrados com a V1 e outros editores oficiais, possibilitando análises em tempo real (MAKECODE, 2023; KASPER'S MICRO:BIT, 2022).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Captura de movimento

Neste projeto, além dos conceitos apresentados anteriormente, foram utilizadas as placas Micro:bits para a captura do movimento dos segmentos do braço. As placas Micro:bits são dispositivos que possuem acelerômetro e magnetômetro embutidos e foram posicionadas ao longo dos segmentos do braço para capturar as variações nos sensores durante o movimento. Os dados obtidos por esses sensores foram utilizados para calcular a posição, velocidade e aceleração de cada segmento do braço (Figura 1).

FIGURA 1. Placas Micro:bits e Sensores de Movimento

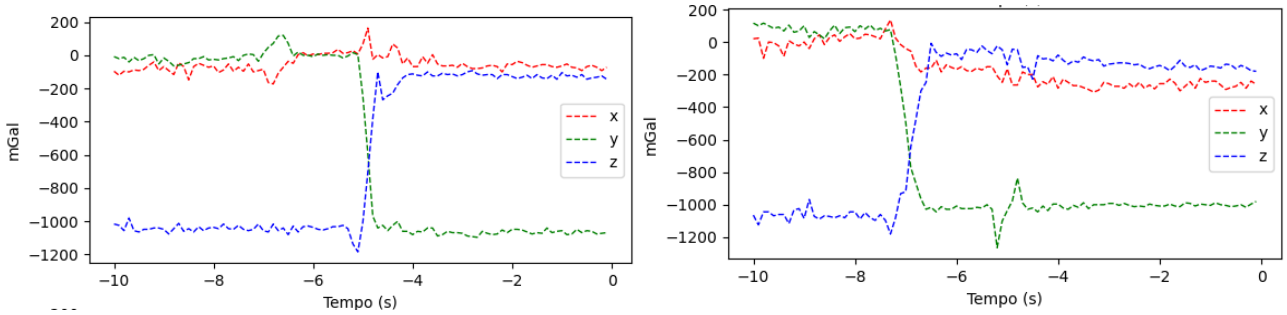


Fonte: Microbit Hardware (2022)

As placas Micro:bits utilizadas são da versão V1 e V2. Cada uma delas possui acelerômetro e magnetômetro, mas a V2 apresenta melhorias nos componentes, especialmente na rede Bluetooth, o que foi crucial para o avanço do projeto (Figura 1).

Os acelerômetros de três eixos são dispositivos capazes de medir a aceleração ao longo de três eixos em um sistema de coordenadas. Na configuração de repouso dos Micro:bits, as acelerações X e Y estão próximas de zero, enquanto a aceleração Z está próxima de -1024 mGal (0,01024 m/s²), indicando a ação da gravidade (Figura 2).

FIGURA 2. Exemplo da medição da aceleração com a placa Micro:bit em movimento



Fonte: Autores (2023)

Ao posicionar dois sensores no braço humano, um no braço e outro no antebraço, foi possível observar o funcionamento dos sensores durante o movimento. Ao flexionar o antebraço mantendo o braço parado, houve uma variação na aceleração do Micro:bit no antebraço, enquanto o Micro:bit do braço manteve aceleração constante (Figura 2).

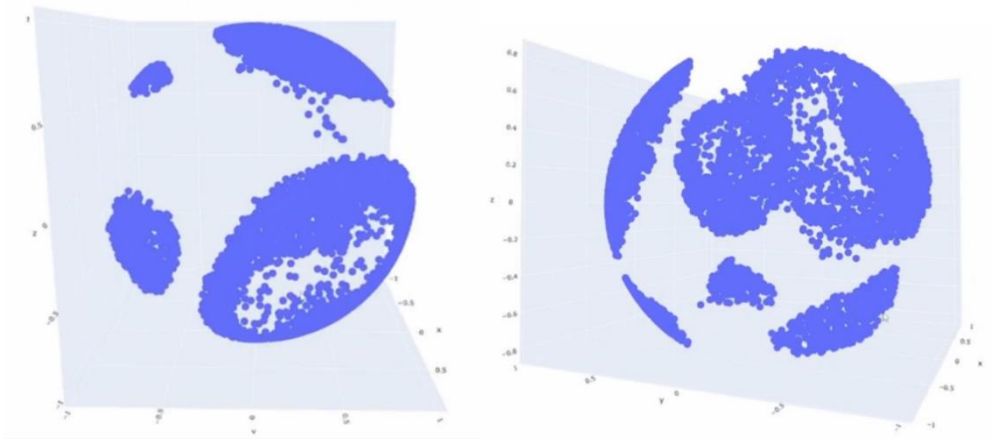
Ao apontar o braço totalmente para cima a partir do antebraço flexionado, ambos os sensores sofreram variação semelhante na aceleração, pois ambos os Micro:bits passaram a apontar para cima (Figura 2). Observou-se que houve pouca variação no eixo X, devido ao movimento realizado com pouca movimentação lateral.

2.2. Magnetômetros e necessidade de calibração

Os magnetômetros também embarcados nos Micro:bits medem a magnitude e direção do campo magnético da Terra nas direções x, y e z, como uma bússola. Entretanto, foi observado que, independentemente da posição e inclinação dos Micro:bits, os eixos x, y e z do sistema de coordenadas interno não se alinhavam ao norte magnético (Figura 3 e 4).

Para compreender o comportamento do magnetômetro, foi realizado um registro dos vetores medidos ao longo do tempo enquanto os Micro:bits eram manipulados aleatoriamente. Observou-se que havia setores inacessíveis ao vetor norte, resultando em um preenchimento parcial da casca esférica no gráfico de dispersão (Figura 3).

FIGURA 3. Gráficos de dispersão com os pontos gerados pelo magnetômetro dos Micro:bit ao rotacioná-los em todas as direções.

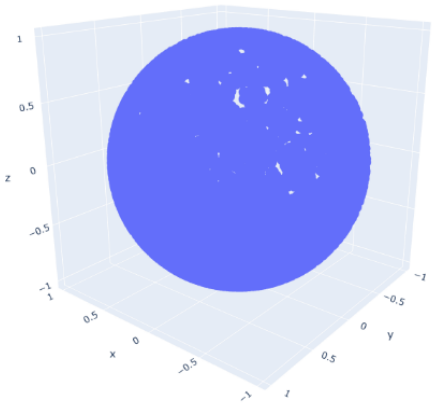


Fonte: Autores (2023)

O esperado, para um magnetômetro com o funcionamento correto, seria que, ao manipular o magnetômetro de forma suficientemente aleatória, girando-o em todos os sentidos e por tempo suficiente, a distribuição desses vetores tenderia a ser homogênea em torno da origem formando uma casca esférica. Como pode ser observado na Figura 3, em ambos os Micro:bits apenas algumas porções da casca esférica foram preenchidas, indicando que estava ocorrendo algum ruído ou defeito.

Os magnetômetros podem ser afetados por interferências magnéticas externas, como campos magnéticos gerados por objetos ferromagnéticos próximos ou fontes de energia, causando erros e imprecisões na estimativa da orientação. Por causa disso, métodos para calibrar e filtrar os dados obtidos pelo magnetômetro acabam sendo essenciais para garantir que as medições sejam precisas. Para resolver esse problema, foi introduzido um método de calibração. O procedimento envolveu tombar os Micro:bits em todas as direções até preencher todos os LEDs na superfície do dispositivo. Após a calibração, observou-se que a casca esférica ficou quase totalmente preenchida no gráfico de dispersão (Figura 4), confirmando a validade do procedimento de calibração.

FIGURA 4. Gráfico de dispersão com os pontos gerados pelo magnetômetro após terem sido feitas as calibrações



Fonte: Autores (2023)

2.3. Obtenção da posição, velocidade e aceleração dos membros superiores com o Micro:bit

Os Micro:bits possuem um referencial interno, onde o movimento do dispositivo é interpretado como se a gravidade ou o campo magnético se movessem enquanto o Micro:bit permanece fixo na mesma posição. Através da análise de ângulos entre os vetores da posição do Micro:bit e os vetores dos sensores de acelerômetro e magnetômetro, foi possível obter a posição, velocidade e aceleração dos membros superiores. O posicionamento dos Micro:bits ao longo do braço foi adotado de forma a maximizar a projeção da gravidade no eixo Z do acelerômetro, garantindo resultados condizentes com o movimento realizado.

A utilização das placas Micro:bits com acelerômetro e magnetômetro possibilitou a captura do movimento dos segmentos do braço e a obtenção de informações essenciais, como posição, velocidade e aceleração. A introdução do processo de calibração foi fundamental para a correção das limitações do magnetômetro. Com os procedimentos adequados, os Micro:bits se mostraram ferramentas eficazes para a análise de movimentos, contribuindo para o desenvolvimento e aprimoramento de robôs manipuladores e outras aplicações tecnológicas.

Os testes abordaram tanto o uso de cada sensor de movimento de forma separada quanto em conjunto, de forma a encontrar o melhor método possível, a partir do equipamento disponível. Os métodos principais acabaram por ser utilizar magnetômetro pra localizar o braço em duas dimensões no sistema de coordenadas do Micro:bit e utilizar o acelerômetro para medir a inclinação vertical dos segmentos do braço. Esses métodos terão seus resultados discutidos com maior detalhamento, porém, outras abordagens para a análise do movimento também foram experimentadas.

Foi buscando uma forma de conseguir detectar a movimentação do braço em um ambiente tridimensional através do magnetômetro, dessa forma considerado que a junta do primeiro segmento fosse uma junta com dois graus de liberdade. Este método seguiu o mesmo procedimento realizado para a localização em duas dimensões, porém, acrescido da inclinação da primeira articulação e do movimento horizontal do braço como um todo. Do mesmo modo que o método anterior, os resultados para a inclinação vertical se mantiveram os mesmos, sendo possível localizar o movimento, mas com bastante imprecisão. Com isso, era esperado que o movimento horizontal apresentasse um comportamento similar, porém, mover o braço horizontalmente ao redor de um ponto utilizando este método apresentou resultados incoerentes.

Outra forma de tentar localizar o braço em um ambiente tridimensional foi utilizar o acelerômetro pra calcular as inclinações verticais de cada segmento do braço e magnetômetro pra calcular a inclinação com relação ao norte de cada segmento considerando apenas a primeira articulação como tendo dois graus de liberdade e as demais como tendo apenas um grau de liberdade. Da mesma forma como o método anterior, tentar localizar o movimento horizontal do braço utilizando o magnetômetro mostrou resultados incoerentes. Entretanto, a partir deste método foi possível observar que medir a inclinação vertical com o acelerômetro se mostrou uma abordagem mais viável ao se comparado com o magnetômetro, o que será melhor explicado adiante.

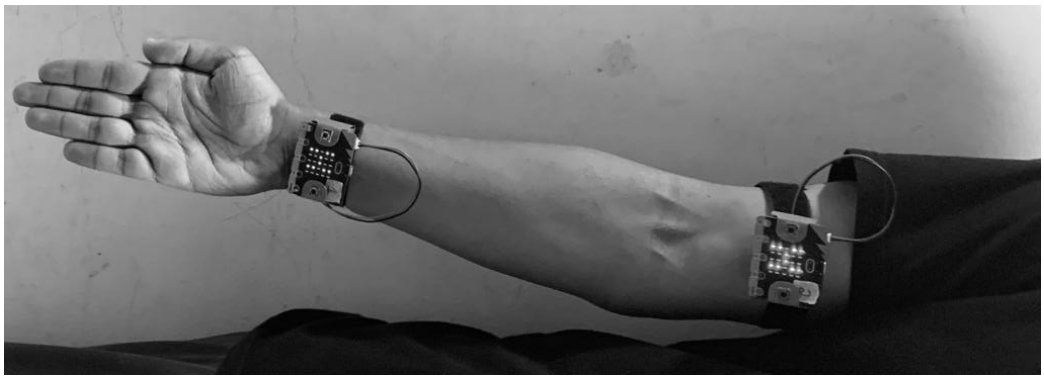
O acelerômetro pode emitir resultados imprecisos devido ao ruído gerado pela gravidade, e isso gerou um certo questionamento sobre a validade dos dados obtidos pelo método anterior. Assim, foi utilizado o magnetômetro para compensar a aceleração da gravidade, de forma que a aceleração linear fosse isolada, porém, a imprecisão do magnetômetro logo inviabilizou esta abordagem.

2.3.1. Implementação da análise cinemática do movimento do braço humano utilizando Micro:bit

Para a implementação deste estudo, foi adotada a linguagem computacional Python (GUIDO; DRAKE, 1995), com a utilização dos pacotes Numpy (HARRIS et al., 2020), kaspersmicrobit (Kasper's Micro:bit, 2022) e Matplotlib (HUNTER, 2007).

Para simplificar a apresentação dos resultados, o objetivo deste projeto consiste em realizar uma análise do movimento do braço humano, enfocando suas características cinemáticas, com base no modelo do robô planar de dois elos, anteriormente descrito em um plano bidimensional. Embora as juntas do ombro humano sejam do tipo articulado, a representação do modelo utiliza juntas de revolução. Para esse propósito, dois Micro:bits foram empregados, um posicionado no braço e outro no antebraço, conforme ilustrado na Figura 5.

FIGURA 5. Posições dos Micro:bits ao longo do braço



Fonte: Autores (2023)

Através do acelerômetro de três eixos embarcado no Micro:bit, obtive-se a orientação do braço no plano sagital, permitindo calcular sua velocidade e aceleração angular. Essas informações possibilitam a análise tanto cinemática quanto dinâmica. Além disso, o Micro:bit dispõe de um magnetômetro de três eixos, possibilitando experimentar diferentes abordagens para a análise do movimento do braço. Como discutido anteriormente, a combinação dos sensores pode conferir maior precisão aos resultados. Dessa forma, foram explorados métodos que utilizam tanto o acelerômetro quanto o magnetômetro, de forma isolada e combinada, os quais serão abordados em seções subsequentes.

Nos experimentos, o primeiro Micro:bit foi posicionado sobre o braço de modo que o eixo y apontasse para o cotovelo, o eixo x para o torso e o eixo z para o próprio braço. Analogamente, o segundo Micro:bit foi posicionado sobre o antebraço. Ambos seguiram o mesmo procedimento

conforme as instruções mencionadas. Além disso, cada Micro:bit V2 foi programado com um processo de calibração para o magnetômetro, ativado sempre durante a inicialização para garantir o correto funcionamento do sensor. Os movimentos do braço partiram de uma posição vertical apontando para o solo, com a palma da mão voltada para a frente do corpo, conforme apresentado na Figura 5.

Os segmentos do braço foram movimentados de forma separada, estendendo o braço sem flexionar o antebraço, flexionando o antebraço sem movimentar o braço e realizando ambos os movimentos simultaneamente. A partir dos métodos a serem expostos adiante, os dados coletados foram analisados para observar a variação dos ângulos de abertura, velocidade e aceleração angular de cada segmento. Analisou-se tanto a lógica dos valores obtidos quanto a coerência da representação virtual. Os testes abrangeram a utilização tanto de cada sensor de movimento de forma isolada quanto em conjunto, buscando encontrar a melhor abordagem possível, considerando o equipamento disponível.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em testes preliminares com o acelerômetro do Micro:bit V1, foi possível obter uma taxa de amostragem de aproximadamente 20 Hz, mas isso somente importando a ativação do recurso do acelerômetro através do arquivo hex gerado pelo MakeCode (MAKECODE, 2023). No entanto, devido à limitação na memória RAM da versão V1, não foi possível importar os demais recursos necessários. Com o Micro:bit V2, foi possível atingir aproximadamente 40 Hz, mas após importar e ativar todos os recursos necessários além do acelerômetro, como magnetômetro e a rede Bluetooth, somado com as demais operações para a captação e apresentação dos resultados, foi obtida ao final uma taxa de amostragem de 16 Hz ao transmitir os resultados em tempo real.

Utilizando o pacote (Kasper's Micro:bit, 2022), foi possível realizar o código que gera os resultados a partir dos dados obtidos pelo Micro:bit. Ao iniciar o código, é feito um procedimento onde cada placa é chamada e, após ambas responderem, é iniciada a geração de dados. Dessa forma, os dados só podem ser obtidos quando as placas estiverem sincronizadas. O código, assim como os demais módulos, foi feito tanto para gravar e processar os dados quanto para transmiti-los em tempo real. A animação que reproduz o movimento foi feita através do pacote Matplotlib (HUNTER, 2007), que embora ofereça alguns recursos básicos de animação, pode não ser a biblioteca mais eficiente para animações de alto desempenho, mas foi escolhido devido à facilidade de acesso. A transmissão em tempo real apresentou fluidez equiparável à reprodução do movimento a partir dos dados gravados e processados.

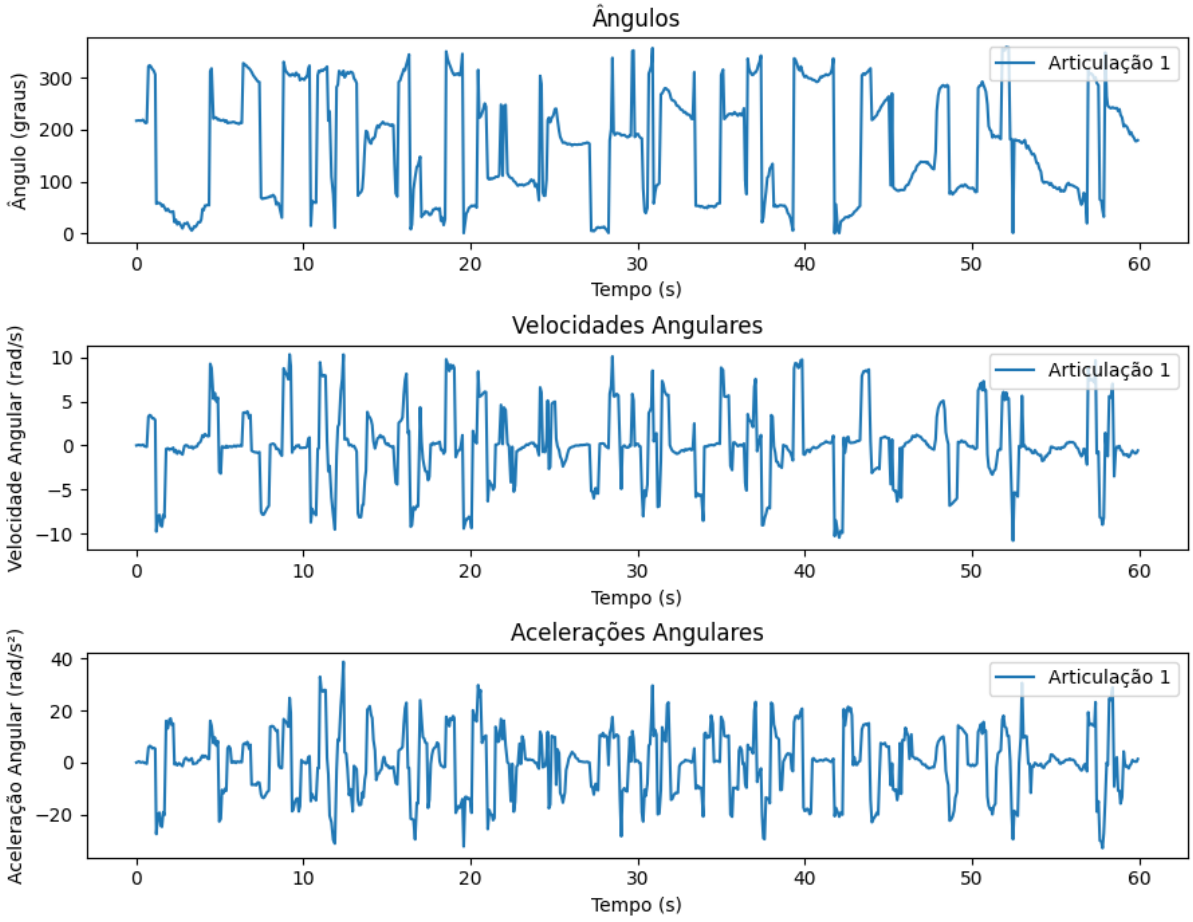
Para a localização do braço em duas dimensões no sistema de coordenadas do Micro:bit, foi utilizado o magnetômetro de três eixos. O método consistiu em assumir que o norte magnético é um ponto fixo no espaço, e os vetores de cada Micro:bit apontando para o norte magnético podem ser considerados paralelos entre si. Além disso, o eixo Y de cada magnetômetro sempre aponta na direção do segmento do braço. Com isso, foi possível calcular a abertura da articulação ao encontrar o ângulo entre dois segmentos consecutivos do braço. No entanto, esse método necessita de n + 1 Micro:bits para calcular o ângulo de abertura de n articulações.

Os resultados obtidos para a posição, velocidade e aceleração angulares do antebraço utilizando o magnetômetro podem ser observados na Figura 6 e os do acelerômetro na Figura 7. Esse método apresentou imprecisões, especialmente quando o ângulo entre o vetor norte magnético e o plano yz se aproximava de 90°. Além disso, interferências eletromagnéticas influenciaram fortemente nos resultados obtidos.

Outra abordagem para o problema de localização do braço em duas dimensões foi usando trigonometria. Projetando os vetores norte de ambos os Micro:bits no plano yz, obteve-se duas retas paralelas. A partir dos ângulos entre os vetores norte e seus respectivos segmentos do braço, foi possível encontrar o ângulo entre os dois segmentos, considerando α o ângulo entre o segmento do Micro:bit acoplado ao braço e o vetor norte e β o análogo para o antebraço, sendo θ o ângulo formado entre o braço e o antebraço como mostrado na Equação 1. Apesar de resultados incompatíveis com o movimento realizado, essa abordagem mostrou coerência em algumas sessões do movimento, especialmente ao considerar o modelo do robô planar com juntas de revolução.

$$\theta = 2\pi - \alpha + \beta \tag{1}$$

FIGURA 6. Resultados obtidos pelo magnetômetro



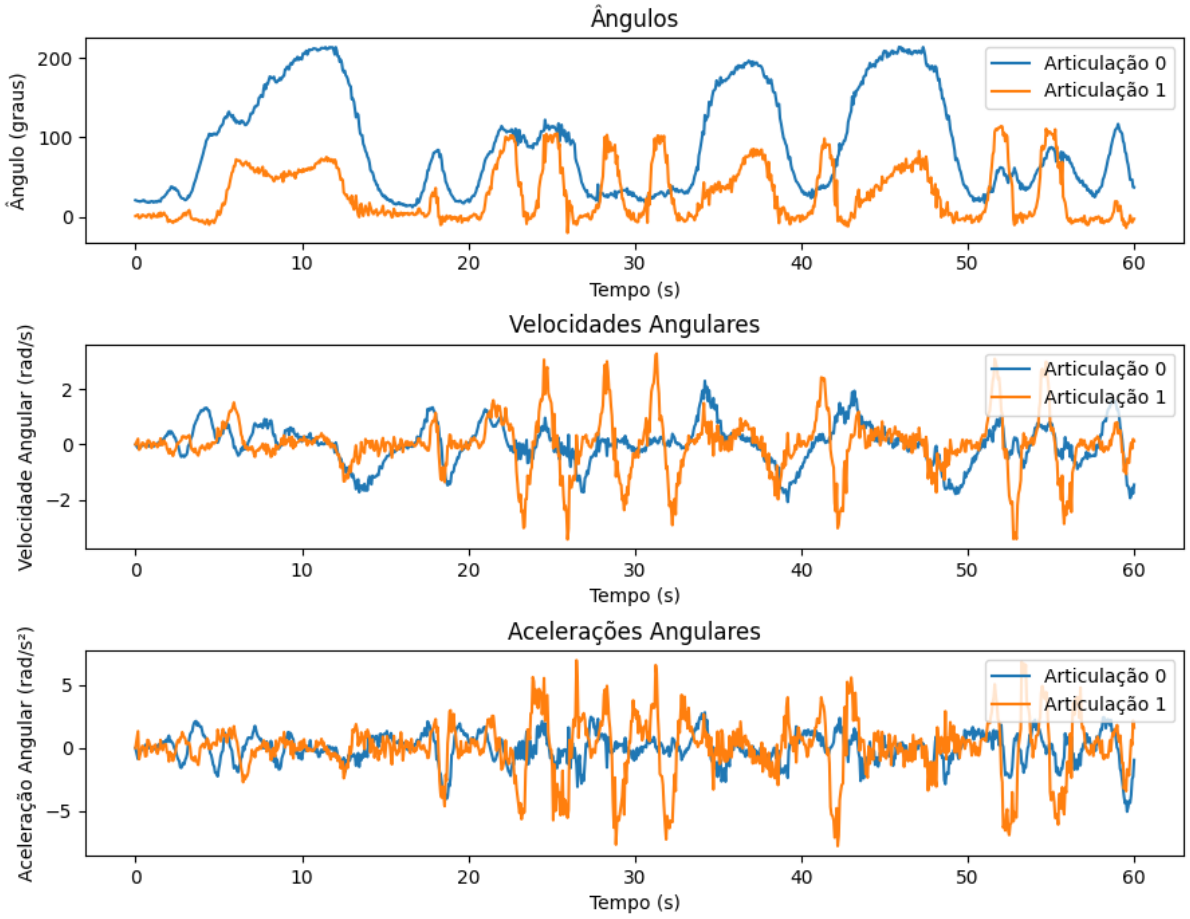
Fonte: Autores (2023)

Para localizar o braço articulado em três dimensões, foram utilizados diferentes métodos combinando o acelerômetro e o magnetômetro. No entanto, o magnetômetro apresentou muita imprecisão, inviabilizando algumas abordagens.

Finalmente, utilizar somente o acelerômetro para medir a inclinação vertical das juntas se mostrou o método mais eficaz. Para cada segmento do braço, o vetor da aceleração foi utilizado para determinar a inclinação em relação ao solo. A partir dos ângulos formados pelas articulações, foi utilizada a metodologia FIFO para obtenção das velocidades e acelerações angulares. Esse método permitiu determinar a posição da articulação em cada instante de tempo, independente dos estados anteriores. No entanto, movimentos muito rápidos podem tornar os resultados imprecisos devido ao ruído gerado pela gravidade.

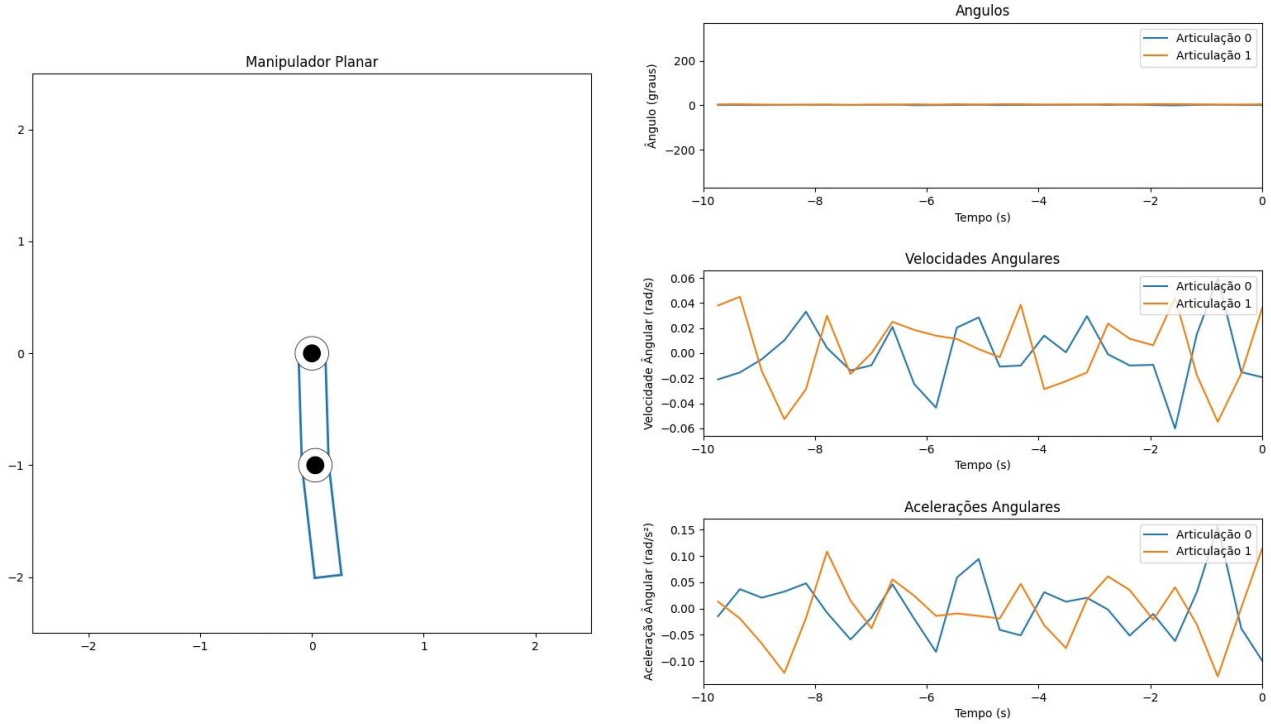
Os gráficos representando os membros foram gerados por vetores unitários adimensionais. Durante os experimentos, foram realizados movimentos suaves, mantendo os ângulos de abertura próximos de 90°. A partir do pacote Matplotlib (HUNTER, 2007), o movimento realizado pelo braço com os Micro:bits posicionados conforme a Figura 5 foi representado. O comportamento das inclinações, velocidades e acelerações angulares foi observado durante a execução de diferentes movimentos conforme as Figuras 8, 9 10 e 11.

FIGURA 7. Resultados obtidos pelo acelerômetro



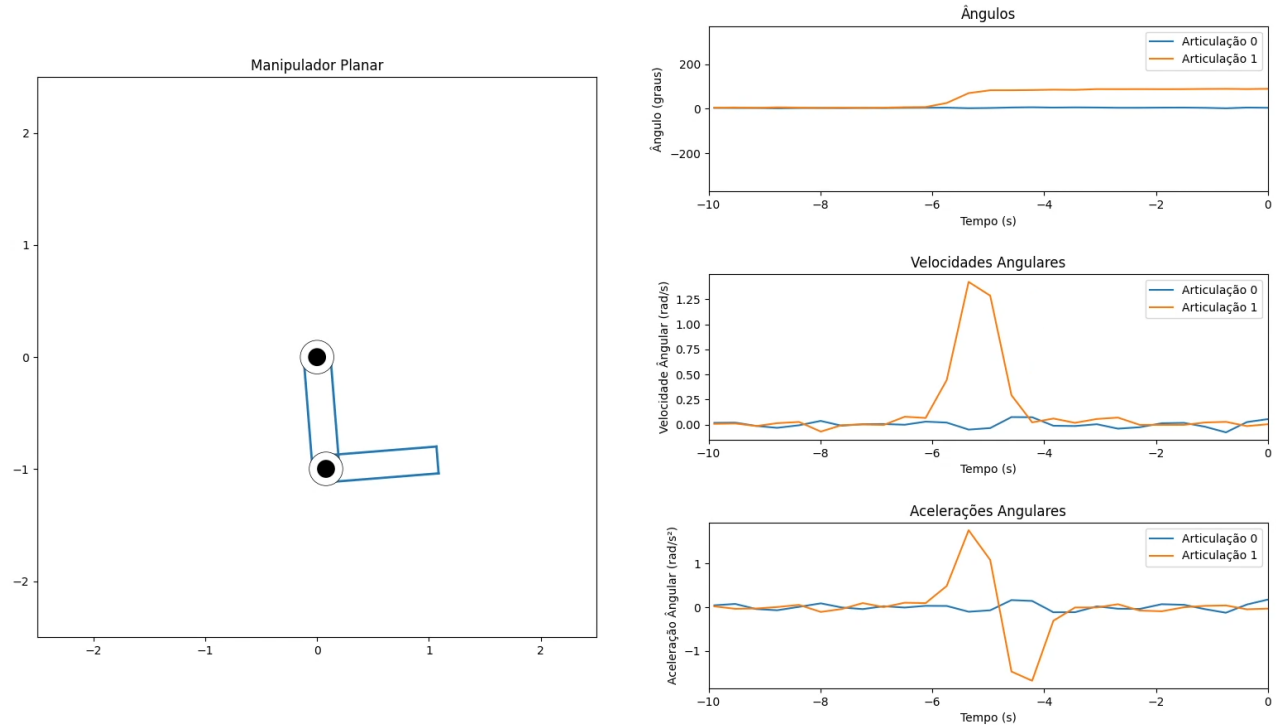
Fonte: Autores (2023)

FIGURA 8. Inclinação, velocidade e aceleração angulares para o braço em repouso



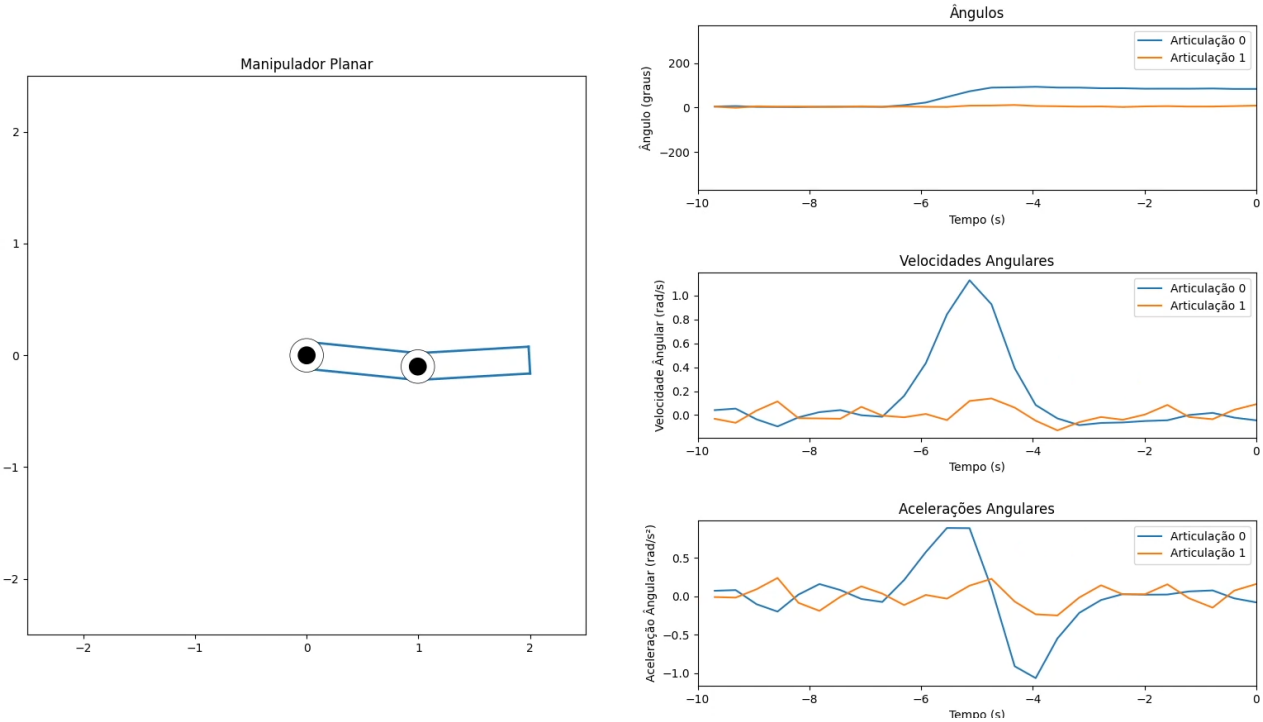
Fonte: Autores (2023)

FIGURA 9. Inclinação, velocidade e aceleração angulares para o antebraço flexionado a partir do braço em repouso



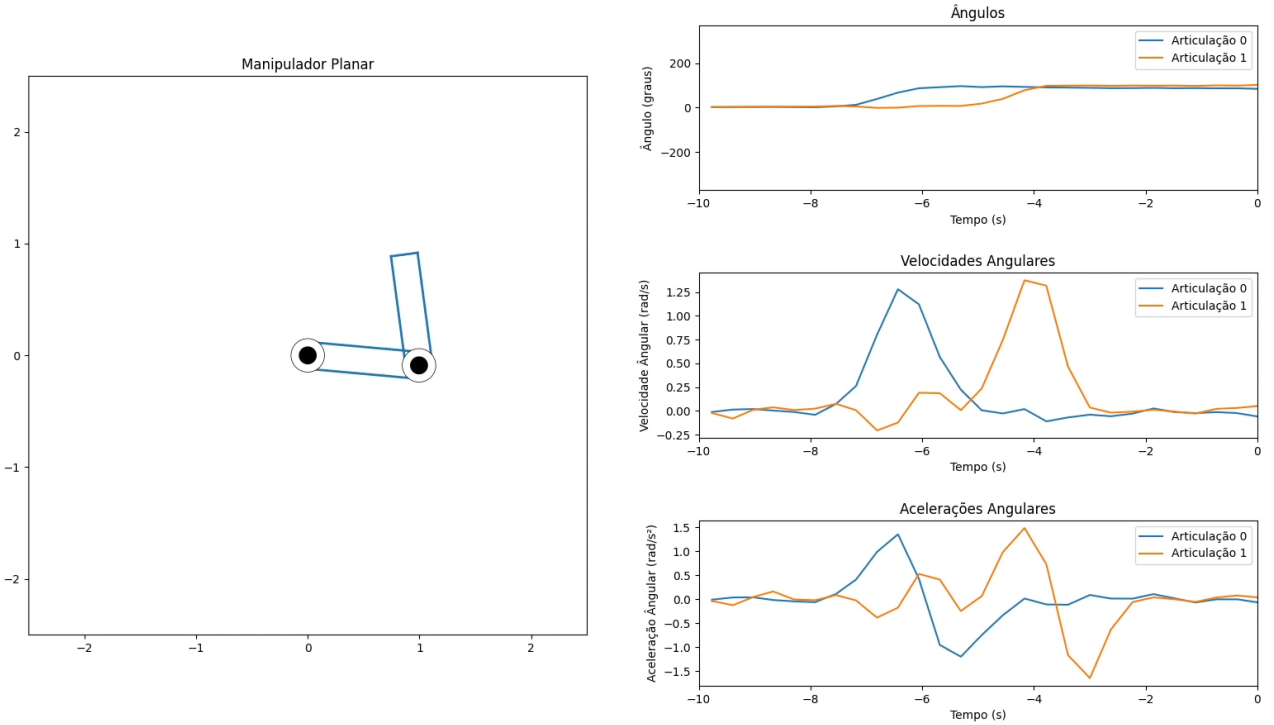
Fonte: Autores (2023)

FIGURA 10. Inclinação, velocidade e aceleração angulares para o braço estendido horizontalmente



Fonte: Autores (2023)

FIGURA 11. Inclinação, velocidade e aceleração angulares para o antebraço flexionado a partir do braço estendido horizontalmente



Fonte: Autores (2023)

4. CONCLUSÕES

Este projeto abordou o uso do Micro:bit como uma plataforma de baixo custo para captura de movimentos do corpo humano, aplicando conceitos de biomecânica e robótica na reabilitação de pessoas com deficiências físicas. A relevância desse trabalho é evidenciada pelos dados do IBGE, que mostram a existência de cerca de 17,3 milhões de pessoas com deficiência no Brasil.

A integração da biomecânica, robótica e Micro:bit apresenta um potencial significativo para avanços na reabilitação humana, criando um laboratório acessível e versátil para captura de movimentos e terapias personalizadas. Os resultados demonstram que o Micro:bit V2, com seus recursos aprimorados, é adequado para o projeto, permitindo a captura precisa de dados em tempo real sobre a aceleração, velocidade e posição dos membros durante os movimentos.

Os sensores de movimento embutidos no Micro:bit forneceram informações cruciais sobre a cinética e dinâmica dos movimentos dos membros do corpo humano. O acelerômetro tridimensional permitiu calcular a velocidade e posição angular dos segmentos do braço, enquanto o magnetômetro mostrou-se inadequado. Os códigos implementados em Python possibilitaram a captura, processamento e transmissão em tempo real dos dados sobre a posição, velocidade e aceleração dos segmentos do braço. A representação virtual dos movimentos foi gerada pela biblioteca Matplotlib, proporcionando uma visualização clara e coerente.

O Micro:bit como plataforma acessível oferece a possibilidade de reproduzir os movimentos em uma "prótese virtual", permitindo a avaliação e desenvolvimento de terapias personalizadas para pessoas com deficiências físicas. O desenvolvimento de tecnologias acessíveis para a reabilitação de pessoas com deficiências é de extrema importância para promover a inclusão e melhorar a qualidade de vida desses indivíduos. O laboratório de baixo custo desenvolvido neste projeto oferece uma solução viável e eficaz para a avaliação, monitoramento e desenvolvimento de terapias personalizadas, contribuindo significativamente para a área de reabilitação humana.

Os resultados obtidos a partir da análise cinemática dos movimentos do braço humano, simplificados neste trabalho, utilizando os Micro:bits foram satisfatórios e apresentaram potencial para aplicações na reabilitação e análise de movimentos.

É importante aprimorar a precisão da captura dos movimentos utilizando técnicas avançadas de filtragem de dados e calibração. A inclusão de mais sensores pode ampliar a gama de informações capturadas, permitindo análises mais detalhadas.

A disseminação do projeto e a disponibilização do laboratório como open-source são fundamentais para incentivar a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico na área da reabilitação humana. A colaboração entre instituições e pesquisadores pode enriquecer o projeto, levando a avanços significativos na área e beneficiando um maior número de pessoas com deficiências físicas. Assim que tais aprimorações forem concluídas, os autores irão disponibilizar os códigos e instruções para o uso gratuito desta metodologia.

Em conclusão, a aplicação da biomecânica, robótica e tecnologia do Micro:bit na captura de movimentos do corpo humano é uma abordagem promissora para a reabilitação de pessoas com deficiências físicas. A colaboração entre diversas disciplinas e a disponibilidade do projeto como open-source demonstram o potencial de soluções acessíveis para melhorar o bem-estar dos futuros usuários e beneficiários desta tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Micro:bit Educational Foundation, representada pelo Sr. José Antonio Scodiero, por ter apoiado o projeto e proporcionado versões mais atualizadas do micro:bit que foi utilizado, as quais tornaram a realização deste projeto possível.

REFERÊNCIAS

BBC Microbit. Micro:bit Educational Foundation, 2023. Disponível em: <https: //microbit.org/new-microbit/>.

CORKE, P. Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in matlab. 2th edition, Springer, 2017.

CRAIG, J. Introduction to robotics: Mechanics and control. 4th edition, New York: Pearson, 2017.

GUIDO, V. R.; DRAKE, F. L. J. Python reference manual. [S.l.]: Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.

HALL, S. J. Biomecânica básica. Guanabara Koogan; 8ª edição, 2020.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. [S.l.]: Nature, Springer Science and Business Media LLC, 2020.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. [S.l.]: Computing in Science and Engineering; IEEE COMPUTER SOC, 2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31445-pns-2019-pais-tem-17-3-milhoes-de-pessoas-com-algum-tipo-de-deficiencia>.

Kasper's Micro:bit. Janick Reynders, 2022. Disponível em: <https://github.com/janickr/kaspersmicrobit>.

LI, P.; LIU, X. Common sensors in industrial robots: A review. IOP Publishing Ltd, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33. LSM303AGR. STMicroelectronics, 2022. Disponível em: <https://www.st.com/en/ mems-and-sensors/lsm303agr.html>.

LUSTOSA, L. P. et al. Uso terapêutico de tecnologias assistivas: direitos das pessoas com deficiência e habilidade física e motora. Belo Horizonte: Nescon/UFMG, 2015.

MAKECODE. Microsoft Makecode, 2023. Disponível em: <https://makecode.microbit. org/>.

Microbit Hardware. Micro:bit Educational Foundation, 2022. Disponível em: <https://tech.microbit.org/hardware/>.

MILLER, M.; MILLER, R. Robots and robotics: Principles, systems, and industrial applications. McGraw-Hill Companies, 2017.

ROCKS, S. BBC Micro:bit at Bett 2016. BBC, 2016. Disponível em: <https: //www.bbc.co.uk/blogs/aboutthebbc/entries/32f2edad-d51f-41bb-af98-f42f41d0a705>.

ROETENBERG, D. et al. Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2005.

RONG, Y. et al. Algorithm research of magnetometer assisted inertial navigation system for mobile robots. IEEE International Conference on Micro/Nano Sensors for AI, Healthcare and Robotics, 2019.

SPONG, M. W. et al. Robot modeling and control. 2th edition, New Jersey: Wiley, 2020.

W3C. World Wide Web Consortium, 2023. Disponível em: <https://www.w3.org/TR/ motion-sensors/>.

WU, F. et al. A compact magnetic field-based obstacle detection and avoidance system for miniature spherical robots. Sensors 2017, 2017.

ZHU, R.; ZHOU, Z. A real-time articulated human motion tracking using tri-axis inertial/magnetic sensors package. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2004.