



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

ANÁLISE DE CONTROLE PID EM UMA PRÓTESE DE MÃO

Wilton Magalhães Bertoldo, wiltonmb@gmail.com¹
Celso Yutaka Akaoka, yutakaakaoka57@gmail.com¹
Pedro Henrique Sampaio Franco, pedrosaamp@gmail.com¹
Braion Barbosa de Moura, bbmoura@udf.edu.br¹

¹Centro de Ensino Unificado do Distrito Federal - UDF, SGAS 903 Conj. D, Lote 79 Asa Sul – Brasília | CEP 70390-030

Resumo. Com o desenvolvimento tecnológico presente na atualidade, muitas tecnologias que antes não eram acessíveis hoje podem ser utilizadas com mais facilidade, trazendo a possibilidade de criação e simulação de projetos feitos em CAD (desenho assistido por computador). Uma dessas tecnologias são as próteses de membros humanos que reabilitam diversas atividades ao usuário. Nessa ideia, o presente trabalho tem como objetivo criar uma prótese de mão biônica híbrida, utilizando conceitos básicos de robótica e programação. Esse conceito híbrido é oriundo da utilização de meios mecânicos e elétricos interconectados a um sistema de controle aplicado, sendo ele PID (Proporcional, integral e Derivativo) guiado por sensores de ativação. Os sensores são do tipo piezoelétricos e trabalham de forma a converter a deformação gerada por músculos do antebraço em sinais elétricos que serão interpretados por um microcontrolador. Dessa forma, a prótese pode ser configurada a receber diferentes sugestões pelo usuário e consequentemente executar movimentos distintos para cada sugestão. A metodologia do trabalho é dividida em etapas que compreendem a escolha de materiais e componentes, testes de captação de sensores e aplicação do controle através da programação, tendo impacto nos movimentos por classes de sugestões. Os resultados desse estudo denotam uma prótese de baixo custo passível de executar atividades por meio de sugestões sutis do usuário no próprio membro em que a prótese é acoplada. Logo, o presente trabalho apresenta uma solução de acessibilidade para pessoas com membros amputados ou condições similares.

Palavras chave: Prótese, Manipulador, Robótica Industrial, Sensores, Controle.

Abstract. With the technological advancements of today, many technologies that were previously inaccessible can now be utilized with greater ease, enabling the creation and simulation of projects using CAD (Computer-Aided Design). One such technology is prosthetic limbs, which restore various activities to the user. In this context, the present work aims to create a hybrid bionic hand prosthesis using basic concepts of robotics and programming. This hybrid concept arises from the use of interconnected mechanical and electrical means with an applied control system, specifically PID (Proportional, Integral, and Derivative) control guided by activation sensors. The sensors are piezoelectric and work by converting the deformation generated by forearm muscles into electrical signals, which are interpreted by a microcontroller. Thus, the prosthesis can be configured to receive different inputs from the user and consequently execute distinct movements for each input. The methodology of the work is divided into stages that include the selection of materials and components, sensor data acquisition tests, and the application of control through programming, impacting movements by classes of inputs. The results of this study indicate a low-cost prosthesis capable of performing activities through subtle suggestions from the user in the limb to which the prosthesis is attached. Therefore, this work presents an accessibility solution for people with amputated limbs or similar conditions.

Keywords: Prosthesis, Manipulator, Industrial Robotics, Sensors, Control.

1. INTRODUÇÃO

A robótica, ciência e tecnologia de mecanismos autônomos controlados por computador, é altamente interdisciplinar, combinando ciência da computação, engenharia e física aplicada (Schwartz; Yap, 2016). Envolve diversas áreas como engenharia mecânica, elétrica e inteligência artificial, trabalhando em harmonia para criar as tecnologias atuais. Segundo o Guia Almanaque da Modelix Robotics (2015), robótica é a ciência que estuda a construção de robôs, sistemas compostos por partes mecânicas automáticas, controladas por circuitos integrados, podendo ser manuais ou automáticas.

Com o grande avanço da robótica na área da saúde, surgiram soluções seguras e eficazes para diversas situações, sejam elas cirurgias realizadas por máquinas de alta precisão, produção de remédios por braços robóticos na indústria

farmacêutica, próteses de membros na reabilitação fisioterapêutica, etc. A mão biônica, um dispositivo robótico que pode replicar os movimentos e características de uma mão humana, exemplifica bem essas inovações. Seu uso varia de tele operação e próteses a construção de robôs humanoides, oferecendo novas possibilidades de reabilitação aos pacientes e devolvendo funções perdidas por acidentes ou doenças degenerativas, facilitando a reintegração às atividades cotidianas (Ribeiro D.B.S et al., 2017; Priscila V et al., 2020).

Para aqueles que perderam algum membro devido a acidentes ou doenças degenerativas, a adaptação à nova realidade pode ter um impacto significativo na saúde física e mental do indivíduo. A implantação de próteses surge como uma solução para amenizar essas possíveis sequelas, suprimindo a função do membro perdido e reduzindo as dificuldades pré e pós-tratamento (Soares et al., 2015). Assim, o objetivo é desenvolver uma prótese funcional e confortável para a substituição de uma mão, promovendo mais autonomia e melhoria na qualidade de vida dessas pessoas.

A mão humana, parte final do membro superior próxima ao antebraço, é composta pelo carpo, metacarpo e falanges, incluindo punho, palma, dorso das mãos e dedos, ricamente providos de terminações sensoriais que permitem sensação de toque, dor e temperatura (Netter et al., 2008; Moore, Dalley et al., 2007). Considerando o conforto, será utilizada a tecnologia de sensores piezoelétricos para detectar as atividades dos grupamentos musculares. Esses sensores captam dados gerados pela deformação muscular, convertendo-os em sinais elétricos lidos pelo controlador, que então comandará os movimentos da prótese, permitindo replicar movimentos como abrir, fechar a mão e girar o pulso (Deivyson et al., 2018; Ana C. D. R. et al., 2020).

Contextualizando, a protetização é um método antigo, amplamente utilizado para substituir membros amputados ou malformados (Tagliari et al., 2008). Segundo a Fundação de Articulação e Desenvolvimento de Políticas Públicas (FADERS, 2018), uma prótese é um dispositivo destinado a substituir um órgão ou membro destruído, enquanto uma órtese corrige ou supre uma alteração morfológica de um órgão ou membro. As próteses visam substituir um membro ausente, seja por sequelas ou por condições congênitas.

Tendo isso em vista, atualmente, existem vários tipos de próteses de mãos disponíveis no mercado, muitas delas com tecnologia importada e custo elevado, tornando seu uso inviável para a maioria das pessoas necessitadas. A Otto Bock Industry, Inc (Blohmke, 1994), por exemplo, desenvolveu uma classificação para próteses: Estéticas ou Passivas, Mecânicas ou Ativas, Mioelétricas e Híbridas.

Neste contexto, propõe-se o desenvolvimento de uma prótese robótica de mão para realizar tarefas básicas do dia a dia, utilizando-se de três elementos em conjunto: a utilização de sensores piezoelétricos para detectar atividades musculares, a implementação de três tipos de movimentos essenciais (abrir e fechar a mão, e girar o pulso), e a construção de baixo custo. Esses elementos visam promover mobilidade e acessibilidade, oferecendo uma substituição eficaz para um membro real, com simplicidade na construção e produção econômica.

2. MATERIAIS & MÉTODOS

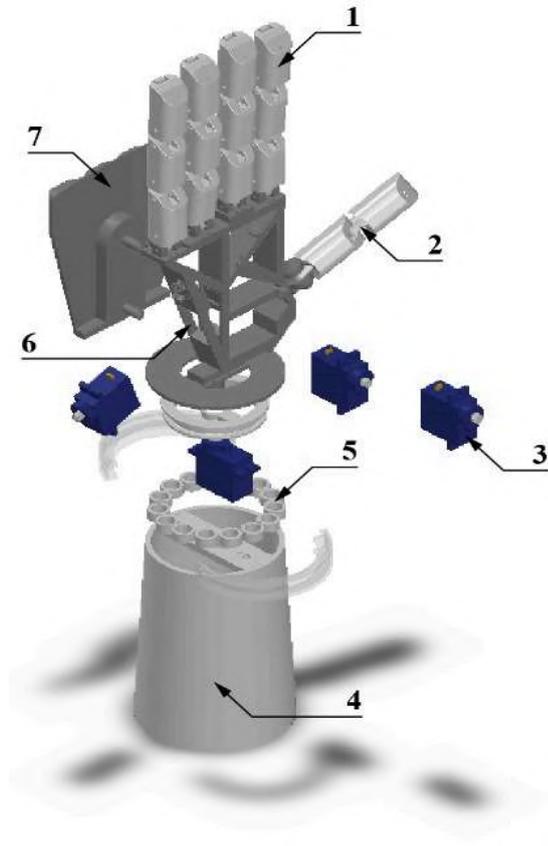
Toda a construção, desde o desenho inicial, foi centrada na ideia de criar um membro que pudesse substituir parte do antebraço e a mão. Foi-se utilizado como base modelos desenvolvidos e publicados no artigo "Recent advancements in prosthetic hand technology" do Journal of Medical Engineering & Technology, onde são abordados conceitos de forma aprofundada quanto à evolução da tecnologia no desenvolvimento de próteses de mão. Utilizando softwares como Thingiverse e GrabCAD, a construção se iniciou do zero com o objetivo de alcançar algo funcional. O projeto foi desenhado no software de licença estudantil AutoDesk Fusion, permitindo a criação, validação estrutural, simulação de movimentos e acabamento.

Como citado anteriormente, o desenho da prótese foi realizado no software paramétrico CAD Autodesk Fusion®. Este software proporciona uma visualização de alta qualidade, permitindo identificar possíveis problemas ou formas mecânicas mais acessíveis que podem oferecer maior ergonomia ao paciente. Também foi possível simular os movimentos dos dedos, proporcionando uma representação mais realista de sua movimentação. Além disso, foi planejado o espaço para os componentes elétricos e circuitos, criando um design inteligente que proporciona o posicionamento adequado de cada motor, exemplificando assim como a substituição do membro pode ser eficiente.

Com base no conceito teórico, tanto físico quanto mecânico, a prótese foi impressa em uma impressora 3D. Com máquinas de manufatura aditiva, que constroem objetos por deposição de material em camadas e através de materiais termoplásticos aquecidos, os objetos propostos foram desenvolvidos. Para este projeto, foi utilizada uma Creality Ender 3 e uma impressora de resina Anycubic Photon S. Posterior ao desenho, houve o fatiamento dos componentes exportados, criando assim todas as peças necessárias para a substituição e a realização de testes práticos.

Os componentes da prótese foram planejados sob medida (Figura 1). A palma da mão foi criada com uma estrutura de treliça para otimização de material e resistência, já as juntas foram desenhadas para formar os ligamentos entre os elos, semelhantes às falanges dos dedos. Por fim, para a fixação da mão, há um rolamento de cilindros que permite o giro em seu próprio eixo. A base serve como suporte e passagem para as conexões elétricas, funcionando também como o antebraço.

Os movimentos são reproduzidos por fios de nylon passados por furos de 0,5 mm nos elos, que fazem conexão com o motor, quando os fios são tensionados os dedos se fecham. No entanto, a abertura dos dedos não ocorre apenas com o alívio dos fios, e para resolver isso, foram adicionados suportes para elásticos na parte superior da prótese, permitindo que os dedos se abram novamente de forma simplificada, sem sobrecargas desnecessárias ao se fechar a mão.



1	Elos	Compõem a estrutura da mão, se assemelha à falange dos dedos.
2	Juntas	Articulações que conectam os elos, responsáveis por reproduzir o funcionamento de uma articulação real.
3	Motores	Micro Servo 9G SG90, responsáveis pelo acionamento da movimentação.
4	Base	Suporte fixo e imóvel que serve de estrutura de apoio para a fixação e estabilização dos componentes e das conexões.
5	Rolamento	Composto por cilindros, seu intuito é permitir o giro da mão em relação ao antebraço (Base).
6	Palma da Mão	Feita sob medida para permitir o devido encaixe dos servos.
7	Proteção	Uma peça que cobre toda a parte traseira da mão.

Figura 1: Vista explodida.

Para gerenciar toda a estrutura, foi pensado um sistema de controle que recebe dados, os processa e os direciona aos atuadores, que são os motores. A partir disso, o controle foi dividido de maneira estratégica em sensores e atuadores, onde os sensores piezoelétricos, que são componentes sensíveis a deformações, geram uma tensão que pode ser lida pelo controlador e efetivada pelo atuador. Para isso, foi confeccionada uma braçadeira onde os sensores foram posicionados em diferentes partes do antebraço para a aquisição dos dados (Figura 2), partes essas que mais se deformam a partir de algum tipo de atividade muscular na mão.



Figura 2: Braçadeira com piezoelétricos.

Ainda seguindo essa linha de raciocínio, a construção da mão foi realizada tanto em resina quanto em filamento plástico ABS (acrilonitrila butadieno estireno). Os materiais foram escolhidos para reduzir os custos de produção e para

validar as dimensões e a mecânica do projeto. Após a impressão, foi realizada a montagem conforme projetado, onde houveram certas adaptações necessárias para o encaixe dos motores e a passagem dos fios (Figura 3). Para as juntas, há cilindros de arame responsáveis por manter os elos conectados e os motores foram fixados com resíduo autocolante, o que permitiu o funcionamento previsto.

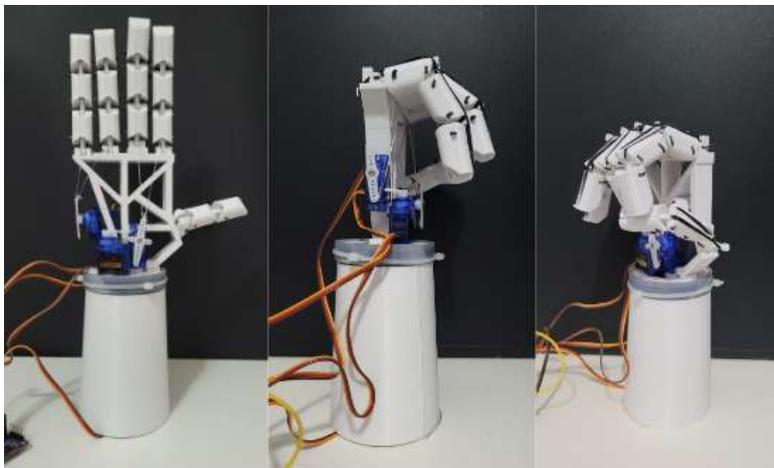


Figura 3: Prótese impressa mantendo posições aberta e fechada.

Agora pertinente ao funcionamento, os valores armazenados são convertidos para que possam ser lidos pelo microcontrolador, que no caso é um Arduino Uno, vale ressaltar que este microcontrolador foi escolhido pelo seu tamanho compacto e capacidade de leitura de dados suficiente para esta aplicação. Além disso, sua construção minimalista disponibiliza espaço para as fiações elétricas e garante uma taxa de leitura e controle estável, sem preocupações com gargalos à primeira vista.

O circuito elétrico (Figura 4) é composto por um Arduino Uno, quatro servomotores 9G SG90, quatro sensores piezoelétricos, um módulo PCA9685 I2C e uma fonte de 3V. Três dos servo motores são responsáveis pelo movimento dos dedos: um controla o polegar, o segundo controla os dedos médio e indicador, e o terceiro controla os dedos anelar e mínimo. O quarto motor é responsável pelo movimento do pulso da prótese. O módulo PCA9685 expande a capacidade do Arduino Uno de controlar múltiplos motores simultaneamente.

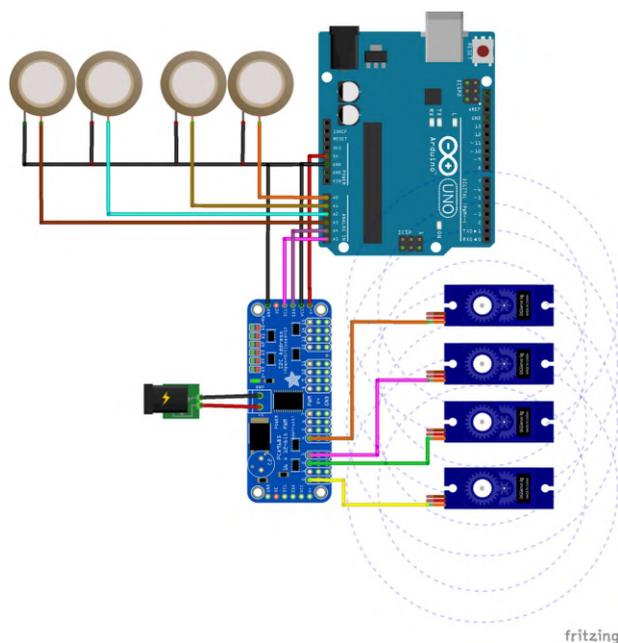


Figura 4: Circuito elétrico.

Para reduzir as instabilidades no sistema, fez-se necessário a aplicação de um controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Um controlador PID calcula o próximo valor de controle com base no erro atual, no erro acumulado ao longo do tempo e na taxa de mudança do erro. No contexto deste sistema, os dados dos sensores piezoelétricos determinam a ativação dos servomotores, conforme os valores numéricos predefinidos no algoritmo.

Os parâmetros do PID foram ajustados para obter a resposta desejada do sistema: Kp (Proporcional): Reação rápida, mas pode causar oscilações se muito alto (StackExchange, 2023). Ki (Integral): Corrige o erro residual ao longo do tempo, mas pode causar instabilidade se muito alto (PID explained, 2019). Kd (Derivativo): Suaviza a resposta do sistema, prevenindo oscilações excessivas, mas pode reduzir a eficácia da correção se muito alto (StackExchange, 2023).

Para o devido funcionamento e análise durante o planejamento, foram desenvolvidos dois códigos. Primeiramente, um código em C++ (Figura 5), que é responsável pelo gerenciamento dos sensores e atuadores, este gerencia a leitura dos dados dos sensores piezoelétricos e o controle dos servomotores por meio de um controlador PID. O segundo código foi desenvolvido em Python (Figura 6) e é responsável pelo armazenamento dos valores recolhidos em um banco de dados e pela plotagem dos dados em gráficos. O Python é utilizado para ler os dados enviados pelo Arduino via porta serial, armazená-los em um arquivo CSV e, em seguida, processar e visualizar esses dados.

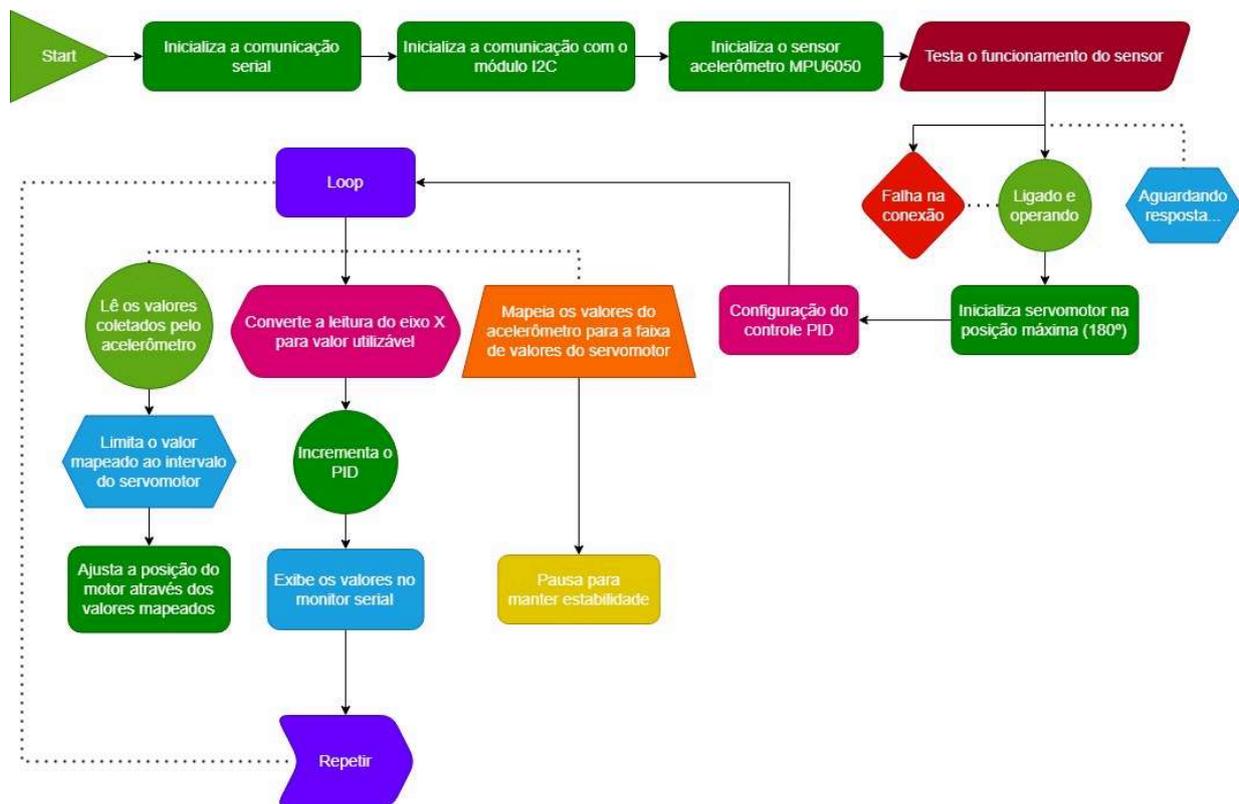


Figura 5: Fluxograma do código em C++.

O código começa importando as bibliotecas necessárias para a comunicação I2C com o acelerômetro, controle do servo motor e implementação do controle PID. Objetos são criados para representar os sensores e atuadores, e variáveis são definidas para armazenar os dados do acelerômetro (ax, ay, az) e do giroscópio (gx, gy, gz). O controle PID é configurado com variáveis para o ponto de ajuste (set point), entrada e saída.

Já na etapa de inicialização do hardware, a comunicação serial é configurada para operar na faixa de 115200 bauds, e a comunicação I2C é estabelecida para o acelerômetro. Após a inicialização e verificação da conexão do acelerômetro, o servo motor é posicionado inicialmente em seu ponto máximo (180°). O ponto de ajuste é configurado com base no valor do eixo X do acelerômetro e o controlador PID é ajustado para o modo automático, com limites de saída entre 0 e 180 graus, relacionando assim ambos os valores agora em uma faixa semelhante.

No loop principal do código, os valores de aceleração do acelerômetro e os dados do giroscópio são lidos e armazenados. A aceleração no eixo X é usada como entrada para o controlador PID, sendo mapeada para o ângulo do servo motor entre 0 e 180 graus, enquanto que o PID calcula a saída e ajusta constantemente a posição do servo motor

conforme necessário. Os valores de aceleração no eixo X e o ângulo de saída do servo motor são impressos na porta serial para monitoramento contínuo, com uma pequena pausa para garantir a estabilidade do sistema.

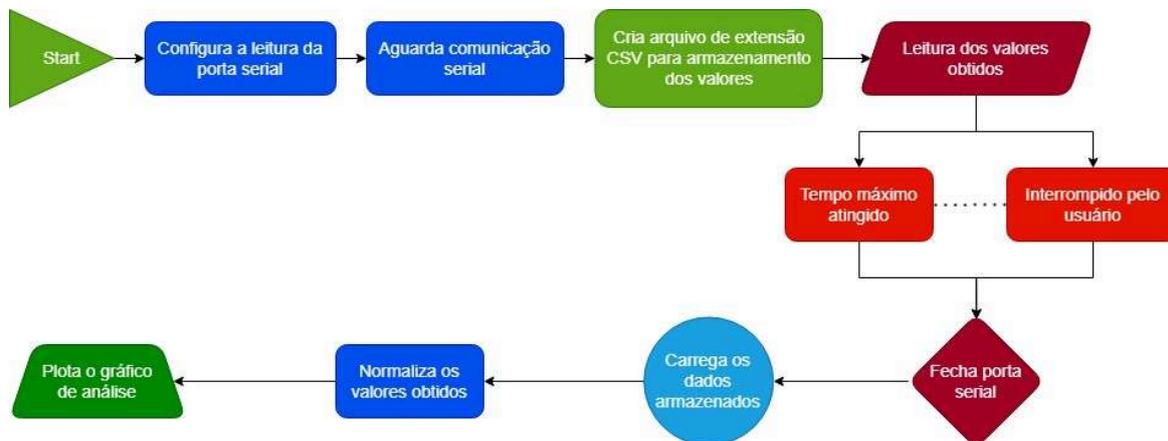


Figura 6: Fluxograma do código em Python

O código secundário (Figura 6) é responsável pela plotagem do gráfico e pelo armazenamento dos valores captados pelo MPU6050, ele realiza a leitura de dados do sensor através de uma conexão serial, registra esses dados em um arquivo CSV e, posteriormente, processa e plota um gráfico (Valores obtidos pelo MPU6050 X Posições em ângulo adotadas pelo servomotor).

Primeiramente, o código configura a comunicação serial com uma porta específica e uma taxa de transmissão, que é a mesma definida no código central. Após a inicialização do sistema, é gerado um arquivo CSV que armazena os dados coletados. O programa define um tempo máximo de leitura de 10 segundos e registra o tempo inicial para controlar a duração da coleta de dados.

Em seguida, o programa entra em um loop que lê continuamente os dados da porta serial até que o tempo máximo seja atingido. Cada linha de dados recebida é decodificada, processada e, se válida, é escrita no arquivo CSV. Caso o usuário interrompa a execução, o loop é encerrado e a aquisição de dados é finalizada.

Após a coleta, o programa utiliza a biblioteca Pandas para processar os dados do arquivo CSV. Em seguida, os valores do eixo X do acelerômetro são escalonados para o intervalo de 0 a 180 utilizando a biblioteca Scikit-learn, considerando que o servomotor opera dentro desse intervalo de valores (em ângulo). Finalmente, o código gera um gráfico com os dados do acelerômetro em relação ao ângulo adotado pelo servomotor.

3. RESULTADOS & DISCUSSÕES

A localização dos sensores piezoelétricos se provou crucial para o devido funcionamento da prótese. Através de uma prévia pesquisa sobre a movimentação da mão, concluiu-se que todos os movimentos realizados por ela envolvem músculos e tendões que se originam no antebraço. Esses foram localizados e identificados como os músculos flexores da mão, tendões dos músculos flexores da mão, músculos flexores do punho e ulnar do carpo, e músculos extensores do dedo mínimo. Depois de identificados, os sensores foram fixados com cola, estabelecendo um padrão, ainda que superficial, para a leitura.

No entanto, devido ao espaço limitado dentro e fora da prótese, foi identificado que os dedos não conseguem realizar o movimento completo de fechamento da mão. Uma das causas desse fechamento incompleto pode ser o fio de nylon utilizado. Para solucionar esse problema, sugere-se a substituição do fio de nylon por uma linha de pesca de seda, que oferece maior resistência e menor elasticidade. Essa mudança permitiria uma maior amplitude de movimento dos dedos, possibilitando o fechamento completo da mão.

Ademais, antes da aplicação do controle PID, os sensores piezoelétricos foram conectados às portas analógicas do microcontrolador, portas essas que são capazes de receber, ler e fornecer diferentes níveis de tensão. Para uma análise mais precisa dos valores recebidos, os valores eram dobrados, e um filtro era aplicado em cada movimento. As novas variáveis resultantes dessa filtragem foram nomeadas como NovoValor1, NovoValor2, NovoValor3 e NovoValor4.

Com o refinamento do código visando uma movimentação mais fluida, se é necessário ajustar as variáveis pertinentes ao PID, ajuste esse que, através da abordagem de Ziegler-Nichols, que se inicia com K_i e K_d em zero, aumentando K_p até que o sistema responda de forma rápida e estável. Em seguida, deve-se adicionar e aumentar o K_i

para corrigir o erro de estado estacionário sem causar oscilação indesejada. Por fim, adicione K_p para reduzir oscilações sem introduzir ruídos excessivos.

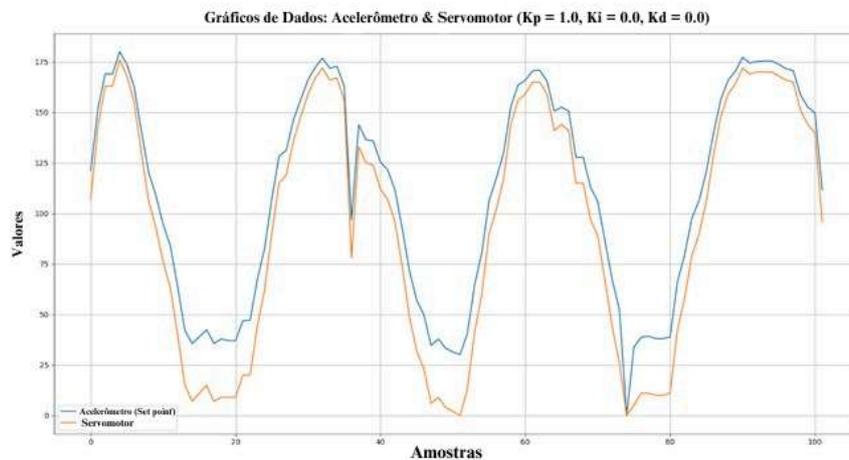


Figura 7: Gráfico da relação Set Point \times Resultados com $K_p = 1.0$, $K_i = 0.0$, $K_d = 0.0$.

Adotando os valores iniciais padrões (Figura 7) foram obtidos resultados insatisfatórios. Apesar de o sistema já ter um tipo de relação decente, com estes valores o funcionamento real está longe de ser o ideal. Após alguns testes, através de tentativa e erro, ao se assumir o valor inicial de 5.0 ao K_p , 1.0 ao K_i e 10.0 ao K_d (Figura 8), já foi alcançado um resultado que é muito próximo ao ideal e com isso foram definidas as variáveis ideais do PID.

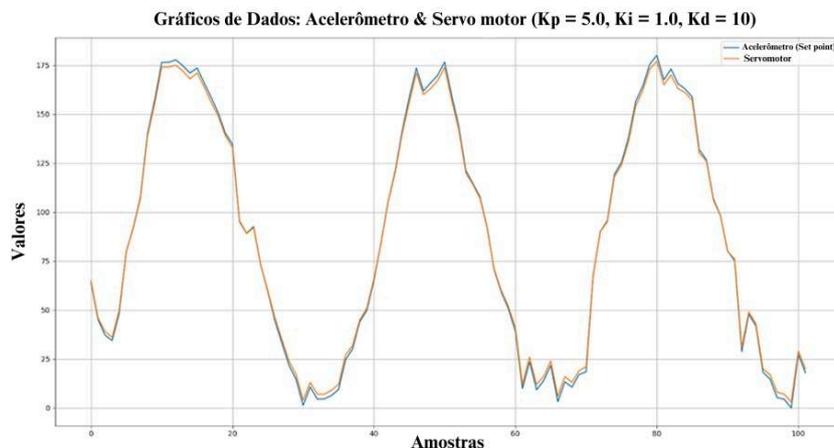


Figura 8 – Gráfico da relação Set Point \times Resultados com $K_p = 5.0$, $K_i = 1.0$, $K_d = 10.0$.

Ademais, embora os sensores piezoelétricos tenham sido fundamentais para o funcionamento da prótese, é importante considerar os desafios associados à sua sensibilidade. Qualquer toque, pressão ou impacto indesejados geram uma tensão nos sensores, tensão essa que aciona o movimento sem que tivesse sido solicitado, isso resultava em leituras imprecisas e afetava o desempenho da prótese. Nos gráficos das figuras 7 e 8 podemos ver as pequenas variações citadas anteriormente. Além disso, o movimento realizado pela prótese é muito brusco, podendo futuramente trazer defeitos a ela. Pensando nisso, a aplicação de um controle PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo) pode ser uma solução. Com o controle PID, o controle dos motores se tornou mais preciso, melhorando o desempenho geral da prótese.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste projeto, foi avaliado o planejamento, a construção e os resultados obtidos ao se desenvolver uma prótese de mão eletromecânica simplificada. A construção foi planejada para atender às funções básicas, utilizando a leitura de grupamentos musculares para suporte e acessibilidade. A prótese possibilita que pessoas sem o membro possam realizar tarefas cotidianas. Foi demonstrado que a construção é resistente até certo ponto, suportando certos impactos e leves

desgastes do uso diário, podendo ser produzida com máquinas acessíveis, permitindo assim sua fabricação sem a disposição de muitos recursos.

O controle da prótese foi implementado com um Arduino, um microcontrolador comum e acessível, sensores piezoelétricos e servomotores. Esses componentes foram posicionados dentro da prótese, permitindo a abertura e fechamento dos dedos através de ações mecânicas e elétricas controladas pelo código desenvolvido.

A inserção de um acelerômetro permitiu um controle mais preciso, ajustado à velocidade de ativação dos motores. Junto a isso, a implementação de um controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo) permitiu o cálculo do erro entre o ângulo adquirido e o ângulo ideal definido no algoritmo, oferecendo maior conforto e confiabilidade ao usuário durante o uso, especialmente ao segurar, pegar ou soltar objetos. Isso traz facilidade e ergonomia adicionais, beneficiando a adaptação e o possível tratamento fisioterapêutico atrelado a sua utilização.

No entanto, alguns desafios foram identificados durante os testes. A leitura dos sensores apresentou falhas quando havia suor na região de contato, resultando em valores fora do esperado. A sensibilidade dos sensores também causou leituras imprecisas devido a toques, impactos ou pressões inadvertidas. Além disso, o uso de fios de nylon para a contração dos dedos mostrou-se inadequado, uma vez que se rompia em poucos usos, indicando a necessidade de um planejamento mais eficaz.

Portanto, como melhorias futuras, sugere-se uma construção mecânica mais robusta e efetiva nas partes de articulações, que seja capaz de suportar mais carga. Tendo isso em vista, a análise de elementos finitos pode ser utilizada para validação estrutural antes da produção de um novo protótipo. Ademais, a utilização de motores mais fortes permitirá segurar objetos mais pesados e executar movimentos mais fluidos e controlados. Para um controle mais sofisticado, recomenda-se o uso de um controlador mais potente, como o ESP32, que possui uma taxa de processamento maior e recursos mais avançados para essa aplicação.

5. REFERÊNCIAS

1. Ana C M, Camille R, Maria E F, Monique R, Priscila R, Priscila V F, Fisioterapia Através da Mão Biônica. 2020.
2. Ana Carolina Dantas Rocha, DESENVOLVIMENTO DE UMA MÃO BIÔNICA AUTOMATIZADA IMPRESSA TRIDIMENSIONALMENTE EM POLÍMERO RECICLADO. 2020.
3. BLOHMKE, F. Compêndio otto bock: Próteses para o membro superior. Berlin: Schiele & Schön, p. 31, 1994.
4. D. B. Silva Ribeiro, Mão biônica controlada por luva de sensores. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, p. 39, dez. 2018.
5. DE SOUSA ALVES, F. A. Protótipo de prótese robótica de punho e mão utilizando arduino. Trabalho de Conclusão de Curso, p. 64, ago. 2018.
6. Deivyson B S R, Mão biônica controlada por luva de sensores. 2018.
7. F. A. De Sousa Alves, Protótipo de prótese robótica de punho e mão utilizando arduino. Trabalho de Conclusão de Curso, p. 64, ago. 2018.
8. João Eduardo Polis, Projeto e Construção de Parte Estrutural de Prótese de Mão Humana com Movimentos, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009, 69 p., Dissertação (Mestrado).
9. MOORE, K.; DALLEY, A. O membro superior. Anatomia orientada para a clínica, v. 5, 2007.
10. NETTER, F. H. Netter-Atlas de anatomia humana. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2008.
11. PID Explained team, 2019 "PID Controller Explained". 12 de Jun. 2024 <<https://pidexplained.com/pid-controller-explained/>>
12. Priscila V F, Ana C M, Camille R, Maria E F, Monique R, Priscila R, Fisioterapia Através da Mão Biônica. 2020.
13. R. Seren, R. DE TILIO, As vivências do luto e seus estágios em pessoas amputadas. Revista da SPAGESP, v. 15, n. 1, p. 64-78, 2014.
14. SCHWARTZ, J. T.; YAP, C.-K. Algorithmic and Geometric Aspects of Robotics (Routledge Revivals). [S.l.]: Routledge, 2016.
15. Sérgia L B Soares, Avaliação dos usuários de prótese total, abordando aspectos funcionais, sociais e psicológicos. 2015.
16. StackExchange. How do the PID parameters (Kp, Ki, and Kd) affect the heading of a differential driving robot when they are increased individually? - 2023. <<https://robotics.stackexchange.com/questions/9786/how-do-the-pid-parameters-kp-ki-and-kd-affect-the-heading-of-a-differential#:~:text=An%20increase%20by%20double%20the,error%20is%20increased%20over%20time.>>
17. VINICIUS NEVES DE FIGUEIREDO. Curso de Introdução ao Arduino. 2015.