

INTEGRAÇÃO DE EEG E CONTROLE DE ATUADORES ELETRÔNICOS: EXPLORANDO INTERFACES CÉREBRO-COMPUTADOR PARA APLICAÇÕES EM PRÓTESES ROBÓTICAS BASEADAS EM MICROCONTROLADORES

KNOP, Frederico Girardi¹
SILVA JR., Dalmo Cardoso da²
MAGRI, Luiz Paulo³
NOGUEIRA, Fernando José⁴

Linha de Pesquisa: Automação

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de interface cérebro-computador (BCI, em inglês *body computer interface*) que utiliza sinais de eletroencefalograma (EEG) para controlar uma mão robótica. O sistema é composto por um headset construído a partir de um módulo AD8232, um microcontrolador Arduíno e um simulacro de dedo. Os sinais de EEG são processados usando Transformada Rápida de Fourier, e os comandos são enviados ao Arduíno para controlar a mão robótica. Os resultados visam demonstrar a viabilidade do uso de sinais de EEG para controle robótico em tempo real, com potenciais aplicações em tecnologia assistiva, a fim de alcançar o maior número possível de pessoas com deficiência motora.

Palavras-chave: Protótipo eletrônico. Sinais cerebrais. Mecanismo cérebro-máquina.

1 INTRODUÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso aqui apresentado é uma exigência da Faculdade de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UniAcademia. O objeto de estudo escolhido é o sistema de interface cérebro-computador (BCI, em inglês *body computer interface*) que utiliza sinais de eletroencefalograma (EEG) para controle

¹ Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia – UniAcademia.

² Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia – UniAcademia.

³ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia – UniAcademia.

⁴ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia – UniAcademia.

robótico, composto por um *headband* construído a partir de um módulo AD8232, um microcontrolador Arduino e um simulacro de dedo. Para isso, o foco está nos sinais de EEG processados, cujos comandos são enviados ao Arduino para controlar o modelo. Os resultados visam demonstrar a viabilidade do uso de sinais de EEG para controle robótico em tempo real, com potenciais aplicações em tecnologia assistiva.

Para que tal estudo seja desenvolvido, nesse trabalho apresentar-se-á trajetória tecnológica e seus avanços no desenvolvimento de soluções voltadas a inclusão e auxílio de pessoas com deficiência física ou motora. Na sequência, será indicado os procedimentos metodológicos utilizados para atender aos objetivos propostos e o resultado da pesquisa feita quanto a viabilidade de BCI como ferramenta para proporcionar maior independência a pessoas com deficiências, facilitando sua interação com o ambiente.

A graduação em Engenharia Elétrica trouxe a possibilidade de repensar, com profundidade, sobre as potencialidades e também as possíveis dificuldades enfrentadas no BCI através do uso do Arduino, mesmo sendo uma plataforma central devido a sua versatilidade, custo acessível e ampla comunidade de suporte, características que o tornam ideal para o desenvolvimento de soluções práticas e replicáveis.

Neste sentido, com a oportunidade de cursar uma Faculdade, o Centro Universitário UniAcademia proporcionou a oportunidade de aproximação com as discussões a respeito da busca por integrar a captação e processamento de sinais cerebrais com o controle de dispositivos externos. O foco, a princípio em próteses robóticas, mas com a eventualidade de se expandir para aplicações domésticas e meios de locomoção inteligentes. Foi conhecendo mais sobre as inovações tecnológicas possíveis dentro da engenharia elétrica, que outros determinantes surgiram para analisar o processo de replicação e aprimoramento da solução através de pesquisas qualitativas a autores que trataram o tema, partindo para a apreensão sobre o processo de inovação e colaboração da área em soluções práticas e viáveis a todos que dela necessitarem.

Soma-se a busca por valorização, acessibilidade, inclusão e desafios da engenharia elétrica na contribuição para um futuro inclusivo. Tal contato despertou interesse quanto à articulação entre teoria e prática por melhores condições de vida,

de forma contínua entre tecnologia e ciência que avança ininterruptamente, a fim de superar limites e desafios.

As experiências obtidas durante a formação acadêmica foram, portanto, determinantes para a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso. O intuito foi o de responder a questões como: quão complexo é o acesso a peças artificiais que substituem partes do corpo vinculadas ao sistema Arduino através do EGG? Há possibilidade de personalização e adaptabilidade a cada sujeito individualmente de forma eficiente? O que tem contribuído para a não frustração e abandono do uso dessas próteses? O que significa as mudanças no sistema de interface cérebro-computador vinculadas a microcontroladores de baixo custo e fácil utilização como o Arduino? É possível desenvolver um sistema de controle robótico baseado em ondas cerebrais que seja acessível, de fácil utilização e capaz de proporcionar maior independência a pessoas com deficiência física e/ou motora? Essas e outras questões serão levantadas neste trabalho a fim de compreender os desafios e alternativas no controle de próteses robóticas.

Hoje nos deparamos com a necessidade de refletir e debater acerca do custo benefício e efetividade das inovações tecnológicas que invadem o mundo cada vez mais e colocam as pessoas em um outro nível de interesses, probabilidades e superações que antes era inviável ou impensável, motivando a investigação e a democratização de acesso a todos. O BCI enquanto ferramenta de independência e facilidade é uma realidade às pessoas com deficiência e pode sim ser aprimorada cada vez mais através de estudos e projetos baseados na Tecnologia de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*).

Com o intuito de iniciar um debate acerca dessas questões, o TCC foi dividido em três partes. Na primeira será tratada a questão tecnológica bibliográfica, propostas já desenvolvidas, métodos utilizados, sistemas em uso atualmente e que já trouxeram muitas inovações. Será analisada a utilização do microcontrolador Arduino e os módulos correspondentes como fundamento, buscando compreender como criar mecanismos viáveis que melhorem de fato a vida das pessoas deficientes ou com problemas motores e como tem ocorrido a mobilização de pesquisadores com foco em um investimento mais baixo e melhor resultado, além da expansão dessas novas técnicas.

A segunda parte apresenta a metodologia para a construção da prótese, os materiais utilizados e suas funcionalidades, o modelo de base técnica, circuitos e a prótese em si, utilizando circuitos e sistemas diferenciados para minimização de danos, ruídos e ser de fácil desenvolvimento, o que privilegiará a todos que necessitam de prótese robótica na conquista de qualidade de vida, saúde mental e emocional.

O terceiro e último capítulo apresentará a análise das pesquisas realizadas e os resultados encontrados a partir da construção de um molde de dedo, levando a reflexões finais sobre possibilidades futuras. O objetivo é fomentar o debate e aprofundar os conhecimentos acerca dessa temática, correlacionado às questões que motivam a elaborar esse trabalho, conforme foi destacado aqui inicialmente.

Espera-se que o TCC possa contribuir, ainda que de forma inicial, para a compreensão da exploração e controle de dispositivos por meio de BCI, cuja proposta visa oferecer uma alternativa inovadora que permita aos usuários interagir de forma natural e eficiente, reduzindo a dependência de auxílio externo e promovendo maior comodidade. Considerar tais reflexões em meio a independência proporcionada por tecnologias como essa e os impactos transformadores permite trazer conforto, capacitação e integração a diversos indivíduos na sociedade.

2 ELEMENTOS DE CARACTERIZAÇÃO TEÓRICA DE EEG E CONTROLADORES DE ATUADORES ELETRÔNICOS: SOBRE A INTERFACE CÉREBRO-COMPUTADOR E OS SISTEMAS DE CONTROLE

2.1 SOBRE O SENTIDO DO DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE CÉREBRO COMPUTADOR (BCI) NA CAPACITAÇÃO FUNCIONAL

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), 15% da população mundial, em estimativas aproximadas, possuem algum tipo de deficiência. No Brasil, pessoas com deficiência motora chegam a 7% do número total da população do país. “Independentemente da causa, a solução existente para auxiliar as pessoas com tal deficiência é a utilização de próteses, equipamentos que substituem o membro amputado” (Silva, 2019). Se pensarmos em nível mundial, Wolpaw *et al.* (2002) esclarecem que, nos Estados Unidos, são aproximadamente dois milhões de pessoas

com algum comprometimento muscular por distúrbios diversos, cujo controle voluntário é totalmente afetado.

A solução viável para problemas como esses é a criação de um dispositivo, um aparelho que substitui um órgão, membro ou parte deste, e pode ser controlado por BCI, integrando cérebro - o órgão mais complexo do corpo onde se processam informações, são construídas memórias e controlam os órgãos do corpo e o dispositivo. O que Wolpaw *et al.* (2002) colocam como um sistema de comunicação codificado que auxilia o indivíduo a interagir com o mundo, ou seja, fornece ao cérebro um novo meio de se comunicar e controlar as funções musculares, transmitindo mensagens e comandos externos.

Para se alcançar o objetivo de obter um padrão multifuncional e que atue de forma adequada, atendendo as necessidades reais dos indivíduos, a presente pesquisa volta-se a investigação de BCI, suas aplicações, informações relacionadas, tudo que possa visar o desenvolvimento de um protótipo simples, mas eficiente, monitorado por ondas elétricas cerebrais e a interação entre ambos.

Em um estudo em que se pretende refletir sobre a criação de dispositivos tecnológicos que busquem levar autonomia e capacitação a indivíduos portadores de deficiências diversas como doenças neuromusculares, atrofia e distrofia, amputação e paralisia que incapacitam a plena atividade física e motora, não pode desconsiderar como parte do conjunto de suas referências a perspectiva histórico-científica de análises e experimentações desenvolvidas através de um BCI a fim de capturar sinais cerebrais para controlar matrizes experimentais diversas que irão auxiliar as pessoas com problemas neuromusculares.

Por anos se tem conhecimento de relatos de pessoas, especialmente soldados, explica Silva (2019), utilizando equipamentos semelhantes ao que conhecemos como próteses, e essas datam de 1600, com viabilidade de manipulação de objetos e até mesmo da escrita. Esse foi o pontapé inicial para novos modelos semelhantes a mãos e braços, abrindo caminho para a automatização em 1818 e o estudo de cineplastia em 1915. Em 1948 foi desenvolvida "(...) uma prótese de um braço, na qual utilizava o movimento do corpo e cabos para realizar suas funções. (...)" (Silva, 2019).

Quando surge os transistores em 1960 a viabilidade das próteses se tornou ainda maior, e os avanços não param por aí. Já em 2016, continua Silva (2019)

pesquisadores americanos chegaram a desenvolver um acessório de braço controlado pela mente, necessitando cada vez mais de estudos acerca da comunicação entre cérebro e corpo para comandos através de sensores e ICC.

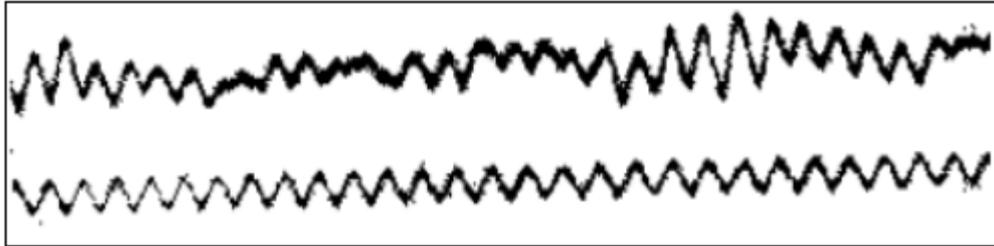
Antes, pouco se sabia ao certo sobre o funcionamento do sistema nervoso central, como aponta Dias (2017). A alavancada da ciência biológica possibilitou entender melhor como funciona o corpo humano auxiliando a propor soluções viáveis para sensores motores. As manifestações motoras foram um avanço para se compreender melhor sobre o sistema nervoso central e dispositivos auxiliares eficazes.

Para se compreender a complexidade em criar um mecanismo ligado ao cérebro e suas capacidades, ele gera ondas diferentes, cada qual dependendo da atividade que está sendo feita naquele momento, explica Rodrigues (2020). Quando se determina e aciona os movimentos cerebrais, são gerados estímulos visuais que variam em certa frequência criando uma atividade elétrica com frequência igual ou semelhante as do estímulo.

Dentre as novas possibilidades de interação destaca-se as Interfaces Cérebro-Computador (ICC) que permitem a interação do ser humano com computadores onde não é utilizado nenhum músculo, pois o controle do sistema é realizado através da captura da atividade elétrica cerebral do usuário. (Roque; Santos; Ferreira, 2016, p. 01).

O pioneiro nos estudos de captação de sinais elétricos cerebrais foi Hans Berger, explica Dias (2017). Com sua análise torna-se possível alcançar corrente elétrica sem intervenções invasivas, chamando esse processo de eletroencefalograma. Muitas décadas depois do primeiro artigo de Hans, apontam Wolpaw *et al.* (2002), como mostra a Figura 1, o EEG tem sido o principal instrumento de avaliação dos distúrbios neurológicos para investigação da função cerebral em ambiente controlado, como em laboratórios. Os pesquisadores conseguem hoje resultados muito melhores com os hardwares e softwares de baixo custo e boas análises de resultados.

FIGURA 1: Registro do Primeiro EEG feito por Hans Berger em 1928



Fonte: Dias (2017 apud Sabbatini, 1997).

Segundo Roque, Santos e Ferreira (2016), por meio de mecanismos corretos a leitura bio-elétrica torna-se mais precisa e de fácil utilização, como a eletroencefalografia que coleta dados de atividades cerebrais que se formam através de ondas de descarga elétrica que serão tratados e utilizados como base de informações para determinar sintomas e estado de uma pessoa. Dentre as possibilidades tem-se a formação de indivíduos com paralisia cerebral, meios de transporte inteligente como cadeiras de rodas, ICC para ajudar na leitura, escrita e desenvolvimento do componente robótico, o principal objetivo desse estudo.

A análise de EEG marca as transformações na vida de indivíduos com dificuldades motoras diversas, através da simples utilização de demonstrativos cerebrais transcritas nas vontades e passadas aos dispositivos, cujo modelo conceitual será apresentado mais detalhadamente nas próximas sessões. A ideia do ICC é unir dois componentes que se auxiliam mutuamente para criar um novo meio de comunicação a partir de captura de indícios cerebrais obtidos pelo EEG, mecanismo de melhor e mais fácil captação.

Com o intenso desenvolvimento tecnológico eletro-eletrônico que ocorria nas últimas décadas, transformava-se uma grande e promissora promessa de criar sistemas compostos por equipamento EEG juntamente com computador, responsável por gerar os estímulos, tanto visual quanto auditivo, digitalizando os indicativos cujos dados serão analisados e processados. O referido equipamento vem evoluindo, beneficiando e levando funcionalidade às pessoas que, aos poucos, voltam a atividades e movimentos bem próximos ao que tinham anteriormente.

As mudanças no processo de Interação Homem-computador (IHC) possibilitou utilizar e aprimorar interfaces mais sensíveis ao toque, em virtude de

novas tendências na área, afetaram diretamente a qualidade de vida dos usuários, explicam Roque, Santos e Ferreira (2016). Dessa forma, tais estudos que vem desde a década de 70 com a Neurociência, Engenharia de Controle e Automação, Ciência da Computação e Biomedicina, faz-se assumir uma nova atmosfera de superação da incapacidade e interação para potenciais soluções com computadores e sinais advindos do cérebro de maneira natural e viável.

.Ao mesmo tempo que os ICC permitem uma gama de estudos e planejamentos, atende a problemas específicos, o que limita a contribuição a um determinado número de pessoas que farão uso desse recurso, apontam Roque, Santos e Ferreira (2016). Se for analisar de forma ampla, existem casos que é necessário ir além da prótese e pensar outros meios que, associado aquele, de fato minimize as dificuldades motoras, ou seja, cada caso deve ser analisado.

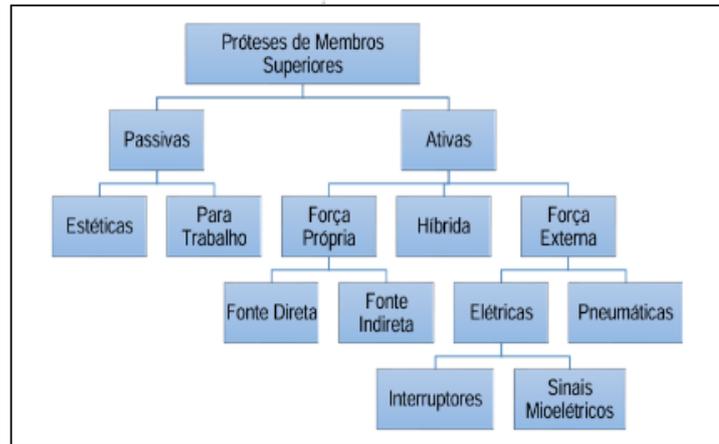
A medicina utiliza bastante o EEG na captação de informações cerebrais que possam direcionar como está determinado órgão. Pode ser utilizado em pacientes em processos cirúrgicos que passarão por anestesia geral sendo monitorado em sua progressão, ou em casos de indivíduos com tetraplegia que, ao acordar e abrir os olhos emite ondas que se alteram, são captadas pelo equipamento gerando ruído e avisam ao cuidador que o paciente necessita de atenção.

A intenção desse estudo é pensar um mecanismo que possa ir além no uso de EEG e consiga alcançar o máximo de indivíduos, independente da sua disfunção, trazendo melhorias e gerando acessibilidade. Existem muitos projetos com essa finalidade, contudo, a criação de um mecanismo que corrija ruídos e abranja mais pessoas com órteses, próteses e relacionados de maneira funcional, prática e com custo benefício de melhor utilização é o principal foco.

2.1.1 Tipos de próteses: ativa e passiva

De acordo com a engenharia, a fonte de energia, aponta Silva (2019 apud Cunha, 2002), é classificada em dispositivos ativos e passivos. Essa classificação descreve o tipo de funcionalidade a que a prótese oferece (Figura 2).

FIGURA 2: Tipos de próteses de acordo com a energia



Fonte: Silva (2019, p. 31, apud CUNHA, 2002, p.22) - adaptada pelo autor (2025).

As próteses passivas são as que tem finalidade estética, muito semelhantes ao membro humano, podem ser feitas com diversos tipos de materiais, mas não tem funcionalidade, apenas para auxiliar em tarefas simples, pois não possuem movimento. As ativas são as possíveis de manipulação e controle de movimentos como, por exemplo, fechar e abrir a mão, mesmo que de forma limitada, e fazem uso de energia pneumática (gerada em contração muscular alimentadas por dióxido de carbono) ou elétrica (com interruptores e movimentos mioelétricos). A desvantagem da última é serem mais caras e dispenderem um tempo maior para aprender a manipular para fins de um uso mais eficiente.

Devido a sua grande funcionalidade, os implantes elétricos são os mais utilizados, com eletrodos que captam a atividade muscular controlando atuadores de acordo com a força aplicada. Os eletrodos são colocados sobre a pele gerando alterações de índices ao menor movimento do indivíduo. Além desse, é necessário uso de uma unidade microcontroladora para processar dados, o que torna os movimentos mais naturais, através de circuitos eletrônicos e eletrodos.

2.2 SOBRE AS INTERFACES CÉREBRO COMPUTADOR E SUA RELAÇÃO COM O EEG

Demarcando a diferença de épocas e a maneira como as pesquisas se desenvolveram, meios de usar sinais cerebrais em comandos ligados a máquinas BCI, são alvo de diversos estudos para colocar em prática as inúmeras aplicações do conceito, de forma não invasiva, utilizando EEG. “Entre 1960 e 1970 a introdução do biofeedback de EEG ou neurofeedback, permitiu uma variedade de experimentos. (...)” (Silva, 2019, p.35). Nesse período foram feitos os primeiros experimentos com humanos controlando dispositivo por meio do cérebro, tanto para manusear atuadores quanto para ajudar pessoas com problemas auditivos, visuais ou até mesmo de paralisia, explica o autor (apud Lebedev, Nicolelis, 2017).

Os testes com animais continuaram a fim de criar neuro próteses motoras que reconheçam movimentos de braços e pernas, enquanto outros pesquisadores usavam neurofeedback para compreender melhor como fazer a ligação da informação para o cérebro através de estímulos elétricos, construindo um BCI sensorial para suprir danos neurológicos. Além dessas, também surgiram suportes visuais que pudessem captar luz utilizando corrente elétrica no córtex, possibilitando a percepção de alguns objetos.

O EEG auxilia o indivíduo a realizar ações mais espontâneas que mudam as ondas para controles diversos enquanto sistema independente. Os sistemas dependentes fazem uso de computador para incentivar através da visão as atividades do cérebro e assim o paciente pode exercer ações por meio de algoritmo.

Estudiosos como Nicolelis apontam para a teoria em que o cérebro é capaz de realizar “(...)suas mais árduas tarefas através do trabalho coletivo de uma vasta população de neurônios distribuídos por diversas regiões cerebrais, capazes de realizar diferentes funções simultaneamente. (...)” (Souza; Wanderley; Dória, 2015, p. 9). É quase uma civilização de neurônios que geram uma **sinfonia elétrica** como coloca o autor, responsável pelos pensamentos. Ele previu que nas próximas décadas o trabalho realizado no cérebro junto a novas tecnologias em decodificação ampliaria os limites da habilidade do homem, além da fragilidade do corpo, como relembram Souza, Wanderley e Dória (2015 apud Nicolelis, 2011).

Os avanços mais significativos na área das próteses neurais ocorrem na década de 90 com a criação dos micro-eletrodos, ou micro-fios. A tecnologia chegou,

e com ela, Chapin e Nicoletis aprenderam como usar a atividade de 46 neurônios no controle “(...)de uma alavanca para liberar a água de um conta-gotas para beber. (Silva, 2019, p. 36 apud Lebedev; Nicoletis, 2017).”

Em 2004, pesquisadores do laboratório de Nicoletis confirmaram que através da tecnologia de micro-fios, é possível extrair os movimentos das mãos de pacientes humanos conscientes. O estudo demonstrou que os mesmos algoritmos computacionais utilizados em macacos, poderiam ser usados para adquirir os padrões de sinais subcorticais gerados pela movimentação das mãos humanas. (Silva, 2019, p.376)

O século XX foi o que mais impulsionou a reabilitação, principalmente com o advento de catástrofes anteriores como guerras, que deixou várias sequelas, necessitando de uma resposta. As experiências em laboratórios têm trazidos resultados significativos e que dão esperança a quem precisa.

O BCI tem como função decodificar os mínimos movimentos, quando eles começam e terminam, e a seleção de suas escolhas. A interface é dividida por etapas, apresentada na figura 3 a seguir, que passam pela obtenção de movimentos elétricos cerebrais que serão convertidos e os dados extraídos, filtrando apenas aqueles que serão de fato utilizados. Em seguida, os sinais analisados e filtrados são encaminhados para o setor de processamento interpretando algoritmos e decodificando para ações materializadas em comandos ao aparelho externo, e esse as vezes pode até receber demonstrativos de volta para o cérebro do indivíduo.

FIGURA 3: Princípio de operação de um BCI



Fonte: Silva (2019, p.38)

Esses dispositivos já foram testados de várias formas, acrescentam Souza, Wanderley e Dória (2015) como, por exemplo, em doenças de Parkinson através de pesquisas com animais modificados em laboratório com a síndrome, e que tiveram chips implantados para ativar o cérebro, diminuindo sensivelmente os sintomas da doença. Essa iniciativa abriu espaço para testes com diversas outras doenças como crônicas, de lesão ou neurológicas, além de acidentais. Através da reabilitação, portadores de deficiências diversas estariam tendo a oportunidade de experimentar pela primeira vez, ou de novo, autonomia e integração social.

Os BCIs invasivos, antes utilizados somente em animais, começaram a ser implantados cirurgicamente em humanos. Já os não invasivos foram implantados na prática clínica através de Niel Bibaumer, explica Silva (2019). A ideia mais recente conhecido é o *Walk Again Project*⁵, avançando com um BCI ligado a imagem motora, no qual indivíduos paráliticos utilizavam EEG para controlar sensações e controlar exoesqueleto robótico das pernas. A intervenção do córtex em ações motoras ou não e a percepção sensorial impulsionaram o uso do BCI na detecção e decodificação de atividades cerebrais.

Uma das maiores dificuldades encontradas é adquirir sinais corticais e implementar interface em tempo real. Esse problema foi resolvido quando começaram a utilizar metodologia de múltiplas regiões de registro e vários eletrodos incorporados. Ao optar pelo método invasivo, pensa-se em cirurgia craniana a fim de implantar os eletrodos, mas o procedimento tem riscos de infecção, enquanto os não-invasivos não envolvem riscos, mesmo que a qualidade ainda seja incipiente, uma vez que os sinais precisam ultrapassar as barreiras de ossos e pele até chegar ao couro cabeludo, explica Silva (2019 apud Lebedev, Nicoletis, 2017).

Os BCIs, em sua maioria, são desenvolvidos nas regiões do córtex humano devido a sua estrutura. A parte responsável pelos movimentos seria a pré motora, ou motora primária que premeditam as mostras na execução dos movimentos.

Para analisar os sinais analógicos por meios digitais, deve-se primeiramente conhecer as características dos mesmos, como suas frequências e amplitudes para, enfim, convertê-los para a forma digital. Para isso, o sinal passa por um circuito de condicionamento e em seguida pelo processo de

⁵ "Projeto Andar de Novo", iniciativa que busca desenvolver tecnologia para recupera pacientes com lesão medular, possibilitando voltar a andar por meio de BCI e exoesqueleto.

digitalização. Com o intuito de apresentar um sinal digital que seja o mais próximo possível do analógico, é feita uma amostragem com base na frequência do sinal de interesse. (...) (Silva, 2019, p. 48).

Tal método depende de uma troca de peças mais ágil, barata e funcional. Pensando nisso, pode-se dizer que hoje em dia existem muitos tipos de microcontroladores que atendem a demanda. Para esse trabalho, será utilizado placa de Arduíno Uno devido a sua abrangência de uso, com esquemas elétricos diversos disponíveis na internet que facilitam o acesso.

O Arduíno Uno (Figura 4) é uma placa de *hardware* baseada em um microcontrolador Atmega328P, possibilitando ligar outros dispositivos e tem uma tensão de 5VCC. Tem por objetivo realizar a interface de comunicação através de USB e possibilita fornecer tensão a interface de 5V e 3,3V para alimentação.

FIGURA 4: Arduíno Uno



Fonte: Autor (2025).

Esses microcontroladores possibilitam tanto a entrada quanto a saída de dados, através deles é feito o tratamento e digitalização dos mesmos. Jesus (2023) acrescenta que, ao adicionar uma placa *shield*, o Arduíno é potencializado em funções variadas, através de conexão sem fio, ampliando a utilização de sensores.

A coleta de dados, portanto, se inicia quando a porta em que o Arduíno será conectado for escolhida. Conexão estabelecida, dá-se início a comunicação das atividades elétricas do cérebro e os sinais surgem, em tempo real, pelos canais de

EEG, cujos dados são utilizados em diversas propostas, como o controle de objetos com a intenção mental. Os movimentos simulados são convertidos para o Arduino Uno e os dados enviados.

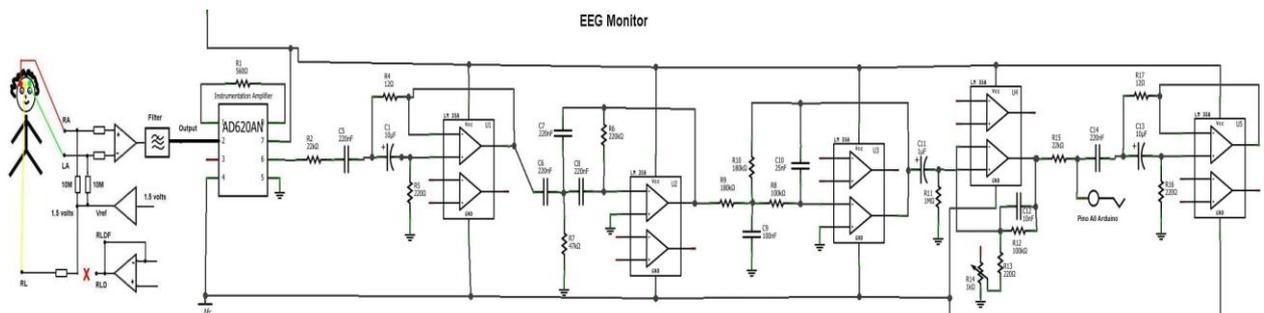
3 DESENVOLVIMENTO

O trabalho será analisado a partir dessa seção, com apresentação do projeto e mecanismos utilizados para o desenvolvimento de uma prótese. Serão apresentados os componentes, metodologia e resultados encontrados após estudo e análise.

Quando se pensa em gerar uma pesquisa nova, a configuração vai surgindo ao longo do processo para que se possa encontrar a melhor forma de execução da tarefa a que se propõe. A proposta aqui apresentada visa uma alternativa aos sensores que já existem, de mais fácil acesso, com desenvolvimento de baixo custo, a fim de criar um protótipo com coleta de dados não invasiva e eficiente.

O sistema desenvolvido é composto por um EEG, a fim de registrar potenciais de ação dos variados músculos, utilizando um sensor de eletrocardiograma, cujo *display* mostra os indicadores coletados, uma vez que esse já está pronto para o Arduino. Esse sensor é feito para captar a diferença de tensão nos movimentos musculares. A fim de eliminar mostras indesejadas no EEG foram utilizados filtros internos, como apresentado na Figura 5, com modificação nos circuitos eliminando alguns filtros para aumentar a sensibilidade a tensões, uma vez que a tensão do EEG é bem mais baixa e a movimentação do músculo tem um sinal maior que a do fluxo de pensamento.

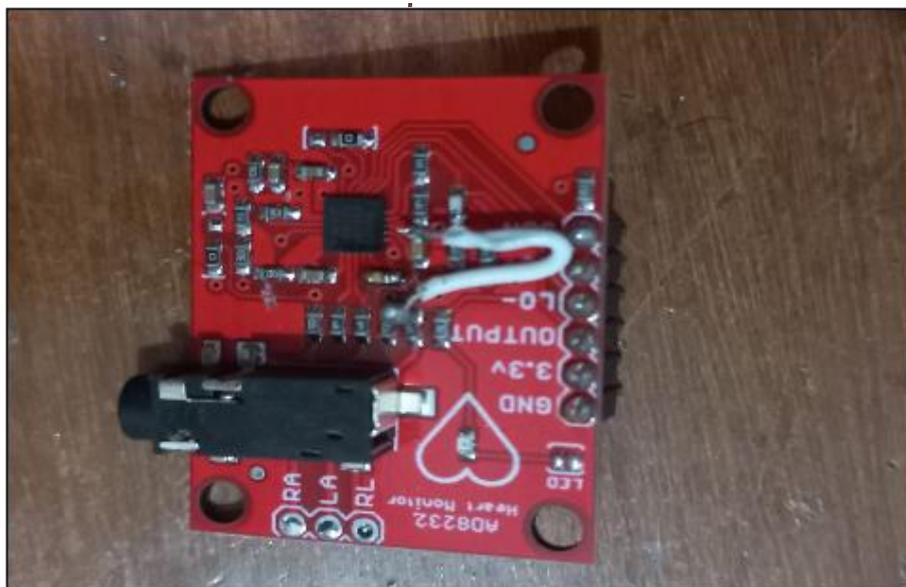
FIGURA 5: Filtros de frequência e valores



Fonte: Autor (2025).

Na primeira etapa, os movimentos gerados são captados pelos sensores e direcionados como sinais elétricos a fim de tornar possível a interpretação e digitalização. Os sensores que foram usados para captar aqueles são colocados na cabeça e atrás das orelhas e conectados por fios integrados ao eletrocardiograma AD8232 (Figura 6). A digitalização é feita pelo Arduino Uno que modifica o sinal fazendo uso de códigos configurados no microprocessador.

FIGURA 6: Bloco de sinal AD8232



Fonte: Autor (2025).

A função desse AD8232 é remover, amplificar e separar manifestações quando houver ruídos, seja por movimento durante o teste ou pela captação de sinais pelos sensores.

4 METODOLOGIA

Criar próteses que consigam abranger o maior número possível de funcionalidades de maneira eficiente, atendendo o máximo de portadores de deficiência, em especial as mais severas, ainda é um grande desafio. Por conseguinte, esse estudo delimita-se a dispositivos de membros superior e suas características visando gerar um dispositivo simplificado e as possibilidades de implementação de mecanismos de monitoração de atividades elétricas cerebrais.

O referido trabalho não abrange testes em indivíduos amputados, não só pelos diferentes tipos de amputação, como também pelo pouco tempo disponível para a pesquisa mais detalhada, cujo auxílio de equipamentos mais completos se faz necessário.

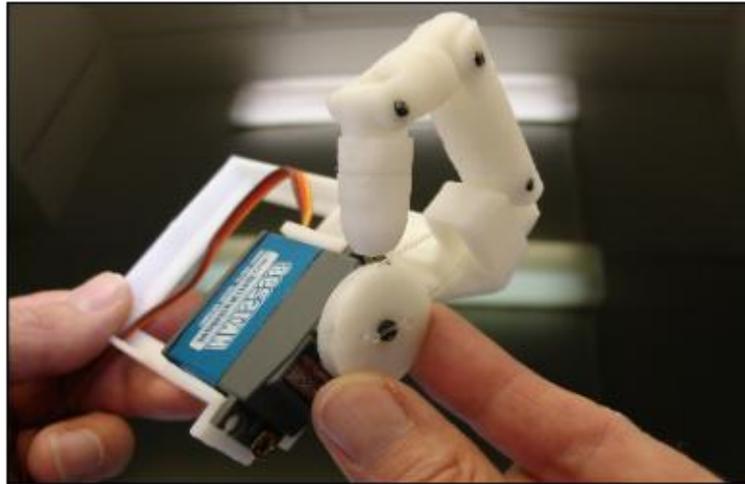
Enquanto um aparelho que tem por finalidade substituir um órgão, membro ou parte desse, o componente aqui desenvolvido busca recuperar movimentos de indivíduos que perderam a capacidade motora podendo auxiliar a realização de tarefas e movimentos que, antes do advento desses aparelhos, não se pensava nas capacidades de desempenhar atividades complexas ou simples do dia a dia.

4.1. CONSTRUÇÃO E MATERIAIS UTILIZADOS

O modelo conceitual proposto passou por diversos processos e variáveis, com base nas implementações vinculadas a eletroencefalografia já existentes. A prótese é uma representação do que deve ser a comunicação do indivíduo e a máquina de maneira a possibilitar aplicação prática por meio de estudos na engenharia, na eletrônica e na robótica.

Com o modelo escolhido, pode-se dizer que é formado quase que totalmente por peças eletrônicas selecionadas de forma a tornar o aparelho funcional, com diversas melhorias e seguindo os cálculos dos componentes de forma recomendada. O protótipo foi montado em uma *protoboard* que auxilia no uso e configuração do circuito, uma vez que não foi possível fazer a impressão em 3D da mesma, cuja base para a criação do molde é apresentado na Figura 7, retirado do InMoov.

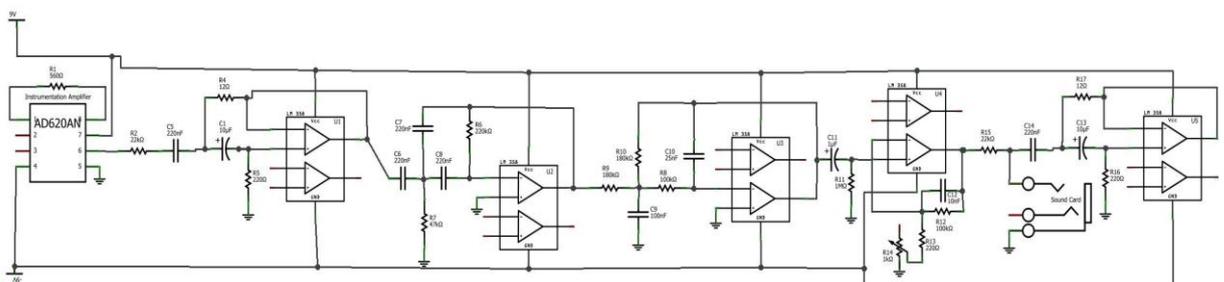
FIGURA 7: Modelo de prótese de dedo utilizado como base



Fonte: InMoov (s.d).

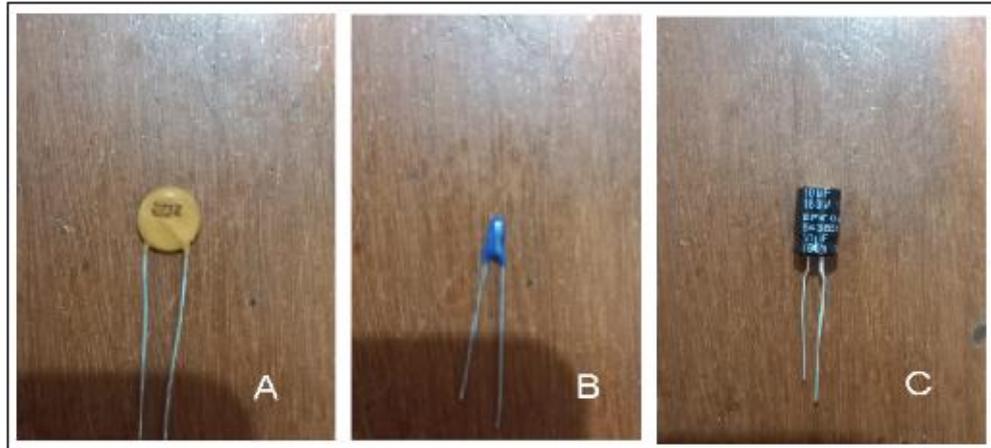
Com todos os componentes selecionados, o passo seguinte foi a fabricação do circuito como mostra a Figura 8 a seguir. O processo envolve o encaixe das peças e solda dos itens e, para tal, foram utilizados diversos resistores com valores diversos para limitar a corrente em um circuito, para diminuir a tensão fornecida pela fonte e também auxiliam a filtrar frequências de sinais desejáveis.

FIGURA 8: Circuito sem o sensor cardíaco



Fonte: Autodesk Instructable (s.d).

O esquema sugere a utilização de capacitores cerâmico, de tântalo e eletrolítico de 10 μF para montagem dos filtros, a fim de estabilizar essa energia mantendo a corrente de forma constante para o motor e filtrar ruídos ou outras interferências, vide Figura 9.

FIGURA 9: Capacitores utilizados na prótese

Fonte: Autor – (A) capacitor cerâmico. (B) capacitor de tântalo, (C) capacitor eletrolítico (2025).

Para esse trabalho foram utilizados um amplificador operacional MPC 601 para amplificar e filtrar, pois possui baixa corrente e alta impedância de entrada, como explica Dias (2017); e um CI de instrumentação – AD620, para medir os sinais em corrente contínua. Seu valor de tensão é alto e busca reduzir ao máximo os ruídos. Os dois amplificadores operacionais são usados como um pré amplificador, auxiliando ao máximo já na primeira fase do esboço. Com os resistores nas entradas inversoras cria-se um sinal de entrada diferencial amplificado, como explicam Malvino, Bates (2011),

Após completar o circuito, o passo seguinte foi selecionar os componentes da *proto-board*, compostos basicamente por *jumpers*, capacitores, resistores, amplificadores e potenciômetro com valores variados a fim de alcançar melhores respostas do protótipo. Foram utilizados os seguintes componentes listados na Tabela 1.

TABELA 1: Lista de componentes do protótipo

Componente	Características para utilização no sistema
2 Resistores de 12 Ω	Potência de 2W Tolerância de 5% Limita a corrente elétrica que flui no circuito
1 Resistor de 220 Ω	Desacelera fluxo de corrente produzindo queda de tensão
1 Resistor de 560 Ω	Potência de 1/4W Reduz corrente elétrica
2 Resistores de 22k Ω	Limitam a corrente em determinado fluxo de energia
1 Resistor de 47k Ω	Potência de 1/4W Tolerância de 1% Usado em dispositivos que precisam de estabilidade
2 Resistores de 100k Ω	Limita a corrente evitando fluxo excessivo
2 Resistores de 180k Ω	Proteção dos componentes e manutenção de placas eletrônicas
1 Resistor de 220k Ω	Gera calor e limita a corrente elétrica produzindo tensão
2 Resistores de 270k Ω	Limitam a corrente em determinado fluxo de energia
1 Resistor de 1M Ω	Força a redução da corrente elétrica
CI de instrumentação	Amplifica os sinais de amplitude mais baixa, possui impedância alta de entrada e baixo ruído
Amplificador operacional	Alta tensão, a impedância de entrada é infinita e de saída nula, insensível à temperatura
Capacitor de cerâmica	Variada faixa de capacitância, é um componente barato, compacto e muito usado em projetos que necessitam de estabilidade
Capacitor de tântalo	Possui alta estabilidade, capacitância e estável para flutuações de temperatura e tensão
Capacitor eletrolítico de 10 μ F	Armazena energia elétrica e tem polaridade, facilitando a conexão no circuito
Potenciômetro de 1k Ω	Resistente de quedas, sujeiras, água e vibrações diversas

Fonte: Autor (2025).

Após a montagem do circuito, foram feitos testes em cada etapa para verificação dos movimentos. As entradas e as saídas foram conferidas e as aferições repetidas para o desenvolvimento do microcontrolador.

Para funcionamento dos dedos foram utilizados três eletrodos, sendo um de referência GDN, em uma *headband*, como mostra a Figura 10:

FIGURA 10: Prótese com eletrodos em uma *headband*



Fonte: Autor (2025).

A fim de captar o sinal de contração muscular, foram usados eletrodos para entrada do amplificador de instrumentação e também para o terra, por ser um sistema base para trabalhos que envolvam contração muscular. O sistema precisa ler o sinal que chega e determinar a quantidade de *bits* que alcança de forma a ser proporcional a tensão lida, tudo determinado pelo programador, e captado pelo circuito, mesmo com ruídos.

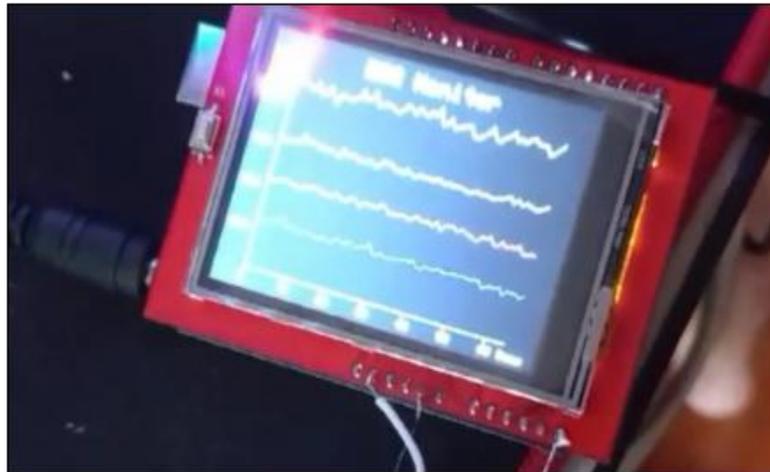
5 RESULTADOS

Essa seção dedica-se à parte prática do plano com os resultados alcançadas nas etapas que se seguiram. A simulação do circuito auxiliou na validação e descarte de parâmetros como frequência de corte, faixa de atuação do filtro, valores de sinal de saída, ganhos e perdas de cada estágio. O valor esperado é por volta de 10 to 30 μV com tensão de alimentação do Arduino equivalente a 12V.

Na primeira simulação observa-se uma eficiência no comportamento dos filtros para o sinal. Para verificação foi utilizado o site Chords, pois eles dão o resultado aproximado ao display utilizado, a diferença ocorre devido a escala dos gráficos e o tamanho da tela. A análise foi feita para constatar possíveis erros no código e outros que pudessem surgir.

Os dados obtidos foram significativos, mas como foi detectado excesso de ruído, as informações coletadas foram incipientes para fazer a movimentação desejada em um servo motor, por exemplo, podendo causar acionamentos indevidos ou não acionar, como mostra a Figura 11.

FIGURA 11: leitura do sinal a partir do movimento da mão

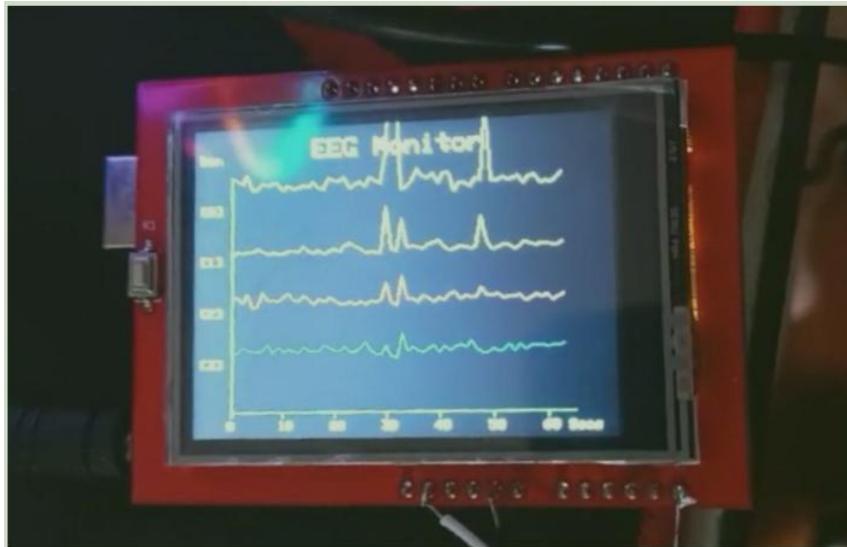


Fonte: Autor (2025).

Acredita-se que isso tenha ocorrido, principalmente, ao fazer uso do Arduino ligado diretamente na energia elétrica gerando interferência de frequência com a leitura feita. Por ser em nanovolts, a sensibilidade é muito maior e qualquer perturbação na rede ou perda de tensão gera um distúrbio afetando o resultado. Ou seja, foi possível captar as ondas de eletroencefalograma, mas não foi possível filtrar de forma precisa os sinais para fazer uma movimentação.

Outra questão importante nos testes realizados foi que os eletrodos não estavam captando de forma correta os sinais, mesmo em contato com a pele, só estava indicando movimentação de frequência ao ser pressionado nos pontos aplicados, como pode-se perceber na Figura 12. Dessa forma, a amostra acaba por não ser confiável para conseguir uma movimentação real da prótese.

FIGURA12: Sinal a partir de aplicação de pressão nos eletrodos



Fonte: Autor (2025).

Uma alternativa para correção do problema seria talvez treinar uma IA para detectar essas variações e conseguir filtrar, necessitando de vários testes para poder alcançar maior precisão no tempo correto. Essa análise demanda tempo e varia bastante de pessoa para pessoa, limitando a aplicabilidade, uma vez que demandaria mais estudos, além de um grupo de teste variado com uma gama de expectativas através de aplicação em indivíduos amputados, pessoas que nasceram sem o membro e as que o possuem, captando todas essas diferenças.

A fim de superar esse contratempo que surgiu inesperadamente na captação de manifestações cerebrais, foi feito um novo dispositivo. Diferentemente do primeiro estágio, para a captação e amplificação do sinal, buscou-se diminuir os ruídos encontrados. Os filtros são colocados para determinar uma faixa de frequência específica e diminuir a interferência de frequências maiores.

Nessa fase foi criado um eletroencefalograma a partir do zero, utilizando um amplificador operacional e um CI de instrumentação, sendo possível captar os dados e criar um filtro de faixa para selecionar aquela que será analisada. Foram colocados dois filtros, sendo um para baixas frequências.

Em um momento do processo foi detectado desvio que pode ser proveniente da montagem, ou problemas com a alimentação, ou alguma *protoboard* com falha na conexão, fazendo com que os filtros modificassem todo sinal recebido. Pode ser

super ou sub dimensionamento dos filtros, contudo, pelos cálculos exemplificado na Figura 13 a seguir, mesmo que o dispositivo tenha sido desenvolvido conforme deveria, a resposta não foi como esperado.

FIGURA 13: fórmula da transformada

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad \text{para } k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

Fonte: Autor (2025).

Nessa imagem podemos definir $x[n]$ como amostras do sinal no domínio do tempo; $X[k]$ se refere ao componente de frequência no índice k ; N é o número total de amostras; e j : unidade imaginária. Esse é o cálculo da transformada usado. Quando vai desenhar o gráfico, calcula a magnitude do sinal através da fórmula apresentada na Figura 14:

FIGURA 14: fórmula para magnitude do sinal

$$\text{força} = \sqrt{\text{parte real}^2 + \text{parte imaginária}^2}$$

Fonte: Autor (2025).

O FFT funciona no código através de coleta do sinal, a partir daí lê 64 valores do sinal do cérebro (ou qualquer outro sinal) usando *analogRead*. Esses valores são guardados em um vetor chamado *data*. Enquanto isso, na transformada a função *fix_fft(data, im, m, 0)* pega os valores e calcula quais frequências estão presentes no sinal. Essa função usa a fórmula da Figura 13 para quebrar o sinal em pedacinhos de frequências (como separar os instrumentos de uma música).

Cálculo da força (amplitude) de cada frequência é feito depois da FFT, quando o código calcula a força de cada frequência e usa o cálculo da Figura 14 para calcular a "força" do sinal. Isso diz quão forte é cada frequência no sinal. Já a mostra no *display* desenha as frequências no display TFT, como um gráfico que vai se atualizando ao vivo.

5.1. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

O resultado obtido demonstrou-se ainda em fase inicial de teste cumprindo, em partes, com o objetivo do trabalho. Apesar da leitura dos sinais não ter tanta homogeneidade quanto aos valores de frequências esperados para esse projeto, somado ao fato dos eletrodos não conseguirem fazer a captação sem serem pressionados, sabe-se que, com mais estudos e testes, é possível encontrar valores com menos distorções.

Os principais limitadores referem-se ao tempo disponível para o desenvolvimento de todo sistema, a não impressão do dispositivo, os ruídos e a falta de um grupo de portadores de deficiências diversas para amostragem. Tais dificuldades devem ser corrigidas para evitar quaisquer danos as pessoas que possam vir a utilizar a prótese posteriormente. A busca é por produzir testes mais reais do uso no cotidiano com resultados destinados a efetividade da peça proposta com interpretações mais precisas das ondas para integrar os sistemas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento de pessoas com deficiências motoras através do uso de próteses tem por objetivo interligar o cérebro humano e a máquina através da ICC, como método de avanço a limitações com aplicação futura bastante promissora. Uma chance de reabilitação e de uma vida saudável, independente, o que não ocorria a algumas décadas atrás sem as mudanças tecnológicas.

Próteses com diversas funcionalidades que possam auxiliar essas pessoas, em especial as com deficiência severa e não conseguem suporte com os materiais que já existem hoje disponíveis, é uma busca constante, justificando a utilização de EEG para atender as necessidades e levar benefícios aos que mais precisam.

Debruçar nos estudos tecnológicos de BCI, ligadas aos conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia Elétrica foram essenciais para o trabalho, com aplicações práticas de sistemas e componentes buscando resultados reais.

A construção do protótipo foi bem-sucedida, mas indica aprimoramentos e adequações para sua funcionalidade, portanto, não é suficiente para reabilitar, mesmo em parte. Os testes realizados indicaram as dificuldades ao integrar EEG e o protótipo, devido sua baixa amplitude em gerar um sinal satisfatório.

O objetivo da pesquisa de certa forma foi alcançado: identificar a possibilidade de desenvolver próteses com baixo custo que leve mobilidade e autonomia aos indivíduos com deficiência. O estudo possibilitou conhecimento para gerar novos dispositivos que possam integrar sistemas de maneira que, no futuro, o controle possa se efetivar por meio de sinais EEG de forma simples e prática.

Como cenário de pesquisas pode-se pensar em: condicionamento das manifestações; decodificadores adequados, impressão de um modelo em 3D; quantidade maior de eletrodos que auxiliem na captação das ondas e a supressão de ruídos a fim de interpretar sinais mais claros de movimento; principalmente, testes com amputados. Portanto, não se pretende aqui finalizar o debate, e sim, incentivar mais estudos que contribuam para aperfeiçoar as próteses e assim, abranger o maior número de pessoas portadoras de deficiências motoras possíveis.

ABSTRAT

This study presents the development of a brain–computer interface (BCI, from english body computer interface) system that employs electroencephalogram (EEG) signals to control a robotic hand. The system consists of a headset assembled using an AD8232 module, an Arduino microcontroller, and a finger simulacrum. EEG signals are processed using the Fast Fourier Transform (FFT), and control commands are transmitted to the Arduino to actuate the robotic hand. The results demonstrate the feasibility of real-time robotic control through EEG signals, highlighting potential applications in assistive technology, in order to reach the largest possible number of people with motor disabilities.

Keywords: Electronic prototype. Brain signals. Brain-machine mechanism.

REFERÊNCIAS

AUTODESK INSTRUCTABLES. **DIY EEG (and ECG) Circuit**. Disponível em: <https://www.instructables.com/DIY-EEG-and-ECG-Circuit/>. Acesso em: 16 maio 2025.

CHORDS. Disponível em: <https://chords.upsidedownlabs.tech/stream>. Acesso em: 5 abr. 2025.

CUNHA, F. L. da. **São Carlos Hand, a multifunction upper limb prosthesis**: a study of the mechanisms, actuators and sensors. 2002.

DIAS, Yuran Costa. **Protótipo de um EEG portátil de três canais**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Biomédica) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2017. Disponível em: ProtótipoEEGPortatil.pdf. Acesso em: 11 abr. 2025.

INMOOV. **Hand and Forarm**. Disponível em: <http://inmoov.fr/hand-and-forarm/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

JESUS, Aleister Rangel de. **Integração OpenBCI - Arduino**: indicação do estado de relaxamento através de sinais de eletroencefalografia. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Elétrica, Vitória, 2023. Disponível em: https://engenhariaeletrica.ufes.br/sites/engenhariaeletrica.ufes.br/files/field/anexo/pg_ii_-_aleister_rangel_de_jesus_-_final_-_2023.pdf. Acesso em: 30 abr. 2025.

LEBEDEV, M. A.; NICOLELIS, M. A. L. **Brain-machine interfaces**: from basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation. *Physiological Reviews*, v. 97, n. 2, p. 767–837, 2017.

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. **Eletrônica**. [S.l.]: São Paulo: McGrawHill do Brasil, AMGH, 2011.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Relatório mundial sobre a deficiência. Secretaria dos Direitos da Pessoa com Deficiência**. São Paulo, 2011. Disponível em: RelatorioMundial.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

RODRIGUES, Cláudia Catarina Carvalho. **Sono ao volante** – Machine Learning para previsão e detecção de sonolência. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Engenharia) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2020.

ROQUE, A. S.; SANTOS, C. P.; FERREIRA, M. H. **Método de controle para análise de ondas aplicado ao controle de ambiente**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Santo Ângelo – RS, 2016. Disponível em: Paper Title (use style: paper title). Acesso em: 10 abr. 2025.

SABBATINI, R. M. E. Mapeando o cérebro. **Revista Cérebro & Mente**, ago./set. 1997. Disponível em:. Acesso em: 25 abr. 2025.

SILVA, Leonardo Pezenatto da. **Desenvolvimento preliminar de uma prótese de braço controlada por eletroencefalografia**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Florianópolis, 2019. 125 p. Disponível em: TCC_LEONARDO_PEZENATTO_DA_SILVA_VERSÃO_FINAL.pdf. Acesso em: 6 maio 2025.

SOUZA, J. R. M. de; WANDERLEY, D. de A.; DÓRIA, Í. da S. A importância da robótica aplicada à neurociência como ferramenta utilizada na reabilitação de pacientes com deficiência locomotora: uma revisão teórica. **Engineering Sciences**, v. 3, n. 1, p. 6–18, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/SPC2318-3055.2015.001.0001>. Acesso em: 5 maio 2025.

WOLPAW, Jonathan et al. **Brain–computer interfaces for communication and control**. **Clinical Neurophysiology**, v. 113, n. 6, p. 767–791, jun. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1388245702000573>. Acesso em: 15 jun. 2025.