

Brain Controlled UGV:

Desenvolvimento de veículo terrestre não-tripulado controlado por interface cérebro-computador

Isaac Nóbrega Marinho



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2024

Isaac Nóbrega Marinho

Brain Controlled UGV

Monografia apresentada ao curso Engenharia da Computação
do Centro de Informática, da Universidade Federal da Paraíba,
como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia da Computação

Orientador: Valdecir Becker

Maio de 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M338b Marinho, Isaac Nobrega.

Brain controlled UGV: desenvolvimento de veículo terrestre não-tripulado controlado por interface cérebro-computador / Isaac Nobrega Marinho. - João Pessoa, 2024.
55 f. : il.

Orientação: Valdecir Becker.
TCC (Graduação) - UFPB/CI.

1. Interface cérebro-robô. 2. Veículos terrestres não-tripulados. 3. MQTT. 4. Artefato. 5. Prova de conceito. I. Becker, Valdecir. II. Título.

UFPB/CI

CDU 004.94:629.046



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia da Computação intitulado ***Brain Controlled UGV*** de autoria de Isaac Nóbrega Marinho, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Coelho Freire Batista
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. João Marcelo Alves Macedo
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Valdecir Becker
Universidade Federal da Paraíba

Coordenador(a) do Curso de Engenharia da Computação
Josilene Aires Moreira
CI/UFPB

João Pessoa, 21 de maio de 2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de usar um pouco desse espaço para agradecer àqueles que tornaram possível não só o desenvolvimento do presente trabalho na forma com que ele está hoje, mas também de toda minha trajetória até aqui.

Agradeço primeiramente a Deus, criador de todas as coisas, visíveis e invisíveis. Sem Ele nada existiria, nem eu estaria aqui, nem muito menos teria as condições que tive durante toda minha vida para chegar a esse ponto, desde coisas mais abstratas como a minha razão e inteligência, até aquilo mais concreto como o pão de cada dia, o teto sobre minha cabeça, minha família, meus amigos, a educação que tive, as oportunidades que me foram fornecidas, literalmente tudo o que me foi confiado nesta efêmera passagem por este mundo.

Agradeço também a toda a minha família, mas em especial minha mãe que tanto me apoiou e apoia durante toda minha trajetória, até mesmo nas gravações dos testes do presente trabalho. É certo que sem a sua ajuda eu não conseguiria chegar onde cheguei. Gostaria de enfatizar também o apoio de meu pai, especialmente quanto a escolha do curso a seguir, afinal sem a sua sensatez e pragmatismo, os caminhos que tomei certamente seriam bem diferentes.

Agradeço também a todos os professores que contribuíram em minha formação, especialmente meu orientador Valdecir Becker, com o qual trabalho há alguns anos não só nesse projeto, mas em muitos outros desde meu tempo de iniciação científica e que me auxiliou e orientou durante todo este processo de minha graduação.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos e colegas de curso, com quem eu partilhei tantos momentos de desespero, agonia, sofrimento, mas também de alívio e felicidade durante nossa trajetória na graduação. Em especial agradeço João Victor Galvão por tanto sua ajuda providencial no desenvolvimento do protótipo do VTNT, me emprestando os equipamentos necessários para a prototipagem, bem como me acompanhando junto a Joelder Aguiar, Miguel Elias e Yvson Nunes nos projetos de diversas disciplinas ao longo do curso. Agradeço também Mateus Antônio e Meive Tavares por sua ajuda no projeto do VTNT, especialmente na escolha das peças, destacando-se Mateus por ter me ajudado bastante também na implementação da interface entre o sistema BCI e o VTNT. Agradeço também Egídio Neto, que me ajudou a identificar e depurar problemas com a parte elétrica do VTNT.

Por fim, gostaria de agradecer a você, leitor, que decidiu ler minha monografia, que marca o fim de mais um ciclo de minha efêmera vida, que agora faz parte do porque este trabalho é relevante.

Pax et Bonum.

RESUMO

O presente trabalho objetiva desenvolver uma Interface Cérebro-Computador (ICC) responsável por controlar os movimentos de um Veículo Terrestre Não-Tripulado (VTNT), mostrando que é possível o desenvolvimento de uma Interface Cérebro-Robô (ICR) com as ferramentas localmente disponíveis no contexto da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) ou de baixo custo. É possível notar substanciais avanços na área de Interação Humano-Computador(IHC) nas últimas décadas, dentre eles, se destaca o desenvolvimento de ICCs, que apresentam o potencial de acabar com a barreira da curva de aprendizado que sempre é encontrada nas tecnologias de IHC existentes, por mais naturais e intuitivas que sejam. De maneira similar, o uso de robôs móveis vem se tornando cada vez mais comum no contexto da indústria 4.0, e este fato reflete no crescente interesse por parte de indústrias, empresas e do meio acadêmico em incorporar o uso de robôs móveis em suas atividades e pesquisas. Neste contexto, o presente trabalho se encontra na intersecção destas duas áreas extremamente promissoras, vislumbrando criar uma prova de conceito de VTNT controlado por Eletroencefalografia (EEG). Com o propósito de desenvolver uma prova de conceito de acordo com a Design Science Research Methodology (DSRM), a ICC e o VTNT foram desenvolvidos separadamente e posteriormente integrados. A ICC foi primariamente desenvolvida com o auxílio das ferramentas disponibilizadas pela *Emotiv*, especificamente o *headset* de *EEG Emotiv Insight* e o *Emotiv SDK*. Analogamente, o robô móvel construído apresenta tração diferencial e é movido por dois motores de corrente contínua de 6V, controlados por meio de um *driver* ponte-H e uma ESP-WROOM-32, e alimentado por uma bateria alcalina de 9V. A comunicação entre ICC e VTNT é realizada através do protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Os resultados alcançados apontam para uma resposta positiva à pergunta de pesquisa, ou seja, de que é possível desenvolver uma ICR no contexto das ferramentas já utilizadas na UFPB, mas ainda deixa espaço considerável para melhorias em trabalhos futuros.

Palavras-chave: <Interface Cérebro-Robô>, <Veículos Terrestres Não-Tripulados>, <MQTT>, <Artefato>, <Prova de Conceito>.

ABSTRACT

This study aims to develop a Brain-Computer Interface (BCI) responsible for controlling the movements of an Unmanned Ground Vehicle (UGV), demonstrating that it is possible to develop a Brain-Robot Interface (BRI) using locally available or low-cost tools within the context of UFPB. Significant advances in Human-Computer Interaction (HCI) have been observed over the past decades, among which the development of BCIs stands out, offering the potential to overcome the learning curve barrier present in existing HCI technologies, regardless of how natural and intuitive they may be. Similarly, the use of mobile robots has become increasingly common in the context of Industry 4.0, reflecting the growing interest from industries, companies, and academia in incorporating mobile robots into their activities and research. In this context, the present study is situated at the intersection of these two highly promising fields, aiming to create a proof of concept for a UGV controlled by Electroencephalography (EEG). In accordance with the Design Science Research Methodology (DSRM), the BCI and the UGV were developed separately and subsequently integrated. The BCI was primarily developed using tools provided by Emotiv, specifically the Emotiv Insight EEG headset and the Emotiv SDK. Similarly, the constructed mobile robot features differential traction and is powered by two 6V DC motors, controlled via an H-bridge driver and an ESP-WROOM-32, and powered by a 9V alkaline battery. Communication between the BCI and the UGV is achieved through the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol. The results indicate a positive response to the research question, confirming that it is feasible to develop a BRI using the tools already employed at UFPB, while still leaving considerable room for improvement in future work.

Keywords: <Brain-Robot Interface>, <Unmanned Ground Vehicle>, <MQTT>, <Artifact>, <Proof of Concept>.

LISTA DE FIGURAS

1	Ilustração do sistema 10-10 de posicionamento de eletrodos	21
2	Motor DC em uma caixa de redução	23
3	Circuito esquemático da ponte-H conectada a um motor DC	24
4	Arquitetura MQTT para troca de mensagens entre clientes	25
5	Interface de treino do aplicativo Emotiv BCI	32
6	Fotografia do Kit chassi 2WD parcialmente montado	34
7	<i>Driver</i> ponte-H para motores DC L298N	34
8	Regulador de tensão 7805A	35
9	<i>ESP-WROOM 32 Devkit V1</i>	35
10	Fluxograma do fluxo de acesso à Cortex API	38
11	Fluxograma de acesso ao fluxo de dados de comandos mentais	39
12	Esquemático do circuito do robô projetado	41
13	Protótipo do VTNT projetado	42
14	Interface entre sistema BCI e VTNT	43
15	Circuito protótipo para validação da comunicação entre sistema BCI e VTNT por MQTT	44
16	Ambiente de avaliação do artefato final	45

LISTA DE ABREVIATURAS

API - Application Programming Interface

BCI – Brain-Computer Interface

BRI – Brain-Robot Interface

CEP - Comitê de Ética em Pesquisa

CI - Circuito Integrado

CMS - Common Mode Sense

CT - Computed Tomography

DRAM - Dynamic Random Access Memory

DRL - Driven Right Leg

DSR - Design Science Research

DSRM - Design Science Research Methodology

EEG – Eletroencefalografia

ESC - Eletronic Speed Controller

GPIO - General Purpose Input Output

ICC – Interface Cérebro-Computador

ICR – Interface Cérebro-Robô

IHC – Interação Humano-Computador

IoT – Internet of Things

KNN - K-Nearest Neighbors

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport

MRI - Magnetic Resonance Imaging

PET - Positron Emission Topography

PWM - Pulse Width Modulation

SSEP – Steady State Evoked Potentials

SSVEP – Steady State Visual Evoked Potentials

UFPB - Universidade Federal da Paraíba

VTNT – Veículo Terrestre Não-Tripulado

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Definição do Problema	15
1.2	Premissas e Hipóteses	15
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	Estrutura da monografia	17
2	CONCEITOS GERAIS E TRABALHOS RELACIONADOS	18
2.1	Conceitos Gerais	18
2.1.1	Interfaces Cérebro-Computador	18
2.1.2	Sistemas BCI	18
2.1.3	Neuroimagem	18
2.1.4	Eletroencefalografia	19
2.1.5	Padrões de posicionamento de eletrodos	19
2.1.6	Ondas Cerebrais	21
2.1.7	Bluetooth	22
2.1.8	Sistemas de Tração	22
2.1.9	Motor de Corrente Contínua	22
2.1.10	Driver de Motor	23
2.1.11	Driver Ponte-H	23
2.1.12	Message Queuing Telemetry Transport	24
2.1.13	Callback	25
2.2	Trabalhos Relacionados	25
3	METODOLOGIA	28
3.1	Sistema BCI	29
3.2	Projeto do VTNT	32
3.3	Integração do Sistema BCI com VTNT projetado	36

4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1	Sistema BCI	38
4.2	Projeto do VTNT	40
4.3	Integração do sistema BCI com o VTNT	42
4.4	Artefato Final	44
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Interação Humano-Computador é um termo alcunhado pelo psicólogo Donald Norman na década de 1980, referindo-se ao campo de estudo relacionado com a implementação e avaliação de sistemas interativos para o ser humano (DE LIMA, 2021), que vem evoluindo rapidamente com os avanços das tecnologias interativas e a crescente demanda por sistemas que permitem uma maior complexidade de interação ao passo que mantém uma simplicidade intrínseca para o uso[1]. Ao longo das últimas décadas, diversas tecnologias que revolucionaram a interação entre Homem e Máquina surgiram, desde linhas de comando, teclado e mouse, até as telas sensíveis ao toque, tão comuns na atualidade.

No entanto, por mais que essas tecnologias venham melhorando consistentemente a forma com que leigos se relacionam e interagem com os computadores, ainda existem barreiras e ineficiências nestas formas de interação quanto a suas curvas de aprendizado, uma vez que são formas de interação intrinsecamente indiretas, isto é, necessitam que o usuário traduza sua intenção em comandos, seja digitando instruções nas interfaces de linhas de comando, clicando duas vezes com o seu mouse nos ícones que aparecem na tela, ou realizando o movimento de pinça em telas sensíveis ao toque, para que as máquinas computem suas intenções e traduzam elas em algo concreto.

Desta forma, se faz nítido o potencial das Interfaces Cérebro-Computador, visto que ao ler dados diretamente do cérebro do usuário, seria possível então coletar passivamente dados que podem ser usados para interpretar suas intenções sem a necessidade de traduzi-las em comandos indiretos, ou seja, uma interface de interação capaz de traduzir diretamente a intenção de seus usuários em resultados concretos nas aplicações e sistemas por eles manipuladas.

Este potencial latente não passa despercebido pela comunidade científica. Desde que Kamiya mostrou que ondas alpha poderiam ser controladas por pessoas após treinamento prévio (KAMIYA, 1968 apud LOTTE et al., 2018) e que Vidal alcunhou o termo Brain-Computer Interface e lançou um conjunto de desafios para controlar objetos a partir de dados obtidos da eletroencefalografia humana (VIDAL, 1973 apud LOTTE, 2018), diversos sistemas BCI têm sido desenvolvidos[2][3][4]. Esses estudos não se limitam a novas técnicas para implementação, mas também exploram possíveis aplicações.

Aplicações estas que variam entre auxiliar pessoas com *locked-in syndrome* a se comunicar (SELLERS et al., 2014), expressões artísticas que fazem uso desses sistemas para compor o conjunto da obra, como é exemplificado pelos capítulos do livro *Brain Art: Brain-Computer Interfaces for Artistic Expression*, editado por Anton Nijholt (2019), jogos que se utilizam de BCIs como forma de controle seja ela a principal ou não, como evidenciado no trabalho de Vasiljevic e Miranda (2023), onde é proposta uma taxonomia para classificar estes jogos em diferentes dimensões, que no próprio artigo é utilizada para

classificar exemplos de jogos presentes na literatura entre outras aplicações[5][6][7].

Dito isto, o presente trabalho é um dos múltiplos projetos em neurociência baseados em EEG desenvolvidos atualmente na UFPB, a exemplo das recentes publicações acerca do uso conjunto de EEG e *Eye-Tracking*(CAVALCANTI et al., 2023), análise de EEG durante consumo de mídia (DA SILVA et al., 2022), neuromarketing (PINON e DA SILVA, 2023) entre outros[8][9][10].

Além disso, o presente trabalho propõe uma prova de conceito para aplicação de Sistema BCI na área de robótica móvel, que também presencia um crescimento em sua relevância não só acadêmica, mas também industrial, sobretudo por conta da indústria 4.0, dos recentes avanços tecnológicos em capacidade de processamento e portabilidade de computadores para aplicações de IoT, da pandemia de COVID-19 (QVRO, 2023) que forçou o mundo a se adaptar a uma nova forma de produzir, bem como dos recentes conflitos armados desencadeados mundialmente[11].

1.1 Definição do Problema

Assim como exposto anteriormente, a proposta do presente trabalho se situa na intersecção entre duas áreas de crescente relevância na atualidade, que por si só já pode ser considerada uma área distinta, mas correlata e que ainda não é explorada localmente na UFPB.

Dito isto, o maior desafio a ser enfrentado pelo presente trabalho está justamente em construir essa ponte entre IHC, mais precisamente o desenvolvimento de sistemas BCI, e robótica móvel, mais precisamente o desenvolvimento de VTNTs, ambas áreas que já são extensivamente pesquisadas localmente.

Em resumo, o desafio é desenvolver uma Interface Cérebro-Robô de baixo custo, aproveitando as ferramentas e equipamentos já utilizados nas pesquisas de Interfaces Cérebro-Computador na UFPB.

1.2 Premissas e Hipóteses

Para que seja possível solucionar o problema de pesquisa levantado, é necessário antes tomar as certas premissas como verdadeiras, pois o desenvolvimento de uma BRI de acordo com as restrições levantadas depende delas para ser factível e viável. As premissas consistem em:

- Viabilidade Técnica: A premissa de que é tecnicamente possível desenvolver com os recursos disponíveis um sistema capaz de aferir os sinais cerebrais, interpretá-los

em comandos e transmitir os comandos ao VTNT de maneira precisa e em tempo real.

- **Segurança e Confiabilidade:** A premissa de que a BRI pode ser desenvolvida de maneira segura e confiável, de modo a evitar riscos tanto ao usuário e o ambiente ao seu redor quanto ao próprio sistema.
- **Correlação entre Cérebro e Comportamento:** A premissa de que é possível estabelecer uma correlação entre a atividade cerebral aferida com os comandos utilizados para controlar o robô.
- **Adaptabilidade Humana:** A premissa de que o ser humano, mais especificamente o cérebro humano é capaz de se adaptar suficientemente de forma com que seja possível aprender a controlar até certa extensão seus sinais de forma com que torne viável a comunicação efetiva com um sistema robótico.

Além das premissas levantadas, é válido ressaltar que a tese do presente trabalho parte da hipótese de que é possível desenvolver uma Interface Cérebro-Robô de baixo custo utilizando ferramentas e equipamentos já empregados nas pesquisas sobre BCIs na UFPB, que ao final do desenvolvimento do trabalho foi provada verdadeira.

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho objetiva principalmente desenvolver um VTNT de baixo custo próprio, controlado primariamente por um Sistema BCI desenvolvido com as ferramentas e equipamentos já aplicados nas pesquisas localmente desenvolvidas na área de desenvolvimento de BCIs, de forma a provar a tese levantada como verdadeira e incentivar a pesquisa na área de Interfaces Cérebro-Robô na UFPB e contribuir para a consolidação de parcerias entre pesquisadores e laboratórios locais que pesquisam sobre as áreas que o projeto engloba.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho consistem em etapas modularizadas para o desenvolvimento do Sistema BCI e do VTNT, e a posterior integração destas duas partes. Desta forma, temos como objetivos específicos:

1. Desenvolver um Sistema BCI capaz de codificar os dados aferidos da atividade cerebral em comandos distintos em tempo real.
2. Projetar e montar um protótipo de VNTN simples e de baixo custo, mas capaz de se comunicar com o Sistema BCI desenvolvido.

3. Desenvolver a interface de comunicação entre o sistema BCI e o protótipo de VNTN desenvolvidos.

1.3 Estrutura da monografia

A monografia está dividida em cinco sessões. A sessão 1 consiste em introduzir o trabalho de maneira clara e concisa, esclarecendo pontos como em qual área o projeto se situa, qual a justificativa para o seu desenvolvimento, o que será feito e como se espera chegar nesses resultados.

A sessão 2 denominada de conceitos gerais consiste primariamente da elucidação de conceitos essenciais que serão utilizados ao decorrer do trabalho e de uma rápida revisão do estado da arte, de forma com que este seja compreensível para aqueles que não estão familiarizados com a área.

A sessão 3 denominada de metodologia consiste em definir e elucidar exatamente como o projeto será realizado, de modo com que seja possível garantir sua replicabilidade e sua conformidade com o método científico.

A sessão 4 denominada de resultados consiste na exposição e discussão dos resultados obtidos a partir da execução daquilo que foi elucidado na metodologia.

E por fim, a sessão 5 denominada de conclusões consiste nas considerações finais do desenvolvimento do trabalho, se este foi um sucesso ou um fracasso e por que, bem como apontar para possíveis melhorias e trabalhos futuros.

2 CONCEITOS GERAIS E TRABALHOS RELACIONADOS

2.1 Conceitos Gerais

2.1.1 Interfaces Cérebro-Computador

Interfaces Cérebro-Computador, também conhecidas como Brain-Computer Interfaces, são definidas segundo Wolpaw (apud WOLAPAW, 2013, p.68) como "Um sistema que mede a atividade do sistema nervoso central e a converte em *outputs* artificiais que substituem, restauram, aprimoram, suplementam ou melhoram *outputs* naturais mudando deste modo interações em andamento entre o sistema nervoso central e o ambiente externo ou interno" [12][13].

2.1.2 Sistemas BCI

Sistemas BCI são complexos e dependem da aplicação dos mais variados conhecimentos e técnicas de forma com que sejam desenvolvidos corretamente, consistindo num processo de múltiplos passos sequenciais (NAM et. al., 2018)[14]. Segundo Chang, esses passos sequenciais podem ser divididos em quatro categorias, de acordo com a ordem em que acontecem: primeiramente, os sinais oriundos da atividade cerebral do usuário são gerados, e essa atividade pode então ser lida alguma das diversas formas de *Brain Imaging* disponíveis, para que então sejam filtrados os artefatos e barulhos presentes nestes sinais, extraíndo desta forma as partes desse sinal mais interessantes ao sistema, que por fim são analisados por meio de algoritmos que classificam o estado e/ou intensão do usuário, de forma com que seja possível controlar o sistema desenvolvido.

2.1.3 Neuroimagem

Neuroimagem ou *brain imaging* se refere ao uso de diversas técnicas para direta ou indiretamente averiguar a estrutura, funcionalidade ou farmacologia do cérebro (WETA, 2021)[15]. Podem ser divididas em duas categorias abrangentes, estrutural e funcional, que como seus nomes indicam, focam no estudo da estrutura e da funcionalidade do cérebro respectivamente. Exemplos de técnicas de neuroimagem estrutural incluem tomografia computadorizada (CT) e Ressonância Magnética (MRI). Já como exemplos de técnicas de neuroimagem funcional temos a Eletroencefalografia que é foco do presente estudo, a Ressonância Magnética funcional e o *Positron Emission Topography*, também conhecido como *PET scan*.

Para sistemas BCI, apenas técnicas de neuroimagem funcional são consideradas, uma vez que seu objetivo é extrapolar a partir da atividade cerebral, ou seja, de seu fun-

cionamento, informações úteis que possam ser utilizadas para comunicação com sistemas computacionais bem como controle sobre eles.

Nesse contexto, é possível ainda dividir as técnicas de neuroimagem funcionais entre invasivas e não-invasivas, que se referem respectivamente à necessidade ou não de realizar procedimentos cirúrgicos para aplicá-la. Os exemplos de neuroimagem funcional do parágrafo anterior são todos de técnicas não-invasivas. Um exemplo de técnica de neuroimagem invasiva utilizada em sistemas BCI é a Eletrocorticografia.

2.1.4 Eletroencefalografia

Segundo Britton et. al. (2016), "A eletroencefalografia é uma técnica eletrofisiológica para registrar a atividade elétrica que originada do cérebro humano"[16]. A eletroencefalografia consiste em posicionar eletrodos no escalpo do paciente, de modo com que seja possível os sinais elétricos provenientes da atividade cerebral (CHARISMATIC PLANET, 2022), sendo primeiro constatados em humanos pelo psiquiatra germânico Hans Berger em sua obra intitulada "das Elektrenkephalogramm" (BERGER, 1929)[17][18].

Por apresentar uma extraordinária sensibilidade temporal, a eletroencefalografia é empregada em estudos acerca da funcionalidade cerebral (BRITTON, 2016)[16]. Essa sensibilidade temporal por sua vez, aliada a sua simplicidade e relativa portabilidade quando comparada a outras formas de neuroimagem não-invasivas, a torna dessas técnicas a mais atrativa no contexto de Interfaces Cérebro-Computador.

2.1.5 Padrões de posicionamento de eletrodos

Com o desenvolvimento e maturação das pesquisas acerca da eletroencefalografia, ficou claro que o "Posicionamento de eletrodos de EEG padronizados é essencial para ambas aplicações clínicas e pesquisa" (SEECK et. al., 2017)[19]. Por este motivo, não demorou até que surgissem tais padronizações na literatura, sendo o primeiro exemplo o sistema 10-20 da *international federation*, que recebe este nome justamente pelo espaçamento entre eletrodos adjacentes ser de 10% ou 20% da distância total entre Nasion e Inion ou pontos pré-auriculares esquerdo e direito do crânio humano (TSMI, 2022)[20].

Segundo Webster et. al. (apud TSMI, 2022), "O sistema 10-20 da federação internacional é um método reconhecido internacionalmente que usa pontos de referência anatômicos para padronizar a colocação de eletrodos de eletroencefalografia"[20]. Apresentado originalmente por Jasper no *Brussels IV International EEG Congress* de 1957, o sistema 10-20 se tornou consenso acerca da nomenclatura do posicionamento de eletrodos de EEG (NUWER, 2018)[21].

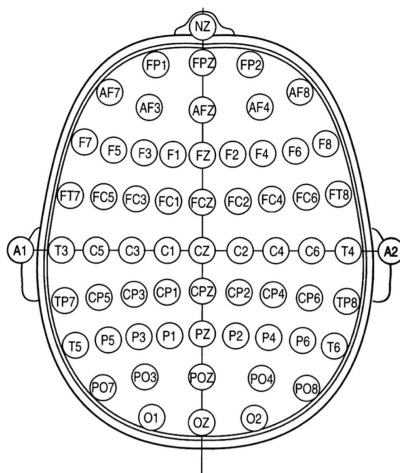
No entanto, segundo Nuwer (2018), diferentes nomenclaturas surgiram com o passar dos anos preenchendo as lacunas entre os principais eletrodos do sistema 10-20[21]. Construindo em cima desta iniciativa, a *international federation* publicou em 1998 diretrizes descrevendo o sistema 10-10, isto é, a extensão do sistema 10-20 cuja distância entre dois eletrodos é estritamente de 10% da distância total.

A figura 1 abaixo, retirada do artigo de Nuwer (2018), ilustra os posicionamentos de eletrodos por ele previstos. Note que as letras identificam regiões gerais onde os eletrodos se localizam, especificamente entre o Nasion e o Inion. Do sistema 10-20 temos as regiões Fp, que identifica o lobo pré-frontal; F que identifica o lobo frontal; C que identifica a região central do crânio; T que identifica o lobo temporal; P que identifica o lobo parietal; e O que identifica o lobo occipital. Além destes, estão também presentes no sistema 10-10 as regiões AF, que se encontra entre Fp e F; FT, que se encontra entre F e T; FC que se encontra entre F e C; CP que se encontra entre C e P; e PO que se encontra entre P e O (OOSTENVELD; PRAAMSTRA, 2001)[22]. As letras M e A, quando empregadas, se referem aos mastóides ou lóbulos da orelha respectivamente.

Além das letras, os números nos sistemas de posicionamento de eletrodos indicam o posicionamento dos eletrodos em relação aos pontos pré-auriculares esquerdo e direito. A letra z após a identificação da posição em relação ao nasion e o inion indica que o eletrodo está posicionado na linha central entre os pontos pré-auriculares esquerdo e direito. Quanto maior o número, mais próximo do ponto pré-auricular o eletrodo se encontra. Se o número for ímpar, o eletrodo está mais próximo do ponto pré-auricular esquerdo, enquanto se o número for par, o eletrodo está posicionado mais próximo do ponto pré-auricular direito. A cada número de mesma paridade, temos 10% da distância entre os pontos pré-auriculares cobertas. Desta forma, sabemos que o ponto Pz se encontra no centro do lobo parietal, enquanto o ponto C1 se encontra no lobo central deslocado 10% da distância entre os pontos auriculares em direção ao ponto auricular esquerdo.

Além disso, é válido ressaltar o conceito de canal EEG, que se refere a um eletrodo de EEG capturando dados da atividade cerebral do paciente (NEUROSKY, 2015)[26].

Figura 1: Ilustração do sistema 10-10 de posicionamento de eletrodos



Fonte: NUWER, 2018[21]

2.1.6 Ondas Cerebrais

Ondas cerebrais, também conhecidas como oscilações neurais, podem ser definidas como atividade elétrica rítmica e/ou repetitiva gerada espontaneamente e em resposta a estímulos por tecido neural no sistema nervoso central (BASAR, 2013)[23].

Essas ondas cerebrais que podem ser observadas nas aferições de EEG puras, isto é, sem nenhum tipo de processamento, são compostas por uma mistura de múltiplos sinais com frequências base e seus harmônicos, das quais se considera refletirem os estados cognitivo, afetivo e de atenção do paciente. Na literatura, essas frequências são classificadas em intervalos ou faixas de frequência uma vez que elas variam de acordo com fatores individuais, propriedades do estímulo e estado interno do paciente (FARNSTWORTH, 2019)[24].

A primeira classificação de faixas de frequência para ondas cerebrais, introduzida pelos especialistas da *International Federation of Societies for Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* em 1974 foi motivada por considerações clínicas pragmáticas. As faixas de frequência subsequentemente descobertas foram denominadas a partir de letras gregas, e os limites entre elas foram definidos de maneira arbitrária e igualmente divididas entre ondas delta (0.5Hz-4Hz); ondas theta (4Hz-8Hz); ondas alpha (8Hz-12Hz); ondas beta (12Hz-30Hz); E ondas gama (>30Hz) (BUZSÁKY, 2006)[25].

Desta forma, uma das ferramentas mais importantes para o processamento de sinais de EEG é a transformada de Fourier, mais precisamente o algoritmo da *Fast Fourier Transform* (FFT), capaz de transformar sinais para o domínio da frequência, onde essa relação entre a faixa de frequência predominante na leitura de EEG do paciente com seu estado cognitivo, afetivo e de atenção pode ser melhor observada.

2.1.7 Bluetooth

Bluetooth é uma tecnologia de comunicação sem fio de curto alcance que permite a conexão e consequente troca de dados entre dispositivos eletrônicos sem a necessidade de uma infraestrutura suporte de rede como pontos de acesso ou roteadores sem fio (INTEL, s.d.)[27]. Desenvolvida para substituir cabos e conexões físicas, o *bluetooth* opera na faixa de frequência de rádio de 2,4 GHz e é amplamente utilizado para transferência de arquivos, transmissão de áudio e comunicação entre dispositivos.

2.1.8 Sistemas de Tração

Sistema de tração é referente ao sistema que cuida da locomoção de um veículo terrestre, o que inclui robôs móveis, quando este é baseado em tração, nominalmente quando ela é feita por rodas, esteiras ou membros semelhantes a pés e mãos. Existem diversos tipos de sistemas de tração utilizados para robôs móveis como a tração diferencial.

A tração diferencial, também conhecida como tração não-holonômica devido a restrições de movimento, se refere a sistemas de tração manobrados por meio da diferença do torque aplicado entre os lados do veículo (SAMPAIO et. al., 2014)[28]. Por ser pouco custoso e simples de implementar em contextos de robótica móvel, esse modelo de tração é amplamente utilizado no ensino de robótica.

2.1.9 Motor de Corrente Contínua

Motores de corrente contínua, abreviados como motores DC do inglês *Direct Current Motors*, é o conversor rotativo de energia elétrica mais escolhido, por conta da sua simplicidade de funcionamento (CRAVO, 2024)[29]. Como o próprio nome indica, são motores elétricos acionados por fontes de alimentação com corrente elétrica contínua, variando a velocidade de rotação ao variar a intensidade da tensão e/ou corrente de alimentação. Ao alterar a polaridade da tensão de alimentação, é possível controlar a direção na qual o motor gira.

A figura 2 ilustra um motor DC simples, já conectado a uma caixa de redução para ser utilizado em aplicações de robótica.

Figura 2: Motor DC em uma caixa de redução



Fonte: Autoria própria

2.1.10 Driver de Motor

Drivers de motor podem ser definidos como circuitos integrados (CIs) responsáveis por controlar os motores em aplicações de robótica móvel ou sistemas embarcados, provendo e controlando a tensão, corrente, direcionalidade e proteção necessárias para operar eficientemente os dispositivos e partes robóticas por ele controladas (ROBOCRAZE, 2023)[30]. Exemplos comumente utilizados de *drivers* de motores são a ponte-H, Eletronic Speed Controles (ESC), *driver* de motor de passos entre outros.

Devido a natureza analógica dos motores elétricos, uma técnica amplamente utilizada para a comunicação entre computador embarcado e *driver* de motor é a *Pulse Width Modulation* (PWM), que viabiliza o controle de dispositivos analógicos por meio de dispositivos digitais sem a necessidade do uso de um conversor digital analógico (UPADHYAY, 2022)[37]. Ela consiste em alterar o período em que uma onda quadrada fica no valor alto em comparação com o período total da onda. Essa relação em porcentagem é denominada de *duty cycle*.

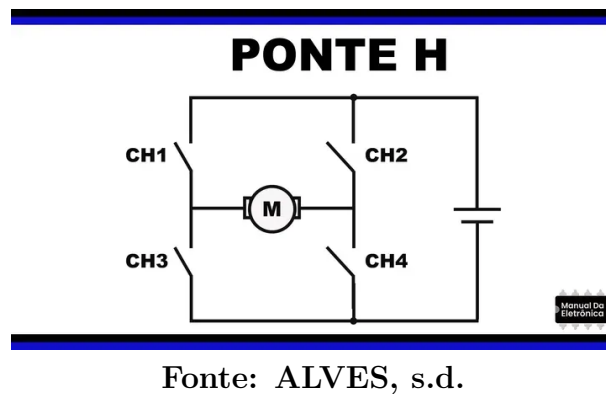
2.1.11 Driver Ponte-H

O *driver* ponte-H é um circuito simples amplamente utilizado para controlar a direção de motores DC, geralmente em conjunto com microcontroladores como a esp32

ou arduino. A origem do nome ponte-H é intuitiva, uma vez que a carga é conectada entre as 4 chaves numa configuração que lembra a letra h (ALVES, s.d.)[31].

O *driver* de motor ponte-H vale-se do fato de que a polaridade da tensão de alimentação altera a direção de giro de motores DC. A figura 3 a seguir apresenta o esquemático de uma ponte-H conectada a um motor DC. Nela, ao fechar as chaves CH1 e CH4 ao mesmo tempo, enquanto as chaves CH2 e CH3 estão abertas polariza o motor diretamente, fazendo ele girar em um sentido, e de maneira análoga, ao fechar as chaves CH2 e CH3 enquanto as chaves CH1 e CH4 estão abertas, o motor é polarizado inversamente, girando no sentido contrário.

Figura 3: Circuito esquemático da ponte-H conectada a um motor DC



2.1.12 Message Queuing Telemetry Transport

O Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) é um protocolo de transporte de mensagens para *Internet of Things* (IoT), projetado para ser bi-direcional, leve, eficiente, confiável e simples de entender e implementar (OASIS, 2015), sendo ideal para aplicações para conectar dispositivos com largura de banda mínima e deixando um *code footprint* pequeno (MQTT.ORG, 2022)[33][34].

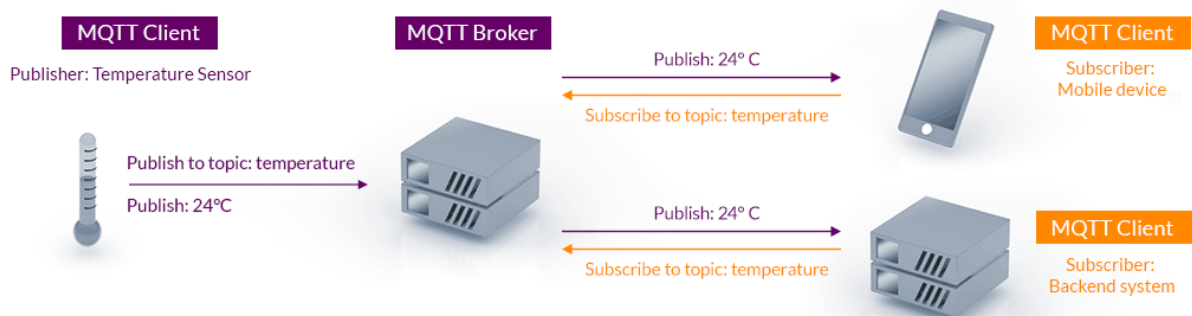
O termo *code footprint* de um código se refere a memória ocupada pelo código em si, a memória da pilha utilizada e Dynamic Random Access Memory (DRAM) ocupada por qualquer coisa que não sejam dados puros (GRAVES, 2020)[32]. Desta forma, ao afirmar que o protocolo MQTT deixa um *code footprint* pequeno, está se afirmando que ele ocupa uma pequena fração da memória do sistema computacional para ser implementado.

A troca de mensagens por meio do protocolo MQTT funciona de maneira análoga a uma emissora de Televisão (COPE, 2021), uma vez que assim como uma emissora de Televisão transmite seu conteúdo por meio de um canal, sem depender de que alguém esteja conectado ao canal para a transmissão acontecer, a troca de mensagens por meio do protocolo MQTT ocorre por meio de um *broker* MQTT, que na analogia seria a emissora,

que recebe mensagens de clientes publicadores e as envia para todos os clientes (telespectadores) que estiverem subscritos ao tópico (canal) no qual a mensagem foi enviada originalmente[35].

A figura 4 abaixo ilustra como a troca de mensagens pelo protocolo MQTT funciona, com um cliente publicando os valores da temperatura no tópico *temperature* para o *broker*, e este enviando a mensagem recebida para todos os clientes subscritos ao tópico *temperature*.

Figura 4: Arquitetura MQTT para troca de mensagens entre clientes



Fonte: MQTT.ORG, 2022

2.1.13 Callback

O conceito de função *callback* se refere às funções que são passadas como argumentos para outras funções, sendo esperado que elas sejam chamadas pela função externa de maneira a completar uma rotina ou ação da função externa (MDN, s.d), permitindo a implementação de lógicas tanto síncronas, isto é, que garantem a sincronia das partes por meio de um temporizador (*clock*) compartilhado, ou assíncronas, isto é, não apresentam temporizador compartilhado e, portanto não se pode garantir a sincronia entre as partes por meio de *clocks*[36].

2.2 Trabalhos Relacionados

Para desenvolver uma compreensão do estado da arte numa ampla área como o desenvolvimento de BRIs, é necessário filtrar o que é de fato relevante para o desenvolvimento do presente trabalho, limitando as obras pesquisadas àquelas que mais se assemelham ao contexto atual.

Desta forma, como o objetivo do presente trabalho está relacionado a desenvolver uma BRI de baixo custo com os equipamentos comumente utilizados nas pesquisas da UFPB, a pesquisa realizada acerca dos trabalhos relacionados foi limitada àquelas

que utilizam de equipamentos e ferramentas similares. No decorrer desta sessão, serão brevemente apresentados alguns dos trabalhos que mais se destacaram.

Kremenski e Lekova (2022) reportaram sobre o desenvolvimento de uma abordagem para integração entre um sistema BCI baseado em EEG e um robô humanoide[38]. Utilizando duas abordagens distintas para realizar essa integração e transformar o robô humanoide em dispositivo IoT, sendo elas a implementação da troca de mensagens entre robô e sistema BCI por meio do protocolo MQTT, quer seja o *broker* hospedado localmente ou na nuvem; E a segunda abordagem referente ao uso da ferramenta Node-RED, baseada no Node.js, para implementar o processamento, envio e reenvio de mensagens entre sistema BCI e robô humanoide pela internet.

Alseddiqi et. al. (2023) reportaram acerca do desenvolvimento de um sistema BCI capaz de utilizar os dados brutos de EEG, pré-processados e então classificados pelo algoritmo *K-Nearest Neighbors* (KNN), para controlar o movimento de uma cadeira de rodas remotamente[39]. A comunicação entre sistema BCI e cadeira de rodas elétrica é feita através de WiFi, mas sem especificar nenhum protocolo adicional, enviando os comandos aferidos e processados pelo sistema BCI para um computador *Raspberry Pi* embarcado responsável por fazer com que a cadeira de rodas elétrica se mova de acordo com os comandos recebidos.

Limchesing et. al. (2021) desenvolveram um trabalho numa temática similar à Alseddiqi et. al., discorrendo sobre cadeiras de rodas controladas por sistemas BCI[40]. Nele é reportado um sistema BCI para controle de servo motores ligados às rodas de uma cadeira de rodas. O sistema BCI se utiliza do fluxo de dados de comandos mentais disponibilizado pela *Cortex API*, se comunica com um microcontrolador por uma interface *Web Server* que por sua vez controla os sinais que chegam a um *driver* para controle de motores ESC, que por sua vez controla o movimento dos motores. Vale salientar que nesta pesquisa, os testes foram realizados em simulação e a comunicação entre microcontrolador e sistema BCI foi feita através de cabo USB.

Lian et. al. (2023) reportam o desenvolvimento de um classificador para sinais de EEG baseado em Motor Imagery(MI), isto é, nos sinais de EEG obtidos de um usuário quando este está pensando em realizar algum movimento[41]. O classificador consiste em aferir os dados brutos de EEG os transmitindo para o *host* do sistema pelo protocolo TCP/IP, extrair as bandas de frequência alpha, beta, gamma e theta a partir da decomposição dos sinais por *wavelet packet* em sinais tridimensionais 9x9x4 bem como a entropia diferencial desses sinais, aplicação do modelo de redes neurais convolucionais para classificar os comandos recebidos e então enviá-los como comandos ao robô humanoide.

Marin, Battbootti e Goga (2020) desenvolveram um sistema BCI utilizando-se simultaneamente dos fluxos de dados de comandos mentais e expressões faciais fornecidos

pela *Cortex API*[42]. Esse sistema BCI foi utilizado para enviar por meio do protocolo MQTT as informações de comandos mentais e expressões faciais já processadas a um computador *On Board Raspberry Pi Zero*, sendo o controle de um drone a partir desses comandos enviados mencionado, mas as conclusões deixaram a entender que essa integração será abordada em trabalhos futuros.

Zamora, Benítez e Navarro (2019) reportaram o uso de um sistema BCI baseado em sinais de EEG, bem como dos sinais provenientes da Inertial Measurement Unit(IMU) do *headset* EEG para extrair *features* desses sinais que foram transformadas em comandos, enviados para um microcomputador *Raspberry Pi 3* por meio do protocolo MQTT, que com base nos sinais recebidos do microcomputador, controla um braço robótico[43].

3 METODOLOGIA

A metodologia escolhida para o desenvolvimento do presente trabalho foi a *Design Science Research Methodology*(DSRM), baseada na abordagem *Design Science research* (DSR) que apresenta fundamentos que legitimam o desenvolvimento de artefatos orientados a resolução de problemas como um meio para a produção de conhecimento científico e tecnológicos (PIMENTEL, FILIPPO, SANTORO, 2020), o que torna esta abordagem ideal para fundamentar a metodologia do presente trabalho visto os objetivos anteriormente levantados que consistem no desenvolvimento de um artefato capaz de solucionar uma lacuna/problema[44].

A DSRM serve como um *framework* amplamente aceito para a realização de pesquisas baseadas nos princípios da DSR, consistindo na realização de 6 atividades em sequência nominal (PEFFERS, 2007)[45] que são:

1. Identificação do problema e motivação, de modo a tornar possível a definição do problema de pesquisa e justificar a relevância da solução.
2. Definição dos objetivos para a solução a partir da derivação de uma solução para o problema definido e conhecimento do que é possível e viável.
3. Projeto e desenvolvimento do artefato capaz de solucionar o problema levantado e atingir os objetivos definidos.
4. Demonstração do uso do artefato desenvolvido para resolver uma ou mais instâncias do problema identificado.
5. Avaliação do desempenho do artefato como uma solução para o problema.
6. Comunicação do problema e sua importância, bem como do artefato desenvolvido e o quão bem ele se saiu na resolução do problema levantado.

Se, nas atividades 4 ou 5, for identificado que o artefato desenvolvido não apresenta resultados satisfatórios, a DSRM sugere que a sequência de atividades seja retomada a partir da etapa de projeto e desenvolvimento do artefato ou de definição dos objetivos. Isso permite que o artefato seja aprimorado incrementalmente até que seja capaz de resolver o problema identificado de maneira satisfatória, atingindo os objetivos definidos.

A primeira atividade, referente a identificação do problema e consequente motivação para o desenvolvimento do artefato, foi discutida ainda na introdução com a contextualização e posterior definição do problema de pesquisa, que consiste em desenvolver uma Interface Cérebro-Robô de baixo custo utilizando ferramentas e equipamentos já empregados nas pesquisas acerca de Interfaces Cérebro-Computador na UFPB.

A segunda atividade, que envolve a definição dos objetivos para a solução do problema de pesquisa levantado, foi realizada ao definir, também na introdução, os objetivos específicos do presente trabalho. Estes são: Desenvolver um Sistema BCI capaz de codificar os dados aferidos da atividade cerebral em comandos distintos em tempo real; Projetar e montar um VNTN simples e de baixo custo, mas capaz de se comunicar com o Sistema BCI desenvolvido; Desenvolver a interface de comunicação entre o sistema BCI desenvolvido e o VNTN desenvolvido, de modo a validar o sistema BRI proposto e, assim, atingir o objetivo principal do projeto.

A terceira atividade, referente ao projeto e desenvolvimento do artefato será detalhada ao decorrer dessa sessão, dividida de acordo com os objetivos específicos, ou seja, os requisitos levantados na realização da atividade 2.

A quarta atividade, de demonstração do uso do artefato desenvolvido será discorrida detalhadamente na sessão de resultados, onde se discute o artefato resultante obtido, no entanto, o que foi avaliado nesta atividade ainda é definido adiante na presente sessão.

Já a quinta atividade, referente à avaliação do desempenho do artefato como uma solução do problema, pela natureza do problema de pesquisa como uma prova de conceito, se confunde bastante com a avaliação realizada na atividade 4, pois resolver este problema de pesquisa é mostrar que o artefato desenvolvido é possível de ser obtido no contexto em que ele está inserido.

A quinta atividade difere-se da quarta mais por uma exigência de generalidade, alcançada ao realizar testes com múltiplos usuários em circunstâncias distintas, mostrando-se inviável no contexto do presente trabalho por conta da limitação envolvendo o Comitê de Ética em Pesquisa (CEP), uma vez que não houve tempo hábil durante o desenvolvimento para elaborar um ambiente de testes rigoroso o suficiente, bem como solicitar e esperar pela aprovação de tal ambiente pelo CEP.

Por fim, a sexta atividade de comunicação do problema identificado e do artefato desenvolvido para sua solução, consiste na publicação da presente monografia.

3.1 Sistema BCI

Para desenvolver o sistema BCI responsável por gerar os comandos para o robô a partir da atividade cerebral, serão seguidos os passos elucidados na sessão 2, onde se discorreu acerca de sistemas BCI. Desta forma, é primeiramente necessário escolher uma forma de *Brain Imaging*, como filtrar e extrair os dados relevantes da atividade cerebral e como traduzir estes dados para comandos.

A forma de *Brain Imaging* escolhida foi a eletroencefalografia, primariamente por ser a mais amplamente utilizada em sistemas BCI, não ser invasiva, isto é, não necessitar

de procedimento cirúrgico para ser implementada, ter uma boa resolução temporal e espacial, de forma com que aplicações em tempo real sejam possíveis e sobretudo, sua acessibilidade uma vez que além de ser a mais difundida na comunidade científica, é também a mais disponível no mercado com diversos equipamentos *consumer grade*, isto é, disponibilizados para os consumidores em geral.

Para tanto, o *Emotiv Insight* foi escolhido como o equipamento responsável por realizar as aferições de EEG e filtrar os dados aferidos. A extração dos dados relevantes e sua tradução para comando foram realizadas com o auxílio da *Emotiv EEG Platform*, plataforma de desenvolvimento da *Emotiv*, que fornece as ferramentas necessárias para o desenvolvimento de sistemas BCI com o *hardware* da *Emotiv*.

O *Emotiv Insight* é um equipamento de medição de EEG com conexão *wireless* por *Bluetooth*, que conta com 5 canais para leitura de EEG, localizados nas posições AF3, AF4, T7, T8 e Pz do sistema internacional 10-20, com as conexões de *Driven Right Leg* (DRL) e *Common Mode Sense* (CMS) (NEUROELECTRICS, 2020) na mastoide esquerda atuando como referência do sistema[46].

A coleta de amostras ocorre sequencialmente, numa frequência de 2048 Hz, ocorrendo posteriormente filtragem e redução em sua taxa de amostragem para 128 amostras por segundo, submetidas a um conversor analógico-digital de 14 bits (2 bits de *instrumental noise floor* são descartados), com o *Least Significant Bit* (LSB) representando $51\mu V$ e um alcance dinâmico para os inputs de $8400\mu V$ (EMOTIV, s.d.)[47].

O *headset* conta também com filtro *sinc* de quinta ordem, filtros *notch* digitais para 50Hz e 60Hz e acoplamento AC, além de reconhecer larguras de banda para as ondas cerebrais no intervalo de 0.5-43Hz. Outra funcionalidade do *Emotiv Insight* é sua capacidade de detectar movimentos, por meio do acelerômetro, magnetômetro e giroscópio presentes na IMU ICM-20948 acoplada ao *headset*.

A escolha do *Emotiv Insight* em detrimento dos outros equipamentos utilizados no laboratório, é devida a diversas razões, especialmente por ser historicamente o equipamento utilizado nas pesquisas locais bem como ser o equipamento de menor custo nesse contexto, por sua integração com o ambiente de desenvolvimento da *Emotiv*, a *Emotiv EEG Platform*, que é uma peça fundamental para o desenvolvimento do projeto, visto que facilita os processos necessários para o desenvolvimento de sistemas de BCI como o treinamento dos usuários entre outras coisas.

Além disso, o *Emotiv Insight* é o *headset* aferidor de EEG mais amigável a aplicações comerciais da *Emotiv*, uma vez que foi projetado para propiciar aplicações de sistemas BCI fora de ambientes acadêmicos, principalmente por fornecer uma construção ergonômica, com poucos eletrodos localizados em canais estratégicos e de um material que mitiga as inconveniências de eletrodos normais.

A *Emotiv EEG Platform* é a plataforma de desenvolvimento fornecido pela *Emotiv* para facilitar o desenvolvimento de sistemas BCI com seu *hardware* próprio, como é o caso do *Emotiv Insight*, para seus clientes. Ela disponibiliza diversos aplicativos e ferramentas com este propósito, se destacando no escopo deste projeto o aplicativo *Emotiv BCI* e a *Cortex API*.

O *Emotiv BCI* é o "carro chefe" dos softwares disponibilizados pela *Emotiv* para o desenvolvimento de BCIs. Com ele é possível, dentre outras aplicações menos relevantes para o contexto do projeto, conectar o equipamento aferidor de EEG monitorar a qualidade dos sinais por ele obtidos, treinar o sistema para realizar a detecção de comandos mentais distintos, bem como de expressões faciais e utilizar tais comandos e expressões treinados para controlar sistemas computacionais diversos (EMOTIV, 2023)[48].

Já a *Cortex API*[49] é uma das peças fundamentais para trazer a tecnologia de BCI ao consumidor, uma vez que permite usuários com conhecimentos em programação desenvolver suas próprias aplicações que interagem com os equipamentos aferidores de EEG comercializados pela *Emotiv*. Ela proporciona as ferramentas necessárias para automatizar o processo de conexão dos equipamentos com a aplicação e a extração de fluxos de dados como os comandos mentais e a potência das larguras de banda que caracterizam as ondas mentais, em tempo real, tanto para o treinamento como para a aplicação em si.

Exemplos de uso da Cortex API são disponibilizados para uso público por meio de repositório online (EMOTIV, 2024a) para todas as linguagens por ela suportadas, exemplos esses que serviram de base para o desenvolvimento do sistema BCI e sua integração com o VTNT projetado[50].

O sistema BCI desenvolvido adaptou dois dos *scripts* exemplo disponibilizados no repositório citado, sendo eles o *cortex.py* e o *live.advance.py*, responsáveis respectivamente por implementar a comunicação com a *Cortex API* e o pipeline de aferição de comandos mentais e outros fluxos de dados possíveis de extrair pela *Cortex API* diretamente do *headset* EEG utilizado, no caso o *Emotiv Insight*.

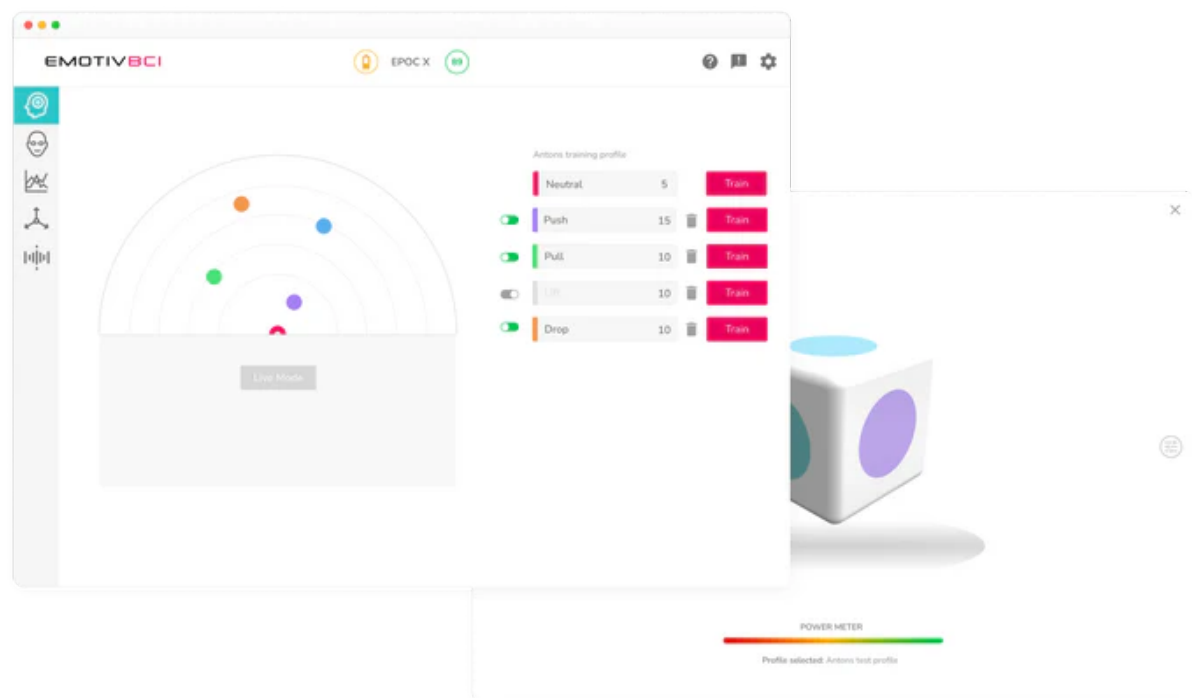
Vale ressaltar que a implementação de um módulo de treino de comandos mentais bem como da detecção das expressões faciais foge do escopo do presente trabalho e, ao passo que esta etapa do desenvolvimento da BCI é essencial para o acesso ao fluxo de dados de comandos mentais bem como a precisão dos comandos retornados, de forma com que se fez necessária a realização do treinamento a parte, fazendo uso do aplicativo *Emotiv BCI*, que já apresenta uma interface de treino pronta.

A figura 5 a seguir ilustra a interface de treino disponibilizada pelo aplicativo *Emotiv BCI*. Nela é possível treinar os comandos mentais separadamente, até um máximo de 4 comandos simultâneos, excluindo o comando *neutral*, que representa um estado neutro e relaxado da mente.

Nela, também é possível treinar a detecção de expressões faciais, divididas entre as expressões da parte superior do rosto de sobrancelhas levantadas, sobrancelhas franzidas e neutro, bem como as expressões da parte inferior do rosto de cerrar os dentes, sorrir e estado neutro.

A interface do *Emotiv BCI* também permite o descarte de treinos já realizados para retreiná-los posteriormente ou trocar o comando que o sistema BCI é capaz de detectar, bem como de desativar a identificação do comando sem descartar o treino realizado.

Figura 5: Interface de treino do aplicativo Emotiv BCI



Fonte: Emotiv, s.d.[51]

A validação do sistema BCI consistiu no treino e posterior avaliação da performance e acurácia na detecção de comandos mentais e expressões faciais, realizando o procedimento de treino até que resultados suficientemente satisfatórios fossem obtidos, de modo com que fosse possível, mesmo que com alguns erros, controlar o VTNT de fato.

3.2 Projeto do VTNT

O projeto do VTNT desenvolvido como parte do artefato proposto pelo presente trabalho segue os passos apresentados no protocolo proposto por Stager, Tanner e Sparks (2022) para o projeto de VTNTs, incluindo os componentes necessários e diretrizes para realizar tal tarefa[52]. Vale salientar que algumas das considerações originalmente propostas no protocolo foram desconsiderados para a presente aplicação, uma vez que não

apresentam relevância significativa no presente contexto.

As considerações propostas pelo protocolo citado que foram acatadas durante o projeto do VTNT por sua relevância no contexto do artefato desenvolvido são:

1. Considerar as restrições da aplicação.
2. Escolher um chassi comercial ou projetar um próprio.
3. Definir o sistema de tração.
4. Projetar o sistema elétrico do VTNT.
5. Decidir qual computador embarcado será utilizado na aplicação.
6. Definir como acontecerá a comunicação entre o VTNT e uma estação base.
7. Planejamento da parte de software para controlar o funcionamento do VTNT e seu funcionamento correto na aplicação.

As restrições levantadas para a aplicação estão relacionadas ao fato de que é necessário realizar a conexão do VTNT com o sistema BCI, ao passo em que se mantém custo e complexidade baixas. Desta forma, foi definido que o VTNT deve ser projetado da forma mais simples possível, focando no funcionamento em áreas internas para facilitar a implementação da comunicação entre VTNT e sistema BCI.

O chassi escolhido foi o Kit chassi 2WD, que consiste em um chassi de suporte em acrílico, duas rodas de tração com pneus de borracha, dois motores DC 3 6V com caixa de redução 48:1, dois discos *encoder*, um rodízio giratório, e um suporte para 4 pilhas. O suporte para pilhas não foi utilizado neste projeto. A figura 6, retirada da tese de Barboza (2023), mostra um exemplo desse kit parcialmente montado, como os motores, caixas de redução, chassi, rodas, rodízio giratório e *encoders* montados[53].

Figura 6: Fotografia do Kit chassi 2WD parcialmente montado

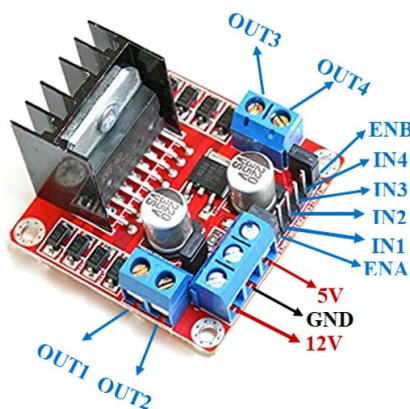


Fonte: BARBOZA, 2023

Com a escolha do chassi, foi também definido o sistema de tração, uma vez que assim como especificado acima, o Kit chassi 2WD vem com dois motores DC, duas rodas de tração e uma roda boba, termo pelo qual o rodizio giratório é comumente conhecido, facilitando a implementação de um sistema de tração diferencial com duas rodas de tração e uma roda de apoio, corroborando com a restrição de complexidade reduzida.

O sistema elétrico do VTNT projetado é relativamente simples, consistindo numa bateria de 9V como fonte de alimentação, ligada a uma chave que alimenta o *driver* de motor L298N e um regulador de tensão que alimenta o computador embarcado. As figuras 7 e 8 a seguir ilustram respectivamente o módulo *driver* ponte-H para motores DC L298N e o regulador de tensão para 5V 7805a.

Figura 7: *Driver* ponte-H para motores DC L298N



Fonte: lakshyajhalani56, 2022[54]

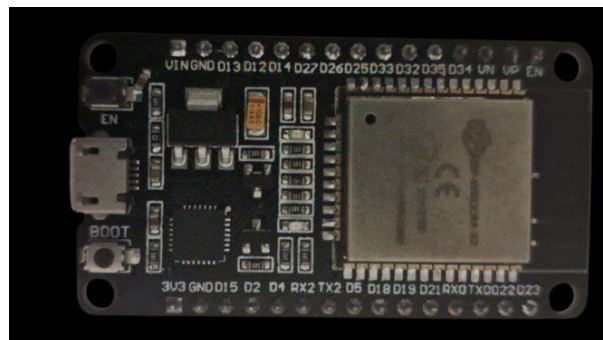
Figura 8: Regulador de tensão 7805A



Fonte: DatasheetCafe, 2022[55]

O computador embarcado escolhido para o projeto do VTNT foi a *ESP-WROOM 32 Devkit V1* de 30 pinos, por características como poder de processamento relativamente alto comparado a seu tamanho, suporte para comunicação *Bluetooth* e *WiFi* e facilidade de programação, com amplo suporte da comunidade. A figura 9 abaixo ilustra o micro-controlador utilizado.

Figura 9: *ESP-WROOM 32 Devkit V1*



Fonte: Autoria própria

Aproveitando-se da restrição do VTNT de ser forçado para ambientes internos, bem como das capacidades do computador embarcado selecionado, foi definido que a comunicação entre VTNT e estação base, que no caso é hospedada na nuvem, seria realizada por meio de *WiFi*, com envio de mensagens de controle da base para o VTNT pelo protocolo TCP/IP.

Além disso, foi levantado que o software para o VTNT desenvolvido deverá imple-

mentar a comunicação por meio de *WiFi* com a estação base, que atua como intermediador entre o VTNT e o sistema BCI, bem como a lógica de controle dos motores por meio do módulo *driver* ponte-H para motores DC L298N.

Foi definido também que o Arduino *Integrated Development Environment* (IDE) na versão 2.3.2 seria utilizado, uma vez que a comunidade de desenvolvimento com a ESP desenvolveu diversas ferramentas facilitadoras para o desenvolvimento para ESP na Arduino IDE, especialmente para a implementação de conexão *WiFi*. As bibliotecas utilizadas no desenvolvimento do código para o VTNT foram:

- *WiFi.h* para implementar a conexão e comunicação via TCP/IP por *WiFi*;
- *WiFiClientSecure.h* para implementar a lógica de autenticação necessária para a comunicação com o sistema BCI;
- *driver/gpio.h* para implementar o uso dos pinos de *General Purpose Input Output* (GPIO) do computador embarcado do VTNT;
- *driver/ledc.h* e *esp_err.h* para implementar o uso de PWM para certas entradas do módulo L298N.

A validação do projeto e prototipagem do VTNT foi realizada ao comparar, com o auxílio de um multímetro, as continuidades e os valores de tensão esperados em diversas partes do circuito elétrico do VTNT já montado com os valores esperados em seu projeto inicial, juntamente com a averiguação do funcionamento dos motores e outras peças mecânicas, de modo com que ao se notar inconsistências em alguma das partes, estas serem prontamente resolvidas, seja por um reparo ou até mesmo troca das peças.

3.3 Integração do Sistema BCI com VTNT projetado

Assim como mencionado na descrição da metodologia aplicada para desenvolver o VTNT, a integração entre o sistema BCI e o VTNT projetado ocorrerá por intermédio de uma estação base, que será um broker MQTT hospedado em uma plataforma de nuvem, de modo com que seja possível tomar vantagem dos pontos fortes do MQTT, como escalabilidade, leveza e desempenho.

O broker MQTT escolhido foi o *hivemq* (HIVEMQ, s.d.), pela abundância de conteúdos online por ele disponibilizada bem como o fato de que é relativamente fácil de usar e simples de implementar, bem como oferece serviços de broker MQTT de maneira totalmente gratuita, corroborando com um dos objetivos, o de manter o custo mínimo durante o desenvolvimento do VTNT[56].

Os códigos de ambos o sistema BCI e o VTNT foram alterados para acomodar esta estratégia de comunicação entre as partes. No sistema BCI, o *script* exemplo *cortex.py* foi alterado ao adicionar uma nova *thread* para lidar com a conexão do sistema BCI ao *broker* na nuvem, alterando o *callback* do recebimento de mensagens provenientes de algum fluxo de dados para enviar o comando mental ou a expressão facial recebidas caso os dados recebidos na mensagem sejam provenientes de algum deles, enviando o comando mental ou expressão facial recebida para o *broker* na nuvem no tópico 'bri/command'.

Além disso, foi adicionada uma lógica para finalizar a aferição dos comandos mentais quando o usuário pressiona a tecla enter, para evitar o uso excessivo de dados na nuvem e finalizar corretamente o acesso à *Cortex API*.

As bibliotecas utilizadas para implementar essa modificação foram a *certifi* (PyPia, 2024a) na versão 2021.10.08, responsável por gerar a certificação necessária para acessar o *broker* na nuvem; *paho.mqtt.client* (PiPy, 2024b) na versão 2.1.0, para facilitar a implementação do envio de mensagens MQTT e a conexão com o broker; e *threading* (PyPi, 2024c), para implementar a *thread* que executa esta integração[57][58][59].

Já para o VTNT, as alterações realizadas consistiram em adicionar no código um cliente MQTT que se subscreve no tópico 'bri/command' e implementar um *callback* a ser executado toda vez que uma mensagem no tópico é recebida, alterando o valor lógico das portas conectadas com as entradas IN1-4 da ponte-H, bem como o *duty cycle* do PWM dos canais conectados com as entradas ENA e ENB da ponte-H. A biblioteca utilizada para implementação do cliente MQTT foi a *PubSubClient.h* (LEARY, s.d.), na sua versão 2.8[60].

A integração entre sistema BCI e VTNT foi validada, consumando a realização da atividade 4 da DSRM, por meio de pequenos experimentos práticos ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, valendo-se principalmente de ferramentas como o dispositivo virtual disponível no *Emotiv Launcher*, capaz de simular todos os fluxos de dados que podem ser aferidos pelos equipamentos da Emotiv, bem como de componentes eletrônicos básicos como LEDs e resistores, de formas que serão discutidas adiante na sessão de resultados.

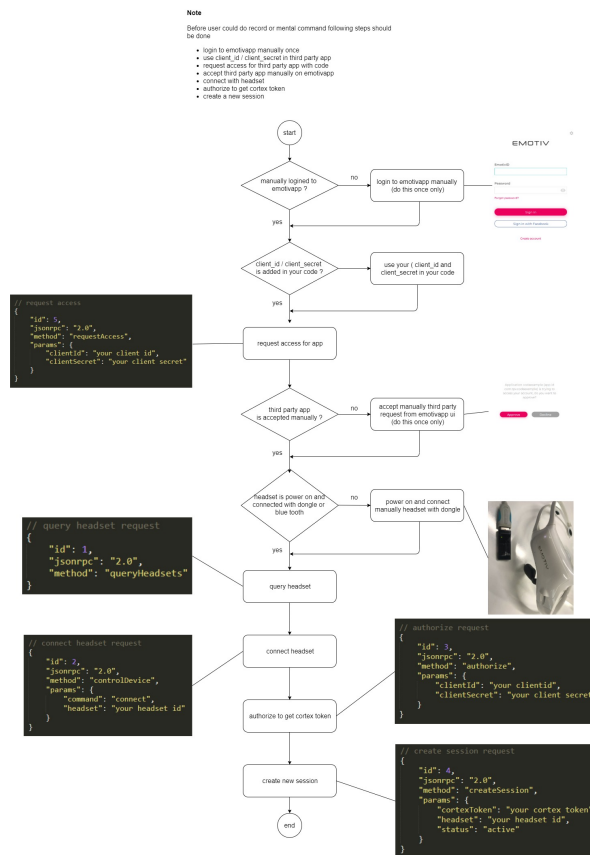
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Sistema BCI

O sistema BCI desenvolvido se vale da comunicação com o *headset* EEG e a *Emotiv Cloud* por meio da *Cortex API*, que utiliza dos protocolos *WebScket Secure* e *JSON-RPC* 2.0 para implementá-la.

As figuras a seguir, retiradas da própria documentação da *Cortex API*, ilustram fluxogramas que representam os passos que devem ser sequencialmente realizados para receber os dados obtidos no fluxo de dados de comandos mentais.

Figura 10: Fluxograma do fluxo de acesso à *Cortex API*

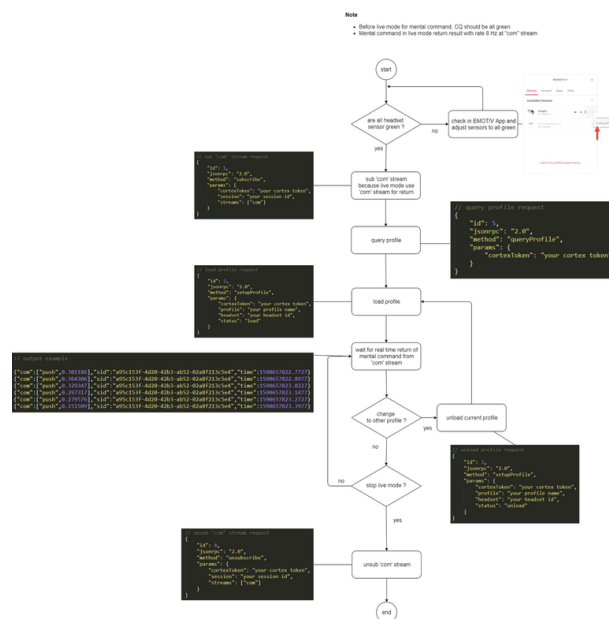


Fonte: EMOTIV, 2024b[61]

A figura 10 ilustra a sequência de passos necessária para acessar à *Cortex-API*. Para tal, é necessário primeiro fazer login no *Emotiv Launcher*, aplicativo disponibilizado gratuitamente pela *Emotiv* para facilitar a inicialização e acesso aos outros aplicativos da *Emotiv EEG Platform*. Além disso, é necessário ter previamente cadastrado a aplicação para obter acesso ao *Client ID* e ao *Client Secret* seguindo os passos descritos na documentação (Emotiv, 2023), pois sem essas chaves não é possível acessar a API[49].

Após isso, caso seja a primeira vez que o aplicativo é executado, é necessário permitir manualmente o acesso à API. Na sequência, é necessário ligar e conectar o *headset EEG* ao *bluetooth* (No caso do *Insight 2.0* a conexão é realizada automaticamente, sem a necessidade de equipamento externo), e só após esses passos é possível começar a sequência de chamadas à API para descobrir os *headsets* ligados e conectados por *bluetooth* ao computador executando o *Cortex service*, conectar o aplicativo ao *headset* desejado, autorizar a conexão e por fim iniciar a sessão, permitindo agora a solicitação de subscrição aos fluxos de dados fornecidos.

Figura 11: Fluxograma de acesso ao fluxo de dados de comandos mentais



Fonte: EMOTIV, 2024c[62]

A figura 11 ilustra por sua vez, a sequência de passos necessária para o acesso ao fluxo de dados de comandos mentais em tempo real. Começa pelo uso da interface do aplicativo *Emotiv BCI* para auxiliar no posicionamento do *headset* de modo com que a qualidade da conexão dos eletrodos seja aceitável, seguido de chamadas à API responsáveis por subscrever o aplicativo ao fluxo de dados desejado(no caso, o de comandos mentais); Averiguar os perfis de usuário ligados à conta; *Loggar* no perfil desejado e esperar até o comando que indica que se deve parar a aferição de comandos mentais, desligando a subscrição ao fluxo de dados, sendo os outros fluxos de dados também obtidos de maneira análoga.

Vale salientar que além dos passos descritos nos fluxogramas, após *loggar* no perfil selecionado, o *script live_advance.py* averigua os comandos mentais treinados para o perfil selecionado, averigua a sensibilidade do perfil a estes comandos e a atualiza, para então subscrever ao fluxo de dados de comandos mentais, sendo a atualização dos comandos e

de suas sensibilidades eliminadas da versão final, assim como será discutido adiante.

Num primeiro momento, o sistema BCI desenvolvido tinha como objetivo ser capaz de distinguir a quantidade máxima de comandos mentais permitidas pela API, que são 4 além do comando neutro. No entanto, nas sessões de treino, foi observado que ao utilizar essa quantidade de comandos mentais, a distinção entre eles era prejudicada, ocasionando frequentemente a detecção indevida de um comando mental como outro.

Desta forma, valendo-se do objetivo do presente trabalho ser referente a uma prova de conceito, a quantidade de comandos mentais excetuando o neutro foi reduzida para dois, de modo com que o problema das detecções indevidas foi mitigado.

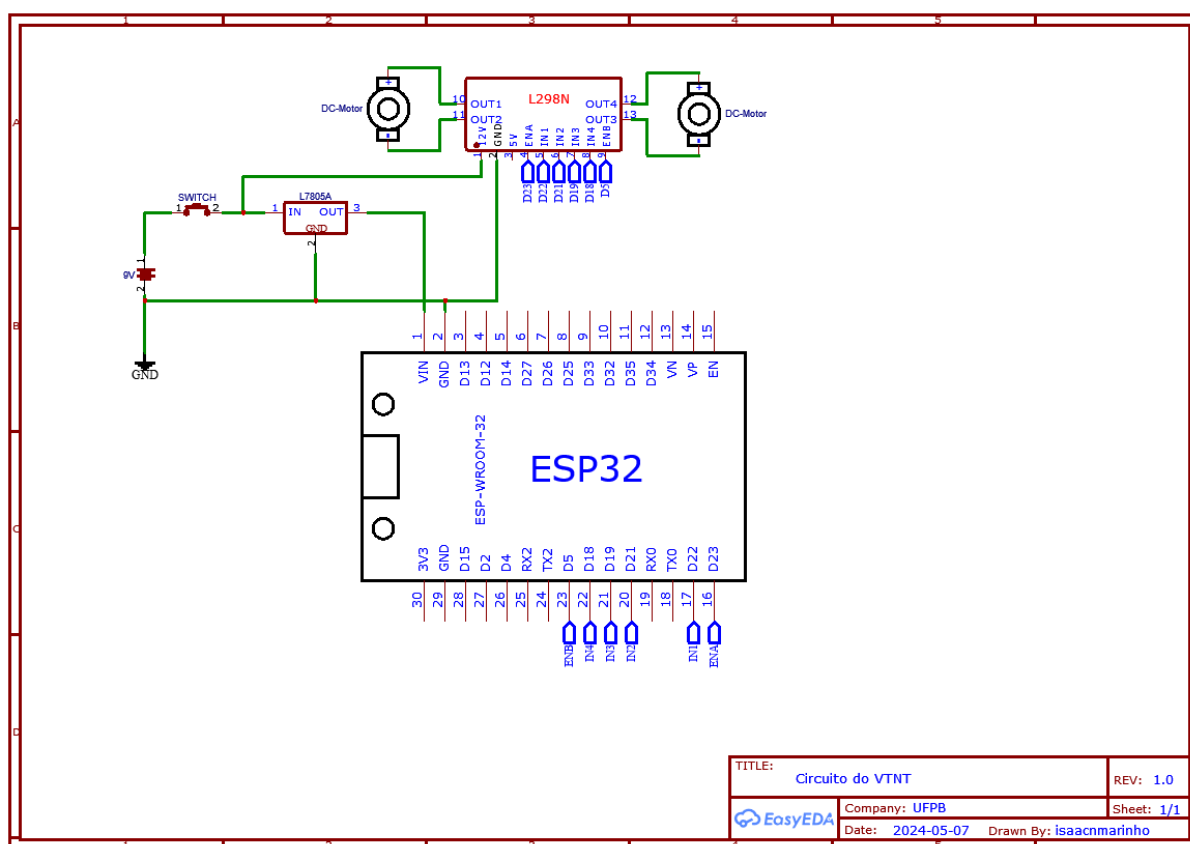
Essa nova abordagem gerou melhores resultados, e foi aliada à abordagem de utilizar também o fluxo de dados de expressões faciais proposta por Marin, Battbootti e Goga (2020), para conseguir utilizar um maior número de comandos sem gerar o problema das detecções indevidas[42].

A arquitetura final do sistema BCI é capaz de identificar os comandos mentais de empurrar e puxar, bem como as expressões faciais, das quais apenas a de franzir as sobrancelhas é utilizada para controlar o VTNT.

4.2 Projeto do VTNT

A figura 12 abaixo consiste no diagrama esquemático das conexões elétricas do VTNT projetado entre os componentes e a alimentação. Ele consiste em uma bateria alcalina de 9V conectada a uma chave para ligar e desligar o circuito do VTNT. A saída da chave está ligada diretamente a um *driver* ponte-H L298N e a um regulador de tensão 7805a, que regula a tensão de entrada para 5V em sua saída. Os pinos D23, D22, D21, D19, D18 e D5 da ESP estão respectivamente ligados às entradas ENA, IN1, IN2, IN3, IN4 e ENB do *driver* L298N. O terra comum de todos os componentes (regulador de tensão, ponte-H e ESP) está ligado ao terra da bateria.

Figura 12: Esquemático do circuito do robô projetado

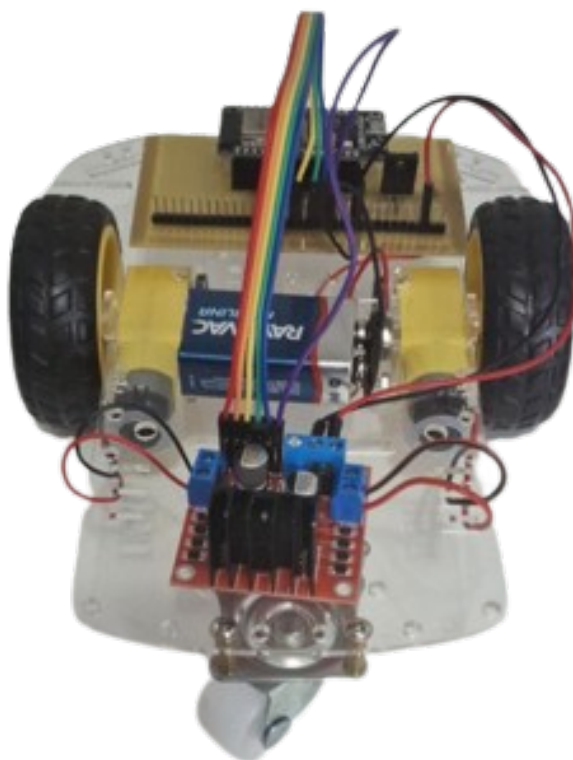


Fonte: Autoria própria

Após desenvolver o esquemático, foi produzido um protótipo do circuito elétrico, soldando os componentes numa placa perfurada ou soldando pontas de fios nos terminais dos componentes. Uma barra de pino fêmea foi soldada para acomodar a ESP ao invés de soldá-la diretamente na placa perfurada, bem como a ligação entre os pinos da ponte-H e os pinos da ESP foi feita por meio de *jumpers* fêmea-fêmea, ligados aos pinos da ponte-H e a uma barra de pinos macho soldada na placa perfurada e nos soquetes específicos dos pinos da EPS utilizados.

No decorrer dos testes, problemas com a eletrônica i.e. componentes que deveriam estar ligados não estão, os motores não estão sendo ativados quando deveriam entre outros foram encontrados e prontamente resolvidos. A figura 13 abaixo ilustra o resultado final da prototipagem do VTNT projetado.

Figura 13: Protótipo do VTNT projetado

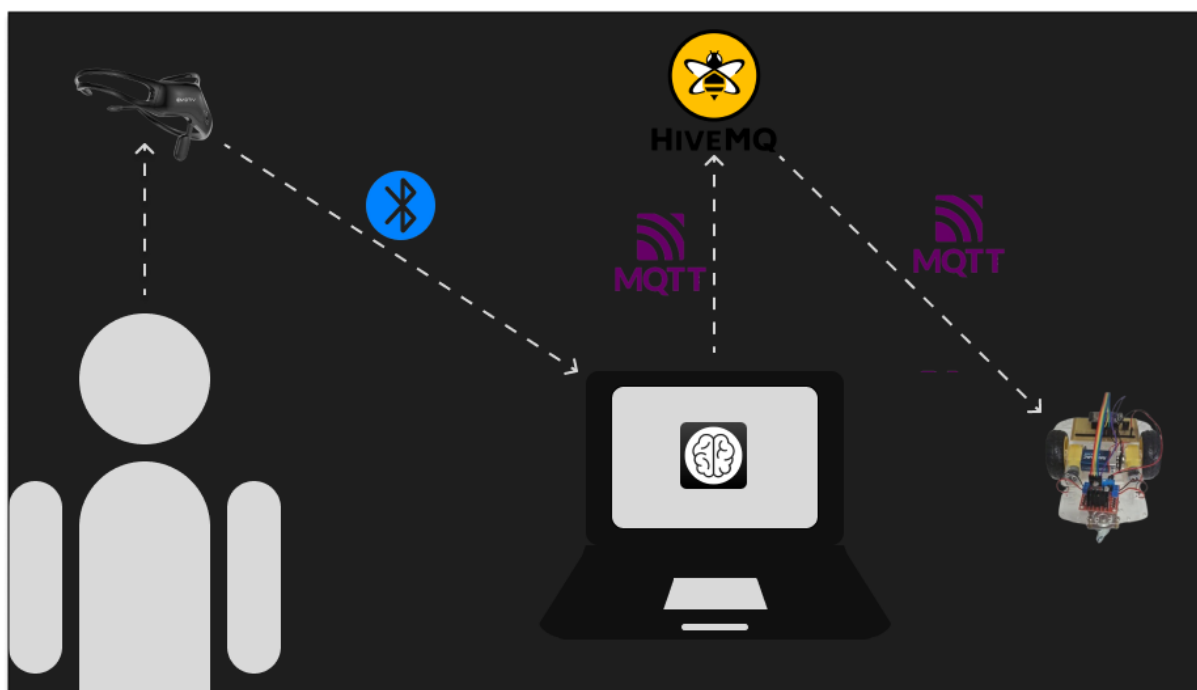


Fonte: Autoria própria

4.3 Integração do sistema BCI com o VTNT

A figura 14 ilustra como ocorre a comunicação entre o sistema BCI e o VTNT. Assim como anteriormente mencionado, os comandos mentais são aferidos pelo *headset* EEG, e são enviados ao computador pessoal via *bluetooth*, que por sua vez envia os comandos aferidos à estação base por meio da publicação de mensagens MQTT ao *broker* hospedado na nuvem num tópico no qual o VTNT está subscrito. Desta forma, toda vez que o *broker* recebe algum comando mental ele o envia também para o VTNT, que processa o comando recebido e modifica seu padrão de movimento de acordo.

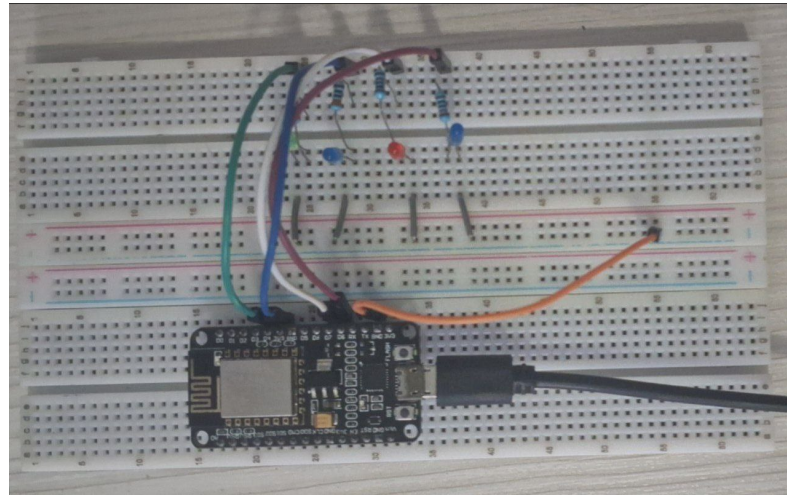
Figura 14: Interface entre sistema BCI e VTNT



Fonte: Autoria própria

Para validar o funcionamento da comunicação entre sistema BCI, *broker* MQTT e computador embarcado, um pequeno circuito foi montado numa *protoboard*, ligando uma ESP à 4 leds distintos, de forma com que cada comando mental distinto recebido ligava um dos leds enquanto desligava os outros. A figura 15 abaixo ilustra o circuito montado para a validação. Como esta validação se refere à interface de comunicação entre sistema BCI e ESP, os comandos mentais foram simulados, gerados pela ferramenta de *headset* virtual disponibilizada na plataforma da *Emotiv*.

Figura 15: Circuito protótipo para validação da comunicação entre sistema BCI e VTNT por MQTT



Fonte: Autoria Própria

4.4 Artefato Final

O principal resultado do presente trabalho é o artefato final desenvolvido, que consiste na BRI formada pelo conjunto integrado do sistema BCI com o protótipo de VTNT desenvolvidos. Os códigos para tanto o sistema BCI quanto o computador embarcado do VTNT estão disponibilizados no repositório do *github* Isaac-CI/BRI (ISAAC, 2024)[63].

Após todo o desenvolvimento separado de cada uma das partes do artefato proposto, ele foi integrado e avaliado por meio de um experimento prático. Vale salientar que por conta das restrições de tempo, não foi possível elaborar um ambiente de testes com múltiplos sujeitos para uma avaliação mais robusta, pois como se trata de uma intersecção com a área da saúde e que dados sensíveis seriam coletados, seria necessária uma prévia aprovação no CEP, o que tornou esta análise inviável.

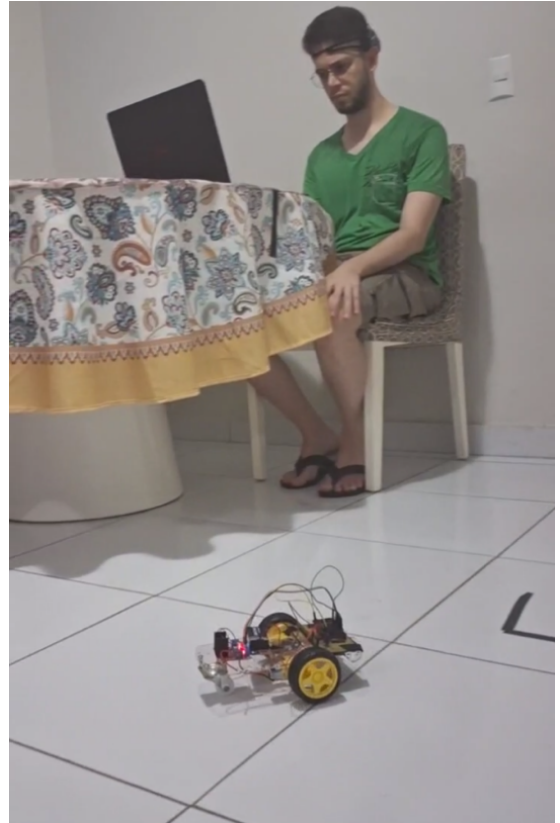
O experimento consistiu em utilizar o sistema BCI para controlar o VTNT numa pista de testes, o fazendo se mover entre dois pontos demarcados no chão. As figuras 16a e 16b ilustram o ambiente de testes montado e a execução de uma iteração do teste respectivamente.

Figura 16: Ambiente de avaliação do artefato final

(a) Pista de testes montada para avaliar o artefato final



(b) Execução do teste do artefato final



Fonte: Autoria própria

Algumas ressalvas que devem ser feitas em relação aos testes são que todas as iterações dos testes foram realizadas no autor do presente trabalho, e que ele não havia tido boas noites de sono durante a última semana, chegando a estar a mais de 24h acordado no momento dos testes, o que muito provavelmente afetou seu desempenho neles.

Vale salientar que ao decorrer dos testes com o artefato final, foram observados alguns problemas com as partes isoladas do trabalho, a exemplo do robô estar pendendo para a direita ao se deslocar para frente devido ao acúmulo de carga em seu lado direito, resolvido aumentando o *duty cycle* do PWM para o motor esquerdo; O deterioramento ao decorrer dos testes das conexões soldadas na placa perfurada, sendo resolvida através da conexão por meio de *jumper*s dos pinos da ESP com as entradas da ponte-H, bem como da alimentação e GND da ESP com a barra de pinos soldada; E por fim, uma frequente desconexão com o *WiFi* e consequentemente com o *broker* hospedado na nuvem, cuja provável causa é uma falha no projeto do circuito elétrico, ao não adicionar os capacitores de acoplamento ao módulo regulador de tensão, mas que não houve tempo hábil para reparar.

Os resultados obtidos após executar múltiplas instâncias do teste foi de que apesar do artefato desenvolvido apresentar múltiplos problemas, não cumprindo o objetivo do teste com sucesso em nenhuma de suas iterações, o objetivo geral do presente trabalho foi de fato alcançado, visto que foi possível, com ferramentas já disponíveis na UFPB ou de baixo custo, implementar uma BRI que torna possível o controle de um VTNT por meio do uso de apenas sinais provenientes de EEG, mesmo que não acurado ou satisfatório.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Assim como brevemente citado na discussão dos resultados, o objetivo geral do presente trabalho, que consiste em desenvolver um VTNT de baixo custo próprio, controlado primariamente por um Sistema BCI desenvolvido com as ferramentas e equipamentos já aplicados nas pesquisas localmente desenvolvidas na área de BCIs, foi atingido com sucesso, uma vez que a BRI desenvolvida apresenta um VTNT controlado apenas por sinais aferidos por EEG.

Além disso, os objetivos específicos de desenvolver um sistema BCI capaz de codificar os dados aferidos da atividade cerebral em comandos distintos em tempo real; projetar e montar um protótipo de VNTN simples e de baixo custo, mas capaz de se comunicar com o Sistema BCI desenvolvido e; desenvolver a interface de comunicação entre o sistema BCI desenvolvido e o protótipo de VNTN desenvolvido, foram atingidos também, uma vez que o sistema BCI desenvolvido é de fato capaz de comunicar os comandos mentais recebidos e enviá-los ao VTNT, que por sua vez é de fato capaz de se comunicar com o sistema BCI e foi desenvolvido apenas com materiais de baixo custo e fácil obtenção e a integração entre essas duas partes do trabalho está de fato funcionando uma vez que é possível enviar comandos para o VTNT e este responder como foi averiguado pelos testes apresentados na sessão de resultados.

Apesar do sucesso em atingir o objetivo geral e os objetivos específicos, o artefato desenvolvido não deixa de apresentar certos problemas de funcionamento, como desconexão frequente do VTNT com a rede WiFi, que por sua vez é necessária para conectá-lo ao sistema BCI; ou da acurácia e precisão das detecções de comandos mentais e expressões faciais abrirem espaço para melhorias.

Tal espaço para melhorias se faz especialmente perceptível quando é considerado o fato de que os testes foram realizados em apenas uma pessoa que apresentava estado mental alterado pelo cansaço extremo, o que certamente afetou o funcionamento do artefato, tornando evidente a necessidade de uma forma de levar em conta o estado mental do usuário quando este executar tanto o treino do sistema BCI quanto os testes do artefato.

Limitações como o tempo reduzido de desenvolvimento e a necessidade de utilizar apenas ferramentas já usualmente utilizadas no contexto da UFPB ou de baixo custo foram as principais causas dos problemas e dificuldades encontrados.

Uma dificuldade gerada pela limitação do tempo de desenvolvimento reduzido foi o aumento da proporção de qualquer problema que surgiu com o artefato, forçando que a solução encontrada para a próxima iteração do artefato fosse a mais rápida e não a que mais se enquadra com os objetivos definidos, como bem exemplificado com o desgaste das ligações soldadas, resolvida ao conectar a ESP ao *driver* ponte-H por meio de *jumpers*.

Vale destacar como outra dificuldade também gerada pela limitação do tempo de desenvolvimento a inviabilidade de desenvolver e aplicar os testes do artefato em múltiplos usuários para cumprir com a atividade 5 da DSRM, uma vez que seria necessária a aprovação por parte do CEP, assim como todas as pesquisas que envolvam coleta de dados com seres humanos.

O processo de aprovação pelo CEP é lento e burocrático, sendo por este motivo o desenvolvimento e aplicação dos testes em múltiplos usuários desconsiderado e retirado do escopo antes de prosseguir com os passos necessários para solicitar a aprovação do CEP.

A limitação da necessidade de utilizar apenas ferramentas de baixo custo ou já utilizadas nas pesquisas da UFPB por sua vez resultou na impossibilidade de utilizar técnicas e algoritmos mais próximos ao estado da arte, uma vez que estas técnicas e algoritmos necessitam do desenvolvimento do próprio classificador de comandos mentais baseados na aferição de EEG bruta, que no ambiente de desenvolvimento da *Emotiv* necessita de uma inscrição ao seu serviço aumentando consideravelmente os custos do artefato.

Exemplos de temas para trabalhos futuros baseados no presente trabalho incluem:

- Elaborar alguma forma de considerar o estado mental do usuário antes e depois das rotinas de treino do sistema BCI e dos testes do artefato completo.
- Aplicar os testes a um conjunto de pessoas ao invés de limitá-lo ao autor, de modo a validar seguramente os resultados obtidos.
- Utilizar outros tipos de robô como o exemplo de Veículos Aéreos Não-Tripulados(VANTs), ou até mesmo outros VTNTs mais robustos e profissionais.
- Alterar o sistema BCI para processar os dados brutos de EEG ao invés dos já processados pela *Emotiv Platform*, permitindo a aplicação de paradigmas de extração de significado das ondas cerebrais mais próximas do estado da arte como *Event Related Potentials*(ERP) em destaque os potenciais P300 e os *Steady State Visual Evoked Potentials*(SSVEP), *Motor Imagery*(MI) em destaque o *Sensory Motor Rythms*(SMR) entre outros paradigmas que podem ser úteis para melhorar o desempenho e acurácia de detecção da intenção do usuário pelo sistema BCI.
- Uso de outras formas de integração entre sistema BCI e VTNT ao invés do uso do protocolo MQTT com *broker* hospedado na nuvem, a exemplo do *Robot Operating System 2* (ROS 2) que com o uso de computadores *Raspberry Pi* permite a conexão direta entre o computador embarcado e o SDK da *Emotiv*.
- Uso de outros *headsets* EEG para aferir os comandos mentais.

Em conclusão, o presente trabalho cumpriu com os objetivos definidos, provando como verdadeira a tese levantada de que é possível desenvolver uma BRI utilizando apenas ferramentas de baixo custo ou já utilizadas no contexto das pesquisas já desenvolvidas na UFPB. Apesar do sucesso em responder o problema de pesquisa, o artefato desenvolvido de acordo com a DSRM apresentou algumas falhas em seu projeto e funcionamento, tendo como causas primeiras as limitações de tempo de desenvolvimento reduzido e universo limitado de técnicas e ferramentas a serem utilizadas, que geraram também as dificuldades enfrentadas durante o desenvolvimento do artefato. Ao remover tais limitações, abre-se espaço para diversas possibilidades de trabalhos futuros a serem construídos em cima deste.

REFERÊNCIAS

- [1] DE LIMA, Nadja. **Fundamentos da IHC**: um estudo da evolução das interfaces de interação e suas perspectivas para o futuro. 2021. p.62. Ciência da Computação. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Informática, 2021.
- [2] LOTTE, Fabien; NAM, Chang S.; NIJHOLT, Anton. Introduction: Evolution of Brain–Computer Interfaces. In: BETHLEM, N. Brain-Computer Interfaces Handbook: Technological & Theoretical Advances. 1. ed. Boca Ranton: CRC Press, 2018. cap. 1, p. 1-8. ISBN 978-1-4987-7343-0.
- [3] Kamiya, J. Conscious control of brain waves. **Psychology Today**, 1968, vol.1, p.56–60.
- [4] Vidal, J. J. Toward direct brain–computer communication. **Annual Review of Biophysics and Bioengineering**, 1973, vol.2, p.157–180.
- [5] Sellers, E. W., Ryan, D. B., Hauser, C. K. Noninvasive brain-computer interface enables communication after brainstem stroke. *Science Translational Medicine*, 6, 257re7, outubro 2014
- [6] Nijholt, Anton. **Brain Art**: Brain-Computer Interfaces for Artistic Expression. Cham: Springer, 2019.
- [7] Vasiljevic, G. A. M., Miranda, L. C. The CoDIS Taxonomy for Brain-Computer Interface Games Controlled by Electroencephalography. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 0, p.1-28, Maio 2023.
- [8] Cavalcanti, M., Melo, F., Silva, T., Falcão, M., de Queiroz Cavalcanti, D., Becker, V. (2023). Incorporating Eye Tracking into an EEG-Based Brainwave Visualization System. In: Kurosu, M., Hashizume, A. (eds) *Human-Computer Interaction, HCII, 25ed*, Copenhagen. **proceedings of the Human Computer Interaction thematic area**. Springer Nature: Springer, Cham—, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35596-7_25
- [9] Da Silva, T., Cavalcanti, T., Melo, F., Marinho, I., de Queiroz Cavalcanti, D., Becker, V. 2022. Visualization of brainwaves using EEG to map emotions with eye tracking to identify attention in audiovisual workpieces. In *Webmedia '22: Brazilian Symposium on Multimedia and the Web, 28ed*, Curitiba. **Proceedings of the Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia '22)**. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 381–389. <https://doi.org/10.1145/3539637.3557055>

- [10] Pinon, A., Da Silva, T. **NEUROMARKETING E EEG**. In: Becker, V. Macedo, J. (Org.). Handbook de pesquisas em interação e mídia - Perspectivas sobre o estado da arte. João Pessoa: Editora UFPB, 2023.
- [11] Qviro. Autonomous Guided Vehicles in Manufacturing. Qviro BV, 2023. Disponível em: <https://qviro.com/blog/autonomous-guided-vehicles-manufacturing/>, Acesso em: 17 de maio de 2024
- [12] WOLPAW, Jonathan R. Chapter 6 - Brain-computer interfaces. In: Barnes, Michael P., Good, David C. Handbook of Clinical Neurology. Amsterdam: Elsevier, 2013. 67-74.
- [13] WOLPAW, Jonathan R.; WOLPAW, Elizabeth W. Brain-Computer Interfaces: Something New under the Sun. In: WOLPAW, Jonathan R.; WOLPAW, Elizabeth W. Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice. Nova Iorque: Oxford University Press, 2012. p.3-12
- [14] NAM, Chang; NIJHOLT, Anton; LOTTE, Fabien. **Brain-Computer Interfaces Handbook: Technological and Theoretical Advances**. 1ªed. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [15] WETA. Brain Imaging: What Are the Different Types?. Brainline, 2021. Disponível em: <https://www.brainline.org/slideshow/brain-imaging-what-are-different-types>, Acesso em: 15 de novembro de 2023.
- [16] Britton Jeffrey W. *et al.* **Electroencephalography (EEG): An Introductory Text and Atlas of Normal and Abnormal Findings in Adults, Children, and Infants**. Chicago: American Epilepsy Society, 2016.
- [17] Charismatic Planet. The Electroencephalogram – 1924. Charismatic Planet, 2020. Disponível em: <https://charismaticplanet.com/the-electroencephalogram-1924/>, Acesso em: 17 de maio de 2024
- [18] BERGER, H., Ueber das Elektroenkephalogramm des Menschen. **Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten**, 87, 527-570, dezembro de 1929.
- [19] SEECK, M. et al. The standardized EEG electrode array of the IFCN. **Clinical Neurophysiology**, Holanda, vol. 128, 2070-2077, outubro de 2017.
- [20] TSMi. What Is the 10-20 System for EEG?. **TSMi**, 2022. Disponível em: <https://info.tmsi.com/blog/the-10-20-system-for-eeeg>, Acesso em: 15 de novembro de 2023.

- [21] NUWER, M. R. 10-10 electrode system for EEG recording. *Clinical Neurophysiology*, Holanda, vol.129, p.1103, maio de 2018.
- [22] OOSTENVELD, R.; PRAAMSTRA, P. The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements. **Clinical Neurophysiology**, Holanda, vol.112, p.713-719, abril de 2001.
- [23] BASAR E. Brain oscillations in neuropsychiatric disease. **Dialogues Clinical Neuroscience**, vol.15, p.291-300, setembro de 2013.
- [24] FARNSWORTH, B. EEG (Electroencephalography): The Complete Pocket Guide. iMotions, 2024. Disponível em: <https://imotions.com/blog/learning/best-practice/eeeg/>, Acesso em: 17 de maio de 2024.
- [25] BUZSÁKY, G. **Rhythms of the Brain**. Nova Iorque: Oxford University Press, 2006.
- [26] NeuroSky. Multi-Channel EEG (BCI) Devices. NeuroSky, 2015. Disponível em: <https://neurosky.com/2015/07/multi-channel-eeeg-bci-devices/>, Acesso em: 16 de novembro de 2023.
- [27] Intel. What Is Bluetooth® Technology? Intel Corporation, s.d. Disponível em: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/wireless/what-is-bluetooth.html>. Acesso em: 8 de maio de 2024.
- [28] M. Sampaio, A. L. G. Modesto, E. G. de Almeida Sobrinho, J. F. Almeida and O. A. Chase, "SELVABOT-1: Embedded Control System Using Bluetooth Technology," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 8, pp. 1404-1409, Dec. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2014.7014507>.
- [29] Cravo, E. Motor de corrente contínua: o que é, como funciona e vantagens. Grupo Kalatech, 2024. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/motor-corrente-continua/>, Acesso em: 8 de maio de 2024
- [30] Robocraze. What is Motor Driver. TIF Labs Pvt. Ltd., 2023 Disponível em: <https://robocraze.com/blogs/post/what-is-motor-driver>. Acesso em: 8 de maio de 2024
- [31] Alves, P. Ponte H – O que é e como funciona!. Manual da Eletrônica, s.d. Disponível em: <https://www.manualdaeletronica.com.br/ponte-h-o-que-e-como-funciona/>, Acesso em: 8 de maio de 2024.
- [32] Graves, S. Code Size vs. Memory Footprint. Circuit Cellar, 2020. Disponível em: <https://circuitcellar.com/research-design-hub/code-size-vs-memory-footprint/>. Acesso em: 8 de maio de 2024.

- [33] Oasis. MQTT Version 3.1.1 Plus Errata 01. Oasis, 2015 Disponível em: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html>. Acesso em: 8 de maio de 2024.
- [34] MQTT.org. MQTT: The Standard for IoT Messaging. MQTT.org, 2022. Disponível em: <https://mqtt.org/>. Acesso em: 8 de maio de 2024.
- [35] Cope, S. How MQTT Works -Beginners Guide. Steve's internet Guide, 2021. Disponível em: <http://www.steves-internet-guide.com/mqtt-works/>. Acesso em: 8 de maio de 2024
- [36] MDN. Callback function. Mozilla Corporation, s.d. Disponível em: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/Callback_function. Acesso em: 10 de maio de 2024
- [37] Upadhyay, J. What is a PWM signal? CircuitBread, 2022. Disponível em: <https://www.circuitbread.com/ee-faq/what-is-a-pwm-signal>. Acesso em: 11 de maio de 2024.
- [38] S. E. Kremenski, A. K. Lekova, "Brain-robot Communications in the Internet of Things,"2022 International Conference on Information Technologies (InfoTech), Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1-6, doi: <https://10.1109/InfoTech55606.2022.9897117>.
- [39] M. Alseddiqi, M. Almahmood, U. Baroudi, A. Alzaydi. "Controlling Wheelchair Using EEG Signal and Machine Learning,"2023 20th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Mahdia, Tunisia, 2023, pp. 898-905, doi: <https://10.1109/SSD58187.2023.10411202>.
- [40] T. J. C. Limchesing, A. J. P. Vidad, F. E. T. Munsayac, N. T. Bugtai, R. G. Baldovino, "Application of EEG Device and BCI for the Brain-controlled Automated Wheelchair,"2021 IEEE 13th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), Manila, Philippines, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/HNICEM54116.2021.9731931.
- [41] X. Lian et al., "A Robot Control Method based on Motor Imagery EEG Signals,"2023 5th International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT), Changzhou, China, 2023, pp. 321-325, doi: 10.1109/ISRIMT59937.2023.10428208.
- [42] I. MARIN, M. J. H. AL-BATTBOOTTI and N. GOGA, "Drone Control based on Mental Commands and Facial Expressions,"2020 12th International Conference

- on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Bucharest, Romania, 2020, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.1109/ECAI50035.2020.9223246>.
- [43] I. N. Zamora, D. S. Benítez, M. S. Navarro, "On the Use of the EMOTIV Cortex API to Control a Robotic Arm Using Raw EEG Signals Acquired from the EMOTIV Insight NeuroHeadset," 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), Valparaíso, Chile, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CHILECON47746.2019.8987541.
- [44] PIMENTEL, M., FILIPPO, D., SANTORO, F. M. Design Science Research: fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação. In: JAQUES, P. A., PIMENTEL, M., SIQUEIRA S., BITTENCOURT, Ig. (Org.) Metodologia de Pesquisa Científica em Informática na Educação: Concepção de Pesquisa. Porto Alegre: SBC, 2020. (Série Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação, v. 1) Disponível em: <<https://metodologia.ceie-br.org/livro-1/>>.
- [45] Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., Chatterjee, S. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. **Journal of Management Information Systems**, 24(3), 45–77. (2007) <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>
- [46] Neuroelectrics. Neuroelectrics Frequently Asked Questions (FAQs). Neuroelectrics, 2020. Disponível em: [https://www.neuroelectrics.com/wiki/index.php/Neuroelectrics_Frequently_Asked_Questions_\(FAQs\)](https://www.neuroelectrics.com/wiki/index.php/Neuroelectrics_Frequently_Asked_Questions_(FAQs)). Acesso em: 12 de novembro de 2023.
- [47] Emotiv. What is the sampling rate for the INSIGHT and why has it been designed this way? Emotiv, s.d. Disponível em: <https://20218267.hs-sites.com/knowledge/what-is-the-sampling-rate-for-the-insight-and-why-has-it-been-designed-this-way>. Acesso em: 16 de maio de 2024.
- [48] Emotiv. Emotiv BCI. Emotiv, 2023. Disponível em: <https://emotiv.gitbook.io/emotivbci/>, Acesso em: 13 de novembro de 2023.
- [49] Emotiv. Cortex API. Emotiv, 2023. Disponível em: <https://emotiv.gitbook.io/cortex-api/>, Acesso em: 13 de novembro de 2023.
- [50] Emotiv. cortex-example. Emotiv, 2023. Disponível em: <https://github.com/Emotiv/cortex-example/tree/master>, Acesso em: 01 de maio de 2024.
- [51] Emotiv. emotiv-bci. Emotiv, s.d. Disponível em: <https://www.emotiv.com/products/emotiv-bci>. Acesso em: 11 de maio de 2024.

- [52] Stager, A., Tanner, H.G., Sparks, E. **Design and Construction of Unmanned Ground Vehicles for Sub-canopy Plant Phenotyping**. In: Lorence, A., Medina Jimenez, K. (eds) High-Throughput Plant Phenotyping. Methods in Molecular Biology, vol 2539. Humana, 2022. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2537-8_16
- [53] Barboza, E., **Desenvolvimento de um carro programado por aplicativo para ensino de programação para crianças e jovens**. TCC (Bacharelado em ciência e tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semiárido. Mossoró, p.10. 2023
- [54] lakshyajhalani56. L298n Motor driver Arduino — Motors — Motor Driver — L298n. Disponível em: <https://projecthub.arduino.cc/lakshyajhalani56/l298n-motor-driver-arduino-motors-motor-driver-l298n-7e1b3b>. Acesso em: 7 de maio de 2024.
- [55] DatasheetCafe. KIA7805A Datasheet PDF — 5V, Voltage Regulator — KEC. Disponível em: <https://www.datasheetcafe.com/kia7805a-5v-voltage-regulator/>. Acesso em: 7 de maio de 2024
- [56] HiveMQ. HiveMQ MQTT Platform Overview. HiveMQ, s.d. Disponível em: <https://www.hivemq.com/products/hivemq-platform/>, Acesso em: 11 de maio de 2024
- [57] PyPi. certifi 2021.10.8. PyPi, 2021. Disponível em: <https://pypi.org/project/certifi/2021.10.8/>. Acesso em: 11 de maio de 2024.
- [58] PyPi. paho-mqtt 2.1.0. PyPi, 2024. Disponível em: <https://pypi.org/project/paho-mqtt/2.1.0/>. Acesso em: 11 de maio de 2024.
- [59] Python Software Foundation. threading — Thread-based parallelism. Python Software Foundation, s.d. Disponível em: <https://docs.python.org/3/library/threading.html>. Acesso em: 11 de maio de 2024.
- [60] Leary, N.O. PubSubClient. Arduino, s.d. Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/pubsubclient/>. Acesso em: 11 de maio de 2024
- [61] Emotiv. Overview of API flow. Emotiv, 2024. Disponível em: <https://emotiv.gitbook.io/cortex-api/overview-of-api-flow>, Acesso em: 06 de maio de 2024.
- [62] Emotiv. BCI. Emotiv, 2024. Disponível em: <https://emotiv.gitbook.io/cortex-api/bci>, Acesso em: 06 de maio de 2024
- [63] Marinho, I.N. BRI. GitHub, 2024. Disponível em: <https://github.com/Isaac-CI/BRI>. Acesso em: 11 de maio de 2024.