



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CLARICE DA COSTA CORRÊA

EVOLUÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO DE ESTIMULAÇÃO GALVÂNICA
APLICADO À TÉCNICA TERAPÊUTICA PARA ALIVIAR SINTOMAS DE
DESEQUILÍBRIO NO CORPO HUMANO

FORTALEZA

2024

CLARICE DA COSTA CORRÊA

EVOLUÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO DE ESTIMULAÇÃO GALVÂNICA
APLICADO À TÉCNICA TERAPÊUTICA PARA ALIVIAR SINTOMAS DE
DESEQUILÍBRIO NO CORPO HUMANO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologias da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado
Sampaio

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C841e Corrêa, Clarice da Costa.
Evolução de um sistema embarcado de estimulação galvânica aplicado à técnica terapêutica para aliviar sintomas de desequilíbrio no corpo humano / Clarice da Costa Corrêa. – 2024.
38 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.
1. Enjôo de movimento. 2. Estimulação vestibular galvânica. 3. Equilíbrio. 4. M5Core2. I. Título.
CDD 621.3
-

CLARICE DA COSTA CORRÊA

EVOLUÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO DE ESTIMULAÇÃO GALVÂNICA
APLICADO À TÉCNICA TERAPÊUTICA PARA ALIVIAR SINTOMAS DE
DESEQUILÍBRIO NO CORPO HUMANO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologias da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Ruth Pastôra Saraiva Leão
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, que, apesar de sua juventude, sempre foi minha maior fonte de apoio, nunca me deixando faltar nada e constantemente me encorajando a perseguir meus sonhos com determinação. À minha família, por sempre acreditar em mim, me transmitindo a força e a coragem necessárias para enfrentar os desafios da graduação.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus por tornar tudo isso possível e à minha família por sempre me guiar em Sua presença desde meus primeiros anos.

Expresso minha gratidão ao sistema de ensino superior público do Brasil pela sua qualidade excepcional, acessibilidade gratuita e inclusividade, com a esperança de que um dia alcance até os cidadãos mais remotos.

Sou grato à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos e pela oportunidade de participar do programa BRAFITEC na École Publique d'Ingénieurs de Caen Centre de Recherche.

Sou profundamente grato à minha mãe, Alessandra, e a toda a minha família, especialmente Davi, Maria de Fátima, Patrícia, Assis e Assis Filho, pelo apoio incondicional nas minhas decisões e ao longo dessa jornada que é a graduação. Agradeço também as minhas amigas Ana Paula, Maria Anita e Jéssica, junto com aquelas que conheci na França, Marcela, Manuela, Laiane e Beatriz, por estarem comigo durante todos os momentos bons e desafiadores que vêm com a mudança para outro país.

Estendo meus agradecimentos a todos os meus professores da Universidade Federal do Ceará (UFC) e da École Publique d'Ingénieurs de Caen (ENSICAEN) por suas inestimáveis contribuições à sociedade e, mais especificamente, pelo profundo impacto em meu crescimento pessoal e profissional como engenheira. Agradecimento especial a Raimundo Furtado e Matthieu Denoual pela orientação e assistência durante meu tempo na universidade.

Por fim, sou grato a todos os membros do GREI (Grupo de Redes Inteligentes) da UFC por acreditarem na minha capacidade e me permitirem desenvolver não apenas habilidades de pesquisa, mas também aprendizados que levarei para a vida toda.

“How lucky I am to have something that makes
saying goodbye so hard”

(Winnie-the-Pooh)

RESUMO

O enjôo de movimento é uma condição fisiológica comum que ocorre quando o cérebro recebe sinais contraditórios de diferentes sistemas sensoriais, como o sistema vestibular (localizado no ouvido interno) e os olhos. Essas inconsistências entre os sinais de movimento e equilíbrio levam a sintomas como náusea, tontura e desconforto. A Estimulação Vestibular Galvânica (EVG) é uma técnica terapêutica que utiliza estimulação elétrica para auxiliar no processo de reabilitação. A EVG tem se mostrado eficaz não apenas no alívio dos sintomas do enjoo de movimento, mas também na melhoria do humor, da qualidade de vida e das habilidades cognitivas de pacientes com distúrbios de equilíbrio e doenças como o Parkinson. O objetivo deste trabalho é apresentar os avanços no desenvolvimento de um módulo de EVG, aprimorando o dispositivo para torná-lo mais eficiente e prático para uso no dia a dia. A pesquisa incluiu o estudo das versões anteriores do dispositivo e a implementação de novas soluções tecnológicas. Um aspecto central dessa etapa de desenvolvimento foi a utilização da placa IoT M5Core2, equipada com o microcontrolador ESP32, que oferece grande versatilidade para aplicações diversas, especialmente na área de saúde. Além disso, foi desenvolvido um software de controle, programado utilizando a plataforma Arduino e bibliotecas específicas da placa, que permite o gerenciamento eficiente da interface e das funções do dispositivo. O novo módulo, agora mais autônomo e fácil de integrar à rotina dos pacientes, visa aumentar a independência dos usuários, minimizando os efeitos do enjoo de movimento e outros distúrbios de equilíbrio. Entre os avanços, destaca-se a melhoria na autonomia da bateria e a proposta futura de incluir conectividade Wi-Fi, permitindo que o dispositivo tenha uma maior usabilidade e independência. Os testes realizados, tanto por simulação quanto em indivíduos, demonstraram resultados promissores, consolidando esta nova versão como uma contribuição significativa em relação aos modelos anteriores.

Palavras-chave: Enjôo de movimento. Estimulação vestibular galvânica. Equilíbrio. M5Core2.

ABSTRACT

Motion sickness is a common physiological condition that occurs when the brain receives contradictory signals from different sensory systems, such as the vestibular system (located in the inner ear) and the eyes. These inconsistencies between movement and balance signals lead to symptoms such as nausea, dizziness and discomfort. EVG is a therapeutic technique that uses electrical stimulation to assist in the rehabilitation process. EVG has been shown to be effective not only in relieving the symptoms of motion sickness, but also in improving the mood, quality of life and cognitive abilities of patients with balance disorders and diseases such as Parkinson's. The aim of this paper is to present advances in the development of an EVG module, improving the device to make it more efficient and practical for everyday use. The research included studying previous versions of the device and implementing new technological solutions. A central aspect of this stage of development was the use of the M5Core2 IoT board, equipped with the ESP32 microcontroller, which offers great versatility for diverse applications, especially in the health area. In addition, control software was developed, programmed using the Arduino platform and specific libraries from the IoT board, which enables efficient management of the device's interface and functions. The new module, now more autonomous and easier to integrate into patients' routines, aims to increase users' independence by minimizing the effects of motion sickness and other balance disorders. Among the advances, we highlight the improvement in battery life and the future proposal to include Wi-Fi connectivity, allowing the device to have greater usability and independence. The tests carried out, both by simulation and on individuals, have shown promising results, consolidating this new version as a significant contribution over previous models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ouvido interno: Canais Semicirculares e Vistas Transversais	16
Figura 2 – StimBox versão 1	20
Figura 3 – StimBox versão 1 - Indicação por LEDs	20
Figura 4 – StimBox versão 2	21
Figura 5 – StimBox versão 2 - Modos de estimulação	21
Figura 6 – Escopo das atividades	22
Figura 7 – Diagrama de blocos funcionais	23
Figura 8 – Portas funcionais MBus	24
Figura 9 – Esquema eletrônico	25
Figura 10 – Placa eletrônica 3D - Vista superior	26
Figura 11 – Placa eletrônica 3D - Vista inferior	27
Figura 12 – Diagrama de blocos - Código-fonte	29
Figura 13 – Tela LCD M5Core2	31
Figura 14 – StimBoxV3 finalizada	32
Figura 15 – Teste inicial	33
Figura 16 – Teste com Ssaw;A1200;P600	34
Figura 17 – Teste com Sc;A1200;P600	34
Figura 18 – Teste com indivíduo	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as versões da StimBox	36
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico - Digital
AWS	Amazon Web Services
CHU	Centro Hospitalar Universitário de Caen
DAC	Conversor Digital - Analógico
EVG	Estimulação Vestibular Galvânica
GREYC	Laboratório de investigação em ciências digitais
IoT	Internet das Coisas
NBI	Neural Balance Innovation
NIDCD	National Institute on Deafness and Other Communication Disorders

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	Amplitude do sinal
<i>E</i>	Autorização para envio do sinal
<i>I</i>	Corrente elétrica
<i>P</i>	Período do sinal
<i>R</i>	Resistência
<i>S</i>	Tipo do sinal a ser enviado
<i>V</i>	Tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivo	17
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	ANÁLISE DAS VERSÕES ANTERIORES	19
2.1	StimBox versão 1	19
2.2	StimBox versão 2	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	Definição do escopo das atividades	22
3.2	Utilização da placa de IoT M5Core2 para Amazon Web Services (AWS)	23
3.3	Fabricação da placa elétrica	24
3.4	Desenvolvimento do Código-fonte	27
4	RESULTADOS	32
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	37
	REFERÊNCIAS	38
	APÊNDICES	39
	APÊNDICE A – Lista de sinais - StimBox	39

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

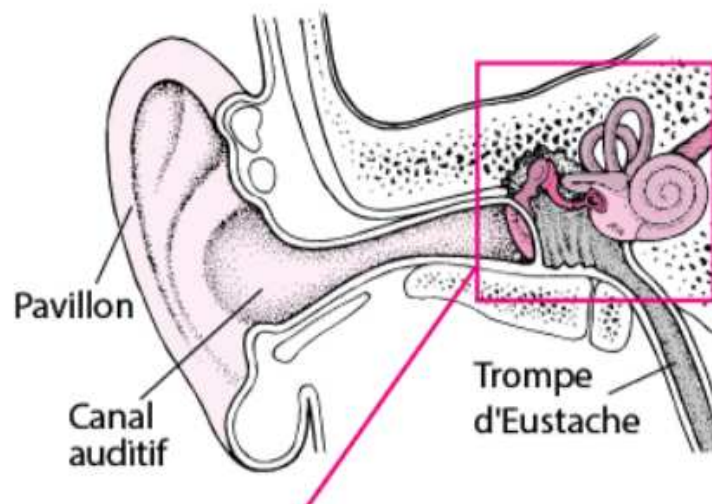
Nos últimos anos o grupo de pesquisa Laboratório de investigação em ciências digitais (GREYC) e a empresa Neural Balance Innovation (NBI) vem desenvolvendo uma pesquisa focada na melhoria de um módulo de EVG, especificamente para o sistema vestibular (um órgão sensorial localizado no ouvido interno, vide Figura 1a), como estratégia terapêutica para tratar ou aliviar distúrbios como tontura, enjoo, distúrbios do sono e ansiedade (NIDCD, 2018).

O ouvido interno é uma estrutura complexa, preenchida por fluido, que desempenha um papel crucial tanto na audição quanto no equilíbrio. Segundo Hamiter (2023), tal órgão é composto por duas partes principais: a cóclea, responsável pela audição, e o sistema vestibular, que é responsável pelo equilíbrio. O sistema vestibular inclui o sáculo, o utrículo e três canais semicirculares, como podemos observar nas Figuras 1b e 1c. Essas estruturas atuam em conjunto para ajudar o cérebro a detectar movimentos e a orientação da cabeça, mantendo o equilíbrio e a orientação espacial. Os canais semicirculares detectam movimentos rotacionais, enquanto o sáculo e o utrículo percebem acelerações lineares e a posição da cabeça em relação à gravidade (HAMITER, 2023).

Dada a relevância dessa técnica, foi realizada uma revisão acadêmica que aborda as diversas aplicações da EVG, compilando pesquisas recentes que exploram sua eficácia em diferentes contextos. A revisão identificou que a EVG tem sido aplicada com sucesso em diversas áreas da saúde, como no estudo realizado por (CARVALHO *et al.*, 2019), que buscou, por meio de testes realizados em idosos a partir de 65 anos e jovens adultos de 18 anos, identificar precocemente os fatores de risco associados à instabilidade postural em idosos. Ainda em busca de outras fontes de revisão, é possível observar que, em (OLIVEIRA *et al.*, 2023), a utilização da EVG em pacientes idosos, com mais de 65 anos e diagnosticados com Parkinson, apresentou resultados positivos no aprimoramento da função executiva e de atenção, impactando diretamente na qualidade de vida dos pacientes.

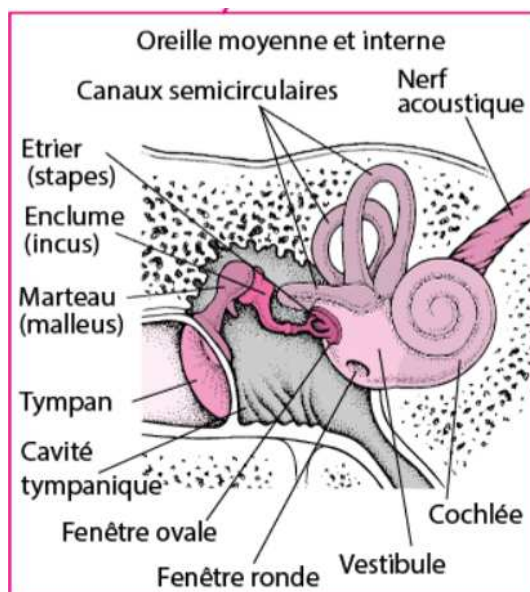
Com base nesses estudos, este trabalho busca expandir a aplicação da EVG com o desenvolvimento de um módulo autônomo, visando facilitar seu uso contínuo no tratamento de distúrbios de equilíbrio. O foco está em proporcionar maior autonomia e praticidade aos usuários no cotidiano, permitindo que a EVG seja utilizada de forma mais acessível e eficiente.

Figura 1 – Ouvido interno: Canais Semicirculares e Vistas Transversais
 (a) Ouvido interno: Canais Semicirculares



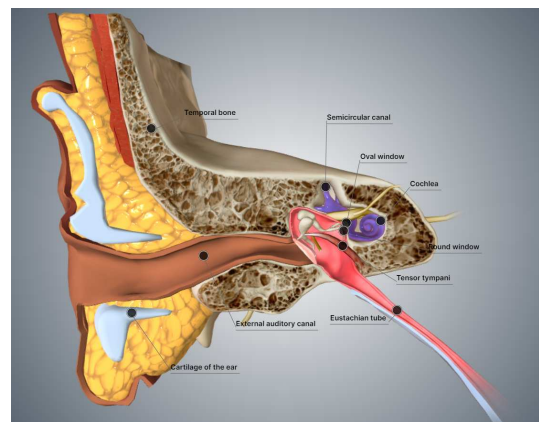
Fonte: HAMITER (2023).

(b) Ouvido interno: Canal Vestibular



Fonte: HAMITER (2023).

(c) Ouvido interno: Vista transversal em 3D



Fonte: HAMITER (2023).

Segundo a organização National Institute on Deafness and Other Communication Disorders (NIDCD), "cerca de 15% dos adultos estadunidenses (33 milhões) tiveram um problema de equilíbrio ou tontura em 2008"(NIDCD, 2018). Isso justifica a relevância do desenvolvimento de um módulo de estimulação galvânica, capaz de enviar sinais corretivos ao paciente para anular o problema de equilíbrio, garantindo assim uma melhor qualidade de vida às pessoas acometidas por essa condição. A EVG consiste em uma técnica não invasiva que utiliza correntes elétricas de baixa intensidade aplicadas na região mastoide, próxima ao ouvido, para estimular o

sistema vestibular — responsável pelo controle do equilíbrio e orientação espacial. Essa técnica provoca alterações controladas no sistema vestibular, simulando sensações de movimento, o que pode ajudar a recalibrar as respostas do corpo a estímulos sensoriais e corrigir desordens no equilíbrio. O objetivo principal desta pesquisa foi o de criar um componente autônomo, utilizável no cotidiano do paciente, proporcionando a oportunidade de aplicar o conhecimento teórico obtido em sala de aula em um projeto em parceria com o Centro Hospitalar Universitário de Caen (CHU), integrando engenharia e medicina.

1.2 Objetivo

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma versão mais autônoma do dispositivo de estimulação galvânica, com foco em permitir que os usuários integrem o módulo às suas atividades cotidianas de forma prática e eficiente. A autonomia do dispositivo é um fator essencial, já que os pacientes que sofrem de distúrbios de equilíbrio precisam de um equipamento que funcione por longos períodos sem a necessidade de recargas frequentes ou intervenções técnicas.

Outro ponto crucial é o aprimoramento da usabilidade do dispositivo. O desenvolvimento de uma interface intuitiva permitirá que tanto os pacientes quanto os profissionais de saúde configurem os parâmetros de estimulação com facilidade, sem exigir conhecimento técnico avançado. A simplicidade no manuseio busca tornar o dispositivo acessível para diferentes perfis de usuários, garantindo uma experiência de uso fácil e eficiente no dia a dia.

Além disso, a pesquisa visa assegurar a confiabilidade na comunicação entre o dispositivo e os sistemas de controle. A integração de tecnologias sem fio, como Bluetooth, permitirá conectividade com smartphones e computadores, facilitando o monitoramento e ajustes remotos por parte dos profissionais de saúde. Ao mesmo tempo, busca-se expandir o campo de aplicação do dispositivo, adaptando-o para ser utilizado em diversos contextos clínicos, promovendo uma solução eficaz para o tratamento de distúrbios de equilíbrio, como o mal do transporte.

1.3 Estrutura do Trabalho

Nos capítulos a seguir, segue a apresentação de uma análise detalhada do processo de desenvolvimento, desde a revisão das versões anteriores do projeto até a implementação de novas soluções tecnológicas. O Capítulo 2 trata do estudo das versões anteriores do dispositivo,

desenvolvido em parceria com o grupo de pesquisa GREYC e a startup NBI, sendo descritas as funcionalidades dessas versões e suas limitações, servindo como base para o desenvolvimento da nova versão mais autônoma.

O Capítulo 3 detalha a metodologia empregada no desenvolvimento do módulo, incluindo a integração do microcontrolador M5Core2, a escolha dos componentes eletrônicos e o desenvolvimento do software de controle. Nesse capítulo também constam as soluções técnicas implementadas para aumentar a autonomia e usabilidade do dispositivo.

O Capítulo 4 traz uma discussão acerca dos testes realizados no laboratório para validar a funcionalidade do dispositivo, bem como os resultados preliminares obtidos durante as simulações e experimentos práticos, sendo apresentados os desafios enfrentados e as melhorias implementadas a partir destes resultados.

Por fim, no Capítulo 5, são levantadas propostas futuras de melhorias para o dispositivo, levando em consideração a necessidade de maior autonomia, conectividade e usabilidade, inclusive com discussões sobre as perspectivas para aplicação clínica do dispositivo e sua potencial utilização em tratamentos de distúrbios de equilíbrio.

2 ANÁLISE DAS VERSÕES ANTERIORES

Neste capítulo, foi realizado o estudo teórico das duas versões anteriores do projeto, ambas desenvolvidas por um dos pesquisadores do grupo GREYC para a empresa NBI.

A NBI é uma startup de Deeptech que tem como principal objetivo o desenvolvimento da STIMBOX, um dispositivo de estimulação sensorial não invasiva voltado para o tratamento de distúrbios do sistema vestibular. O projeto integra a expertise de especialistas franceses em neurociência, aliada à pesquisa acadêmica de ponta nas áreas de tecnologia de sensores e processamento de sinais, proporcionando uma solução inovadora para o equilíbrio corporal.

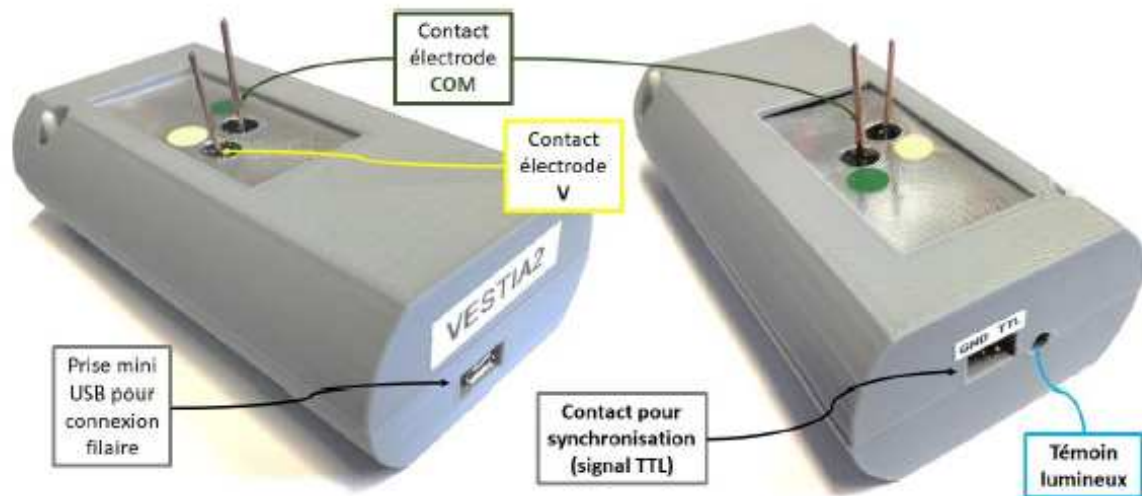
2.1 StimBox versão 1

A primeira versão do modelo foi desenvolvida por Matthieu Denoual, pesquisador do GREYC. Nessa versão, cada módulo foi projetado para controlar um par de eletrodos, o que significa que, para uma pessoa, eram necessárias duas caixas da StimBox V1. Essa versão podia ser alimentada tanto por uma conexão USB a um computador quanto por uma conexão USB a uma bateria externa. Além disso, a transferência de dados poderia ser realizada por dois métodos: uma conexão com fio, onde um terminal de comunicação era configurado, ou uma conexão sem fio via Bluetooth, com comandos sendo enviados para as caixas utilizando o terminal Tera Term.

A primeira versão do projeto é considerada volumosa já que necessita de dois módulos mostrados na Figura 2 para cada usuário. No entanto, a capacidade de alimentar o módulo sem depender de um computador e de enviar dados via Bluetooth demonstrou certa independência.

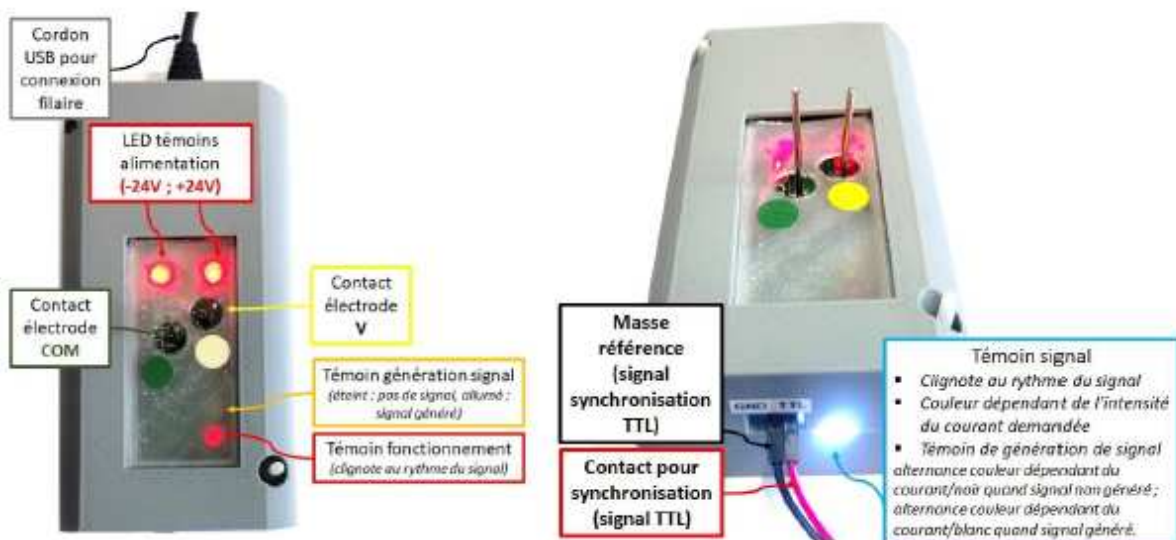
A StimBox V1 foi construída e começou a ser testada em março de 2022. Como mencionado, ela foi desenvolvida de modo que cada caixa fosse responsável por um par de eletrodos, com cada par conectado a uma orelha. Além disso, possui uma parte transparente que permite ao usuário visualizar os LEDs, os quais indicam se o sinal está sendo enviado, a amplificação (+/- 24V), a frequência e a amplitude do sinal enviado através dos eletrodos, como é possível observar na Figura 3.

Figura 2 – StimBox versão 1



Fonte: Elaborada por Matthieu Denoual.

Figura 3 – StimBox versão 1 - Indicação por LEDs



Fonte: Elaborada por Matthieu Denoual.

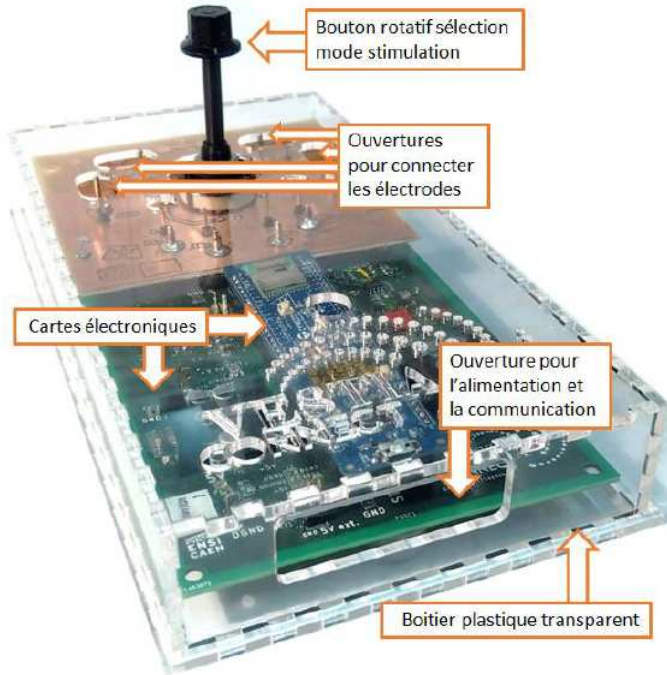
2.2 StimBox versão 2

Já na segunda versão, também desenvolvida por Matthieu Denoual, foram utilizados três circuitos elétricos para formar o sistema completo. Nessa versão, o usuário precisava selecionar o modo de estimulação, alimentar o dispositivo por meio de um conector USB e configurar o terminal de comunicação com o Tera Term antes de cada uso.

Essa versão, como presente na Figura 4, era relativamente grande, com circuitos individuais para cada eletrodo (direito e esquerdo), todos em um mesmo estojo transparente, que possuía um botão rotativo manual, vide Figura 5, para a determinação do eletrodo que irá receber

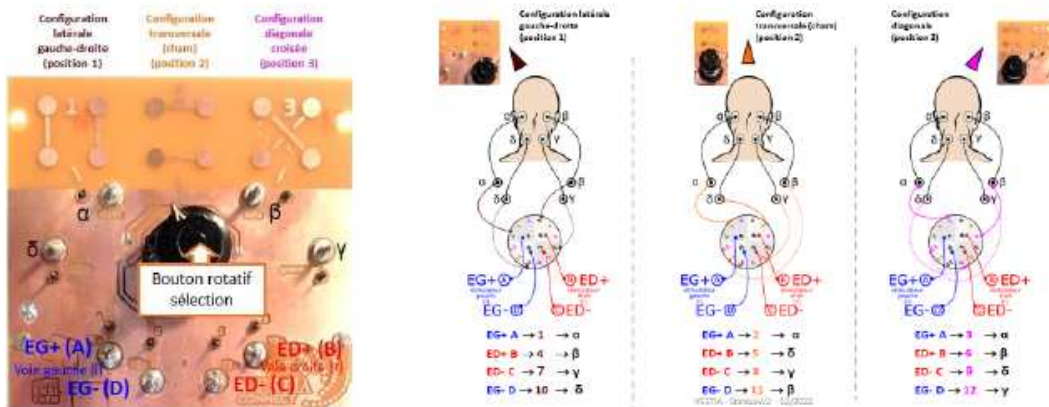
os comandos. Como essa versão requeria conexão a um computador e configuração a cada uso, ela apresentou desafios significativos para o uso diário, que era o principal objetivo do projeto. Consequentemente, tornou-se necessário desenvolver uma versão mais autônoma.

Figura 4 – StimBox versão 2



Fonte: Elaborada por Matthieu Denoual.

Figura 5 – StimBox versão 2 - Modos de estimulação



Fonte: Elaborada por Matthieu Denoual.

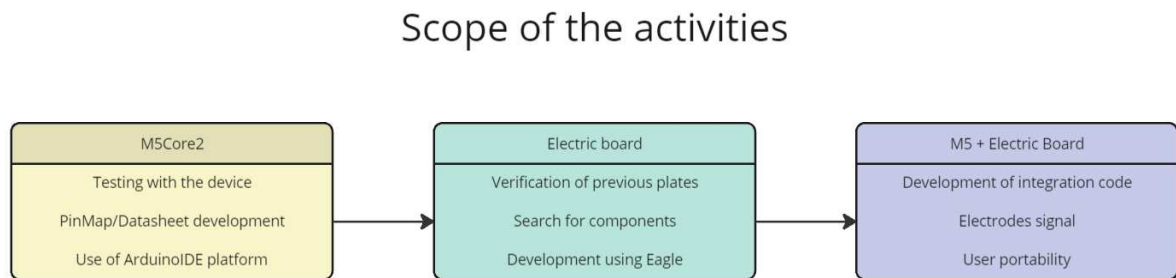
3 METODOLOGIA

3.1 Definição do escopo das atividades

Foi realizada uma análise abrangente do projeto, que envolveu o exame de aspectos-chave, como objetivos, recursos e o cronograma do projeto. O principal objetivo desta fase foi delinear cada etapa do projeto, garantindo uma abordagem clara e estruturada para o desenvolvimento.

Esse planejamento detalhado está representado na Figura 6, que descreve as atividades sequenciais e os marcos necessários para alcançar os objetivos do projeto.

Figura 6 – Escopo das atividades

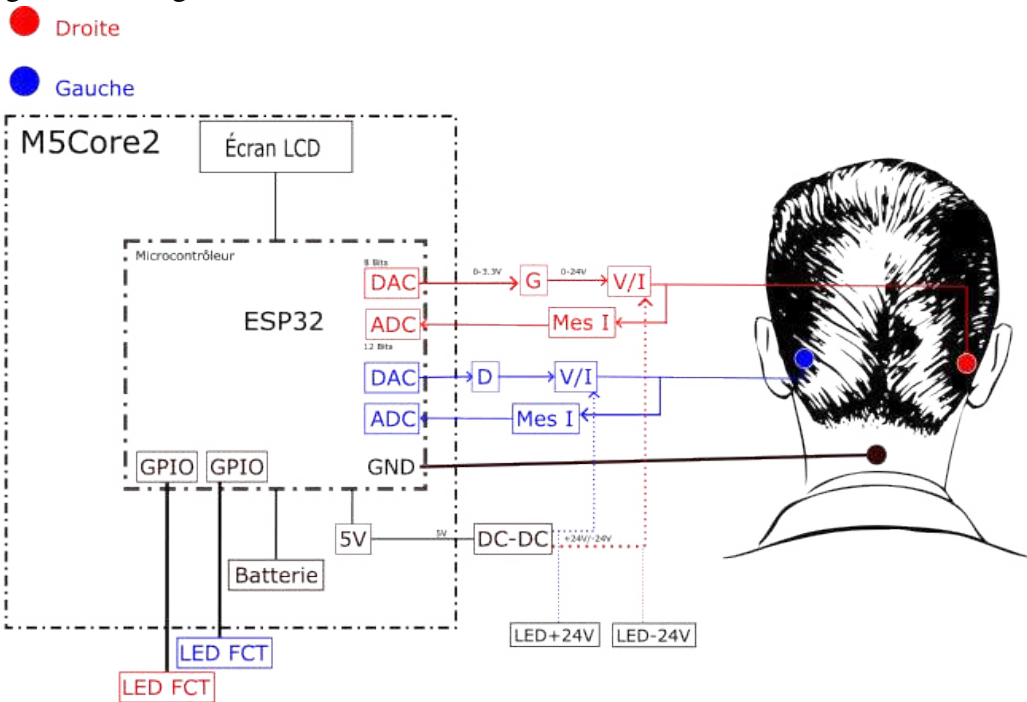


Fonte: Elaborada pelo autor.

Subsequentemente, foi desenvolvido um diagrama de blocos funcionais, conforme ilustrado na Figura 7, com o intuito de fornecer uma visão detalhada dos resultados esperados nas etapas subsequentes. Este diagrama serve como um modelo para a integração de diversos componentes e processos. Ele ilustra como o ESP32, presente no M5Core2, será utilizado, juntamente com funcionalidades adicionais que serão incorporadas à placa eletrônica. Essa visualização estruturada garante que cada aspecto técnico seja abordado de maneira metódica, desde a geração de sinais até a integração da interface com o usuário.

O diagrama de blocos funcionais não apenas descreve a arquitetura do sistema, mas também auxilia na identificação de possíveis desafios ainda na fase de design. Ao mapear as interações entre os diferentes módulos, é possível planejar de forma antecipada a resolução de problemas e a otimização, aumentando, assim, a eficiência do ciclo de desenvolvimento. Esses aspectos serão detalhados nas seções seguintes, onde serão abordadas as implementações técnicas específicas e os protocolos de teste empregados para alcançar os objetivos do projeto.

Figura 7 – Diagrama de blocos funcionais



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Utilização da placa de IoT M5Core2 para AWS

Para a familiarização com o M5Core2 para AWS foram realizados testes para entender suas limitações e possibilidades. Além disso, a documentação fornecida pelo fabricante (M5Stack,) não continha algumas informações necessárias, como quais portas estavam disponíveis para uso e modificação, e se múltiplos componentes compartilhavam uma mesma porta.

Portanto, foi necessário criar um mapa de pinos das conexões no conector integrado, conforme ilustrado na Figura 8.

Posteriormente, diversos testes foram realizados para obter um melhor entendimento do dispositivo, como a resolução do Conversor Analógico - Digital (ADC) e do Conversor Digital - Analógico (DAC). Os resultados estão listados abaixo:

- Resolução do DAC: 8 bits (256 valores possíveis);
- Resolução do ADC: 12 bits (4096 valores possíveis);
- Saída do MBus: Entre 0V e 3,3V;

Figura 8 – Portas funcionais MBus

GPIO Type	Analog Function	Mbus			Analog Function	GPIO Type
		GND	ADC	G35		
		GND	ADC	G36		
		GND	RST	EN	MCU_RST	
	Display and TF Card	G23	MOSI	DAC	G25	LED
	Display	G38	MISO	DAC	G26	
	Display and TF Card	G18	SCK	3.3V		
	USB2UART	G3	RXD0	TXD0	G1	USB2UART
		G13	RXD2	TXD2	G14	
	RTC to I2C	G21	insSDA	intSCL	G22	RTC to I2C
	Flag	G32	PA_SDA	PA_SCL	G33	Flag
	Enable/Disable	G27	GPIO	GPIO	G19	Enable/Disable
	SADTA SPK	G2	I2S_DOUT	I2_LRCK/PDM_CLK	G0	LRCK SPK
			NC	PDM_DAT	G34	ADC
			NC	5V		
			NC	BAT		

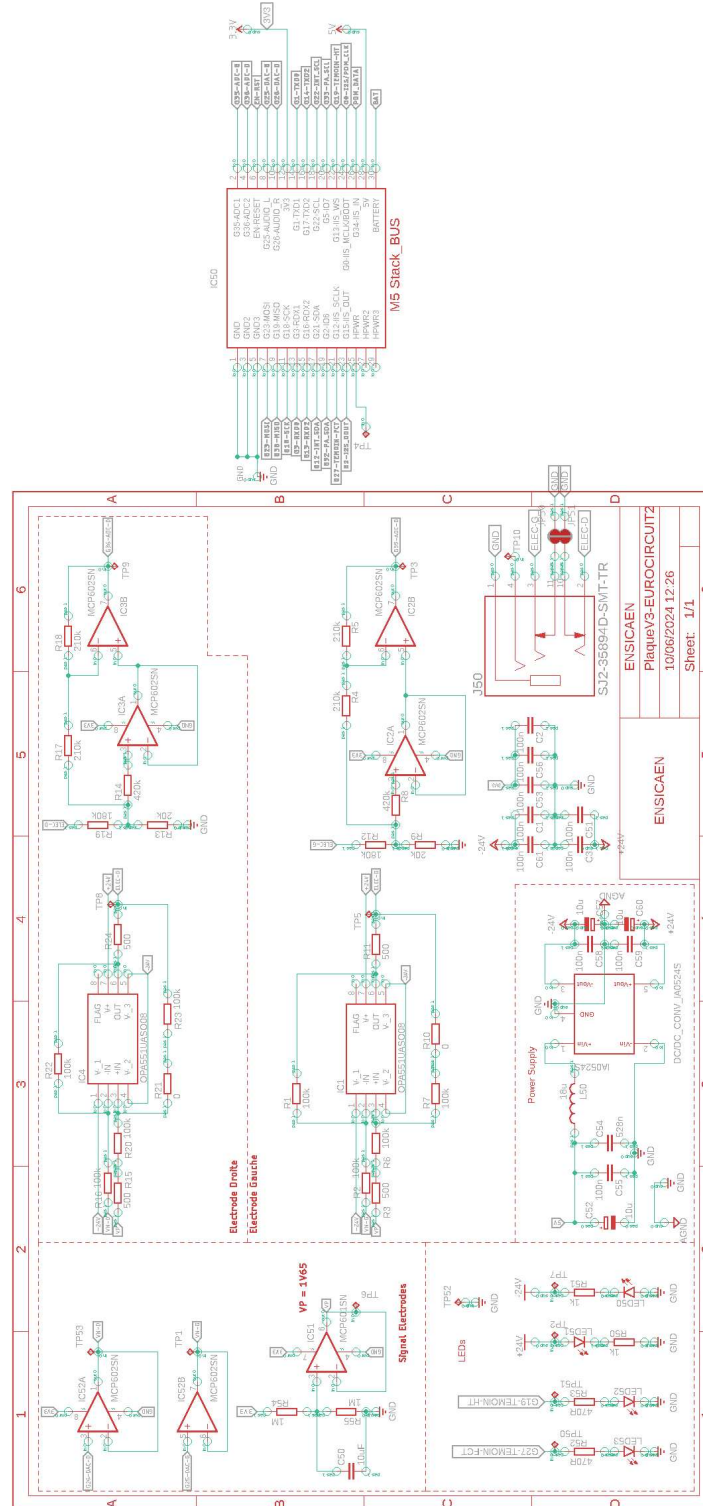
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Fabricação da placa elétrica

Durante essa fase, foi desenvolvida uma placa eletrônica utilizando o software Eagle (Autodesk Inc., 2023a). Para iniciar, estudei detalhadamente as placas eletrônicas dos modelos anteriores, analisando seus projetos e identificando áreas para melhorias. Com base nessa análise, realizei várias modificações em nosso novo modelo. O design atualizado inclui apenas três eletrodos (direito, esquerdo e comum) e será completamente controlado por um terminal. Essas modificações tiveram como objetivo simplificar o design, melhorar a funcionalidade e aprimorar a interface com o usuário.

Conforme mostrado na Figura 9, o circuito apresenta um "espelho", com os mesmos componentes para cada lado dos eletrodos. Uma das limitações durante o projeto do circuito foi a disponibilidade de portas no M5 para uso ou modificação, bem como a faixa de potência que o M5 é capaz de manipular. Em resumo, foi necessário trabalhar com saídas que variavam de 0 V a 3,3 V ou com saídas lineares de 3,3 V ou 5 V.

Figura 9 – Esquema eletrônico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos esquemas apresentados, segue uma breve explicação das etapas:

- Fonte de Alimentação: Esta parte é responsável por amplificar os 5 V fornecidos pelo M5 para ± 24 V, que serão utilizados para gerar o sinal destinado aos eletrodos.
- Sinal dos Eletrodos: Esta parte é responsável por criar o sinal que será enviado ao eletrodo

e também por centralizá-lo em 1,65 V, devido à faixa de potência do M5.

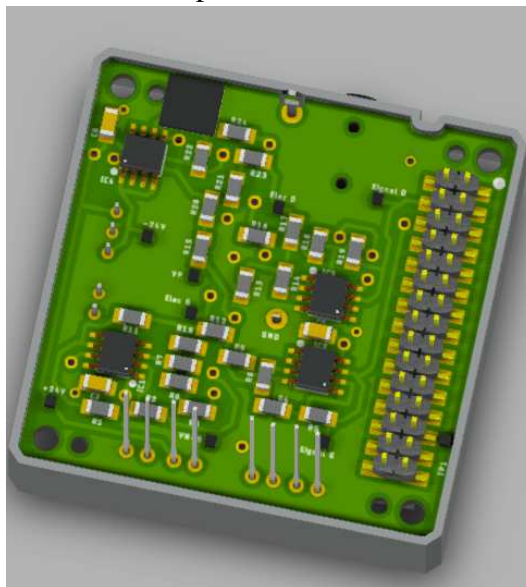
- Eletrodo Direito/Eletrodo Esquerdo: Esta parte é responsável por amplificar o sinal enviado pelo M5, utilizando uma fonte de Howland para gerar a corrente para o eletrodo, com uma redução no valor da tensão que será enviada de volta ao M5 para análise.

Optou-se por gerar a corrente utilizando uma Fonte de Howland devido à sua capacidade de gerar uma corrente constante. Algumas de suas características são a precisão e a estabilidade, razão pela qual utilizamos resistores com tolerância de 0,5% ou 0,1%. Com esse tipo de circuito, a saída é independente da resistência do corpo.

Foi fundamental conhecer o software para superar as complexidades do mesmo, garantindo que o novo design atendesse a todas as especificações técnicas e exigências operacionais. Ao longo desse processo, houve um foco na otimização do layout para facilitar a transmissão eficiente dos sinais e reduzir possíveis interferências. Esse esforço colaborativo resultou em um design de placa eletrônica refinado e robusto, pronto para ser integrado e testado no sistema StimBoxV3.

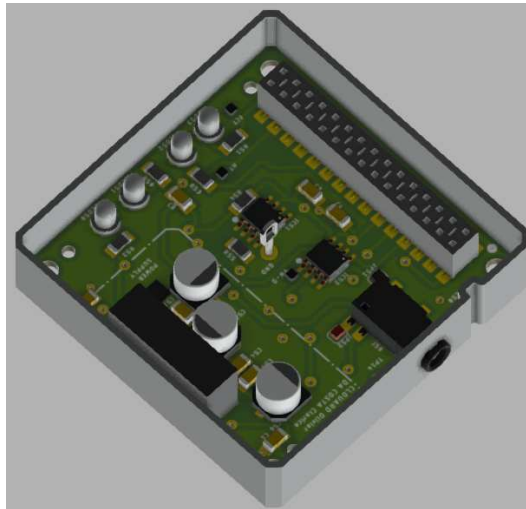
Depois que o esquema virtual foi finalizado, passamos para o estágio de roteamento usando um layout de dois lados com vias para conectar as camadas. Assim como nas versões anteriores o sistema conta com LEDs para indicar o funcionamento da placa. Foi possível criar um modelo 3D da placa eletrônica, vide Figuras 10 e 11, usando outro software da Autodesk, chamado Fusion 360 (Autodesk Inc., 2023b).

Figura 10 – Placa eletrônica 3D - Vista superior



Fonte: (Autodesk Inc., 2023b).

Figura 11 – Placa eletrônica 3D - Vista inferior



Fonte: (Autodesk Inc., 2023b).

3.4 Desenvolvimento do Código-fonte

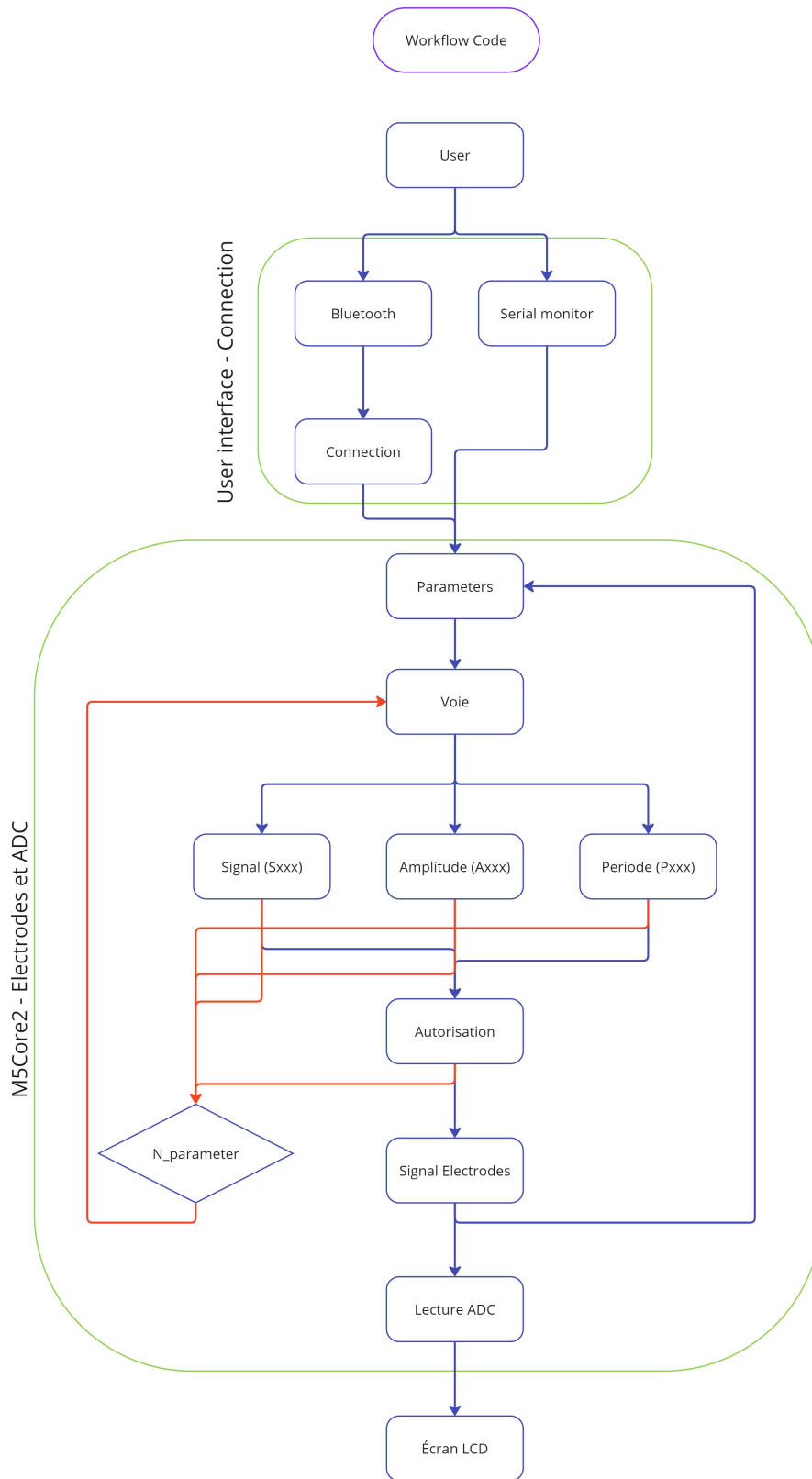
Nesta etapa, foi necessário desenvolver um código na plataforma Arduino (Arduino, 2023), utilizando-se tanto da biblioteca do Arduino quanto da biblioteca exclusiva fornecida pela fabricante M5 (M5Stack,) para a versão da placa de Internet das Coisas (IoT) utilizada, para, em seguida, exportá-lo para o M5Core2 e criar a StimBoxV3. Antes de iniciar essa fase, foi realizada uma análise dos códigos anteriores para garantir que o hardware pudesse receber comandos das diferentes plataformas utilizadas durante os testes das versões anteriores. Com base nessa análise, os parâmetros enviados pelo usuário terão o seguinte formato:

- Canal: Uma letra indicando o lado ou ambos; "l" para o lado esquerdo, "r" para o lado direito, e "b" para ambos.
- Amplitude: A primeira letra será "A" para indicar amplitude, seguida de um número que indicará o valor da corrente em μA ; por exemplo, A1000 se refere a $1000\mu A = 1mA$.
- Período: A primeira letra será "P" para indicar o período, seguida de um número que indicará o período em ms; por exemplo, P500 se refere a 500 ms.
- Tipo de Sinal: A primeira letra será "S" para indicar o tipo de sinal, seguida de uma ou mais letras especificando o tipo de sinal desejado pelo usuário; consultar a lista de sinais no Apêndice A.
- Autorização: A primeira letra será "E", seguida de "true" ou "false" para indicar se o sistema deve enviar o sinal para o eletrodo.

Com esses requisitos em mente, foi elaborado um diagrama de blocos do código,

como é possível observar na Figura 12, para servir como referência durante o processo de desenvolvimento.

Figura 12 – Diagrama de blocos - Código-fonte



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo o diagrama de blocos, iniciamos a definição do fluxo de trabalho, utilizando várias funções que seriam chamadas conforme necessário. Essa abordagem foi projetada para economizar espaço e tornar o programa mais compacto. Além disso, como o programa precisava gerar um sinal com temporização precisa, manter uma estrutura compacta garantiu que a saída estivesse dentro do esperado.

Para tornar o código utilizável e compacto, foi criada uma lista de valores que variam de 0 a 255, centrada em 126, devido às limitações do M5Core2. Essa lista é usada para gerar o sinal, e o valor de saída atual inserido pelo usuário é ajustado de acordo com a Lei de Ohm ($V = RI$). Durante a geração do sinal, os sinais de ruído branco¹ e ruído rosa² são os únicos tipos que utilizam funções específicas com valores gerados aleatoriamente. O usuário possui como escolha as formas de ondas senoidal, quadrada, triangular, dente de serra, ruído branco¹, ruído rosa² e contínuo.

Para controlar o período do sinal, foram utilizados dois dos quatro temporizadores disponíveis no ESP32, dentro do M5Core2. Esse arranjo permitiu que cada lado do eletrodo tivesse um temporizador individual capaz de gerar a forma de onda no tempo e tamanho especificados na lista de sinais. O valor de entrada do usuário, representando o período em milissegundos, foi convertido de milissegundos para microssegundos e, em seguida, dividido pelo tamanho de cada lista para determinar a taxa de chamada do temporizador com base no número de valores em cada lista. O ruído branco¹ terá valores aleatórios com densidade espectral de potência constante, enquanto o ruído rosa² apresenta energia igual por oitava, resultando em picos mais altos durante o período.

$$timer_{us} = \frac{periodo_{ms} * 1000}{size_list}$$

Para a amplitude, o código seguiu o valor inserido pelo usuário. Antes de enviar o valor para o DAC do respectivo lado, cada valor da lista foi multiplicado pela amplitude e limitado pelo valor máximo possível inserido pelo usuário (3300). O cálculo final adicionou 130 (equivalente a 1,65V) para garantir que o valor permanecesse centrado dentro da faixa.

$$DAC = 130 + \frac{(Value_list - 126.5) \times amplitude}{3300}$$

¹ O ruído branco é um tipo de sinal onde todas as frequências têm a mesma potência, resultando em uma distribuição de energia constante em todo o espectro auditivo.

² O ruído rosa é um sinal em que a densidade de potência diminui a uma taxa de 3 dB por oitava, o que significa que as frequências mais baixas têm mais potência que as frequências mais altas, produzindo um som mais equilibrado aos ouvidos humanos.

Esses processos foram continuamente verificados por meio de *flags* para garantir que a geração do sinal estivesse de acordo com os parâmetros corretos e determinar se o sinal deveria ser gerado.

Para a comunicação entre o M5Core2 e o usuário, foi utilizado uma comunicação serial, operável via conexão USB ou Bluetooth, permitindo conectividade com um computador ou smartphone.

Para melhorar a acessibilidade do usuário, foram implementados LEDs que piscam de acordo com o período do sinal gerado, um para cada lado, além de exibir os comandos enviados pelo usuário, formas de onda lidas pelo ADC e círculos iluminados representando a geração do sinal e a conexão Bluetooth na tela LCD do M5Core2, conforme a Figura 13.

Figura 13 – Tela LCD M5Core2



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS

Finalmente, foi possível obter a versão final da StimBoxV3, destacando a integração das diversas etapas de desenvolvimento no produto final como é possível observar na Figura 14. Serão abordados o processo completo que transformou a StimBoxV3 de um conceito inicial em um dispositivo totalmente funcional, incluindo uma visão detalhada das fases de design, construção e refinamento, além dos esforços colaborativos envolvidos.

Figura 14 – StimBoxV3 finalizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, esta seção apresentará os resultados dos testes iniciais conduzidos em laboratório, que foram cruciais para validar a funcionalidade e o desempenho do dispositivo. Esses testes prepararam o terreno para os ensaios clínicos subsequentes, fornecendo uma base para o desenvolvimento e a aplicação do dispositivo em contextos reais de saúde. O foco será em como cada etapa do desenvolvimento contribuiu para a robustez e confiabilidade da StimBoxV3, assegurando que o dispositivo atenda aos padrões necessários para dispositivos médicos.

A versão final apresenta um conector tipo jack, que permite a conexão de um sistema de eletrodos de três botões, ligando o dispositivo diretamente ao usuário. Esta versão é portátil e equipada com uma bateria que suporta 30 minutos de operação, permitindo que os pacientes a utilizem durante breves períodos de suas atividades diárias. Existe a possibilidade de estender a vida útil da bateria substituindo a bateria de íon-lítio de 500mAh do M5Core2.

Durante a parte final do projeto, foram realizados testes para garantir que os comandos fossem corretamente transmitidos aos eletrodos e à entrada do ADC. Abaixo estão os resultados desses testes:

Nos testes a seguir: C2 (verde) está conectado à saída do DAC, C1 (amarelo) ao eletrodo com uma resistência de $2,2k\Omega$, e C4 (roxo) à entrada do ADC.

O primeiro teste verificou se, ao ligar o M5Core2, todas as tensões estavam conforme o esperado. Para que o eletrodo registrasse $0[V]$, o DAC precisava ser ajustado para $1,65[V]$ para equilibrar o sinal com o VP, conforme ilustrado na Figura 9, indicando a inicialização correta e prontidão para as etapas subsequentes de teste, o que é possível verificar na Figura 15.

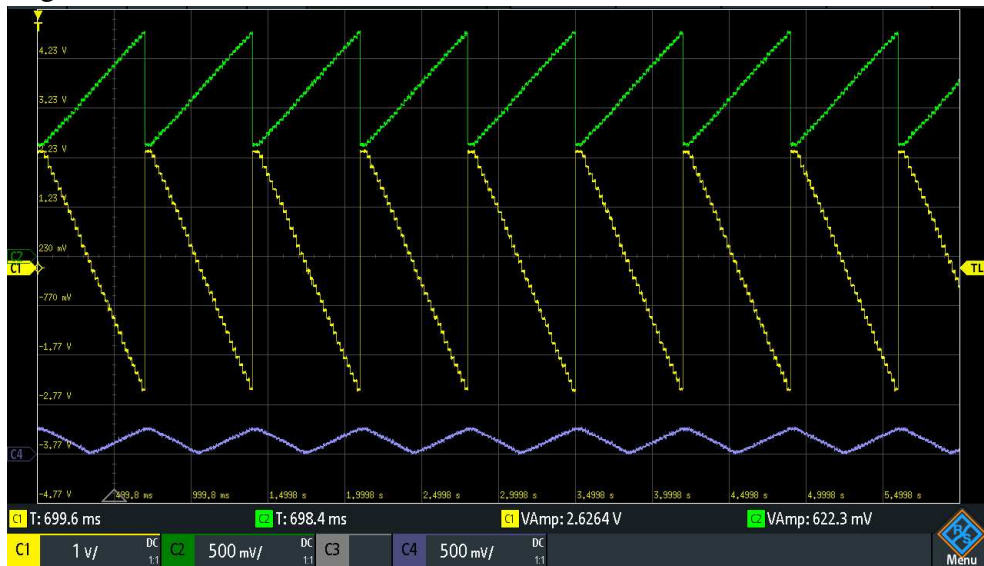
Figura 15 – Teste inicial



Fonte: Elaborado pelo autor.

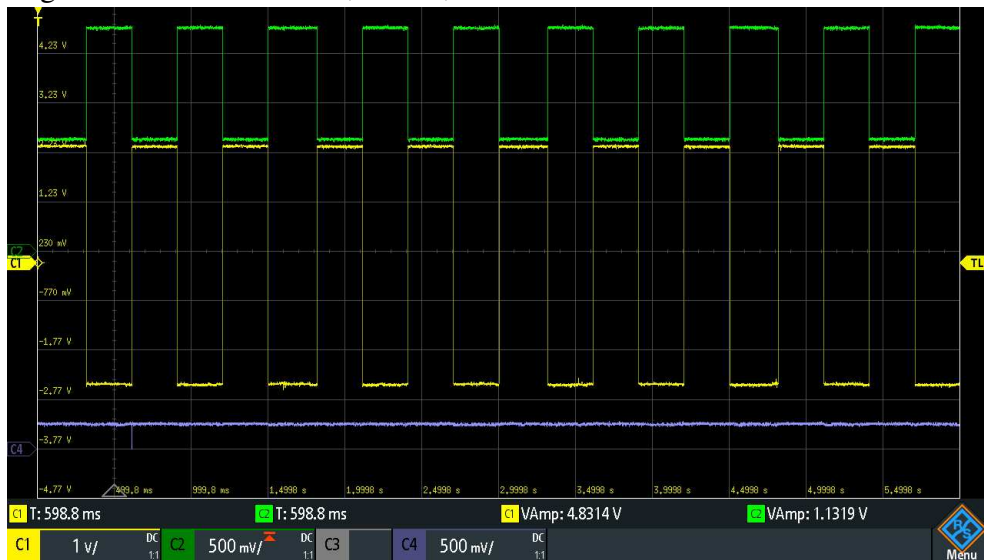
As figuras a seguir ilustram as formas de onda de saída capturadas durante a fase de teste da StimBoxV3. A Figura 16 mostra a forma de onda dente de serra (Ssaw A1200 P600), demonstrando a subida linear consistente e a queda repentina, característica de uma onda dente de serra. Por fim, a Figura 17 exhibe a forma de onda quadrada (Sc A1200 P600), destacando as transições ligadas-desligadas, cruciais para certos tipos de estimulação neural. Essas formas de onda validam a capacidade do sistema de gerar diferentes tipos de sinais com precisão, assegurando sua eficácia para aplicações terapêuticas.

Figura 16 – Teste com Ssaw;A1200;P600



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Teste com Sc;A1200;P600



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante os testes, observou-se que a forma de onda do eletrodo estava invertida em relação à forma de onda do DAC, fenômeno atribuído à conexão da fonte de Howland. Essa inversão é uma característica do funcionamento do circuito de Howland, que efetivamente inverte o sinal de entrada para alcançar a saída de corrente desejada. Além disso, devido à faixa de entrada limitada do ADC (0[V] - 3,3[V]), as formas de onda foram refletidas de maneira consistente para a faixa positiva sempre que cruzavam valores negativos ou passavam por 0 (neste caso, 1,65[V]). Essa reflexão foi particularmente evidente no caso das ondas dente de serra, como mostrado na Figura 16. A faixa estreita captada pelo ADC fez com que as ondas

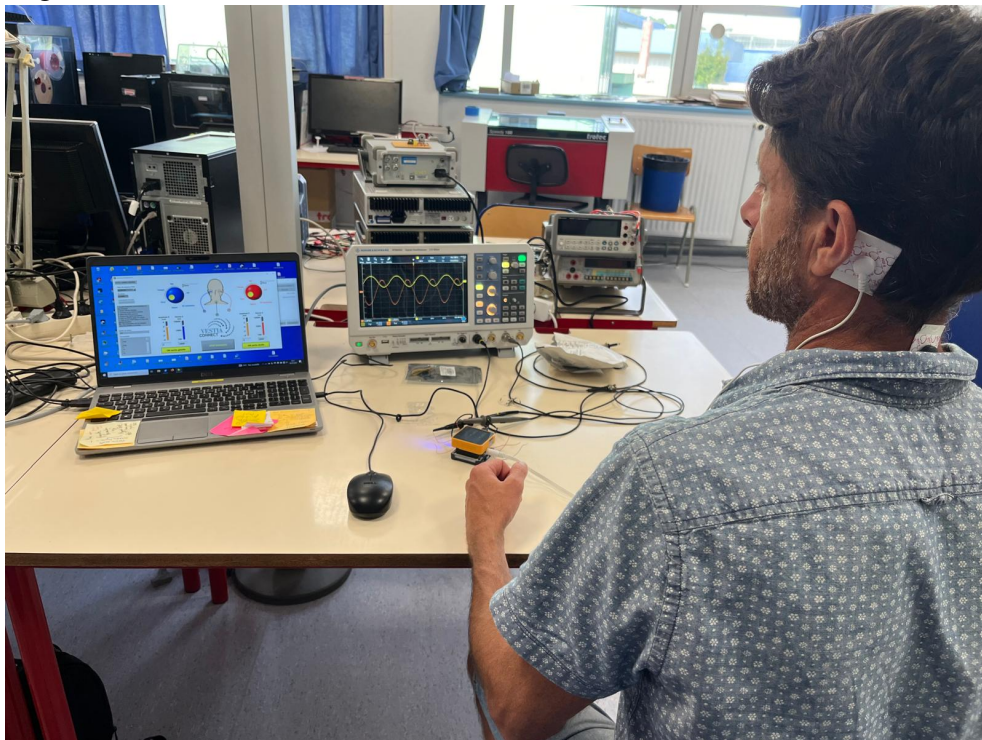
quadradas (Figura 17) fossem interpretadas como lineares, em vez de manter sua forma quadrada verdadeira, comportamento que exige ajustes futuros no sistema para garantir uma representação precisa do sinal em toda a faixa.

Melhorias potenciais para futuras versões da StimBox incluem a adição de um divisor de tensão e um ajuste de offset para garantir que o sinal reduzido do eletrodo esteja centralizado dentro da faixa média do M5Core2. Esses aprimoramentos ajudariam a manter a integridade do sinal, fornecendo leituras mais precisas e melhorando o desempenho geral do sistema.

Após a realização bem-sucedida dos testes e a análise dos resultados, foram conduzidos ensaios com indivíduos para observar os efeitos da interação com a StimBoxV3.

Os efeitos da estimulação variaram dependendo da resistência corporal e da sensibilidade de cada indivíduo. Tipicamente, os testes começavam com uma amplitude de A500 (0,5mA), ponto em que usuários mais sensíveis começaram a sentir os efeitos da estimulação, observando as reações do indivíduo e a análise do sinal a partir do sistema de testes montado na Figura 18. As descrições das sensações variaram desde a impressão de estar caindo em um sonho até a experiência de movimentos sutis, semelhantes ao balanço de um barco no mar.

Figura 18 – Teste com indivíduo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A eficácia da estimulação depende não apenas da pessoa que utiliza a StimBoxV3, mas também do tipo de sinal, da corrente e do período durante o qual o sinal é enviado. Também

foi observado que a calibração da faixa de uso de cada indivíduo antes dos testes é crucial para personalizar o tratamento.

Tabela 1 – Comparação entre as versões da StimBox

Característica	V1	V2	V3
Quantidade de Módulos	2	1	1
Quantidade de Circuitos (por Módulo)	2	3	2
Alimentação do Módulo	USB ou bateria externa	USB	Bateria própria
Comunicação Módulo - Terminal	USB ou Bluetooth	USB	USB ou Bluetooth

Fonte: Elaborada pelo autor

Para melhor compreender as evoluções entre as diferentes versões do dispositivo, a seguir é apresentada na tabela 1, destacando as principais características técnicas e funcionais das versões anteriores e atuais da StimBox. Com base na análise dos dados apresentados, é possível observar que a StimBoxV3 traz avanços significativos em relação às suas versões predecessoras, tanto no que diz respeito à conectividade e autonomia quanto à precisão na geração dos sinais de estimulação. Tais melhorias proporcionam uma experiência mais eficiente para o usuário, além de ampliar as possibilidades de aplicação clínica do dispositivo.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo foi desenvolver um módulo autônomo e sem fio para estimulação binaural. A pesquisa foi estruturada em três fases: familiarização com o M5Core2, construção e testes da placa eletrônica com uma fonte de Howland, e comparação dos resultados práticos com as simulações teóricas. A culminação da integração do M5Core2 com a placa eletrônica resultou na criação da StimBoxV3, capaz de realizar estimulação binaural com conectividade tanto via Bluetooth quanto USB.

Durante a pesquisa, alguns desafios foram encontrados, especialmente na integração dos componentes de hardware e software, o que exigiu uma depuração e otimização meticulosas. Um obstáculo significativo foi garantir uma comunicação confiável entre a StimBoxV3 e dispositivos externos via Bluetooth, que inicialmente apresentou problemas de conectividade. Através de testes iterativos, foi necessário uma compreensão mais profunda dos protocolos de comunicação sem fio.

A equipe de pesquisa planeja realizar mais testes com a terceira versão da StimBoxV3 em um hospital, aguardando as aprovações necessárias, com pacientes que sofrem de distúrbios de equilíbrio. Além disso, a equipe do laboratório GREYC poderá explorar as capacidades do sistema em condições de máximo potencial e situações extremas.

As perspectivas futuras incluem a melhoria da StimBoxV3 com funcionalidades adicionais, como conectividade via Wi-Fi e maior autonomia, permitindo seu uso diário prolongado pelos usuários. Essas melhorias, juntamente com outras discutidas neste relatório, visam impulsionar ainda mais o desenvolvimento do módulo.

REFERÊNCIAS

- Arduino. **Arduino IDE**. Itália, 2023. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/software>>.
- Autodesk Inc. **Eagle: PCB Design Software**. San Rafael, 2023. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>>.
- Autodesk Inc. **Fusion 360: 3D CAD, CAM, CAE PCB Cloud-Based Software**. San Rafael, 2023. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>>.
- CARVALHO, R. L.; GOMES, M. M.; FRANCO, L. F. de R.; ABREU, D. C. C. de. Respostas posturais frente à estimulação vestibular galvânica: comparação entre grupo de pessoas idosas e jovens. **Revista Brasileira de Geriatria e Gerontologia**, v. 22, n. 5, p. 1–10, 2019.
- HAMITER, M. **Présentation de l'oreille interne**. 2023. *MSD Manual*. Available at: <<https://www.msmanuals.com/fr/professional/affections-de-l-oreille,-du-nez-et-de-la-gorge/troubles-de-l-oreille-interne/introduction-aux-troubles-de-l-oreille-interne>>.
- M5Stack. **M5Core2 for AWS**. Available at: <https://docs.m5stack.com/en/core/core2_for_aws>.
- NIDCD. **Balance Disorders**. 2018. Available at: <<https://www.nidcd.nih.gov/health/balance-disorders>>.
- OLIVEIRA, R. C. C. D.; LABANCA, L.; MEIRELES, P. G. Z.; DINIZ, M. L.; PIRES, A. P. B. de Ávila; BARROSO, J. C.; GONÇALVES, D. U. Estimulação vestibular galvânica na melhora da atenção voluntária e da qualidade de vida em pacientes com doença de parkinson e desequilíbrio corporal. **Revista CEFAC**, v. 25, n. 4, p. 1–6, 2023.

APÊNDICE A – LISTA DE SINAIS - STIMBOX

Liste complète des signaux :

"s" : sinus
 "c" : carré
 "saw" : dent de scie
 "t" : triangle
 "bb" : bruit blanc
 "br" : bruit rose

Le Tableau 1 illustre les formes de signaux prédéfinies. Avec les 2 dernières commandes, n'importe quel signal arbitraire peut être généré par une succession de niveaux continus. La commande dc génère un niveau continu et zéro impose un niveau 0 (0 mA, équivalent à Sdc, A0 mais en une instruction).

"zero" : zero
 "dc" : niveau continu

Tableau 1 : Illustration des formes de signaux prédéfinies. En jaune signal, en blue synchronisation TTL.

