



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

# Uso de sistema háptico para transmitir conceitos sonoros para pessoas surdas em jogos eletrônicos

Emme Costa de Menezes

Monografia apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador  
Prof. Dr. Marcus Vinicius Lamar

Brasília  
2023



# Dedicatória

A quem me trouxe onde estou.

# Agradecimentos

Primeiramente preciso agradecer muito aos meus pais, Elcilange e Francisco, por me incentivarem grandemente de perseguir esse sonho de graduação. Agradeço muito por toda paciência, que foi muita, alegria, encorajamento. Vocês me deram paz quando a angústia me tomou e me foram minha força quando me senti fraca. Sei que não sou das pessoas a mais fácil, mas sei que o zelo de vocês sempre me faz alguém melhor. Muito obrigada por todo empenho e fé que tiveram sobre mim, é fundamental para tudo que construo.

Meu mais profundo agradecimento para Rosa, que cuidou e zelou por mim durante todos esses anos. Sei que sem seu apoio incondicional não teria como concluir essa fase da minha vida, e agradeço profundamente pela sua participação em tudo isso. Você foi paciente e atenciosa quando mais precisei, e foi peça-chave para que eu pudesse viver tudo que vi desde que saí de casa. Muito obrigada.

Também agradeço muito o professor Lamar, meu orientador, por ter aceitado meu desejo de desenvolver esse trabalho da linha de hápticos. Agradeço muito sua paciência, atenção e dedicação durante o mais de um ano de desenvolvimento deste projeto. Obrigado por ouvir os mais vários absurdos que fui capaz de gerar lendo e conhecendo sobre a área, por guiar meu caminho enquanto desenvolvia, por me incentivar quando precisei. Tenho certeza que sem sua presença, este trabalho não seria metade do que é.

Aqui também venho agradecer à Maria, que recentemente começou a se envolver com a pesquisa. Muito obrigada pela sua atenção, você não sabe o alívio que me foi poder falar sobre minhas ideias de maneira aprofundada com outra pessoa, ainda que você não soubesse completamente dos detalhes do que eu estava fazendo. Agradeço muito suas ideias e sei que elas melhoraram este projeto e trarão muitas outras melhorias no futuro da pesquisa.

Agradeço a todos os voluntários do projeto, muito obrigada por toda a paciência do mundo ao me ouvirem explicar sobre o que é projeto, ao colocarem o protótipo, ao jogarem o jogo e me retornarem com suas opiniões. Especialmente agradeço muito os voluntários surdos que foram essenciais para a construção de tudo, em particular o Nathanael. Agradeço muito a oportunidade que vocês me deram e agradeço demasiadamente a paciên-

cia que tiveram comigo quando ainda sei tão pouco sobre LIBRAS, e precisei de muito mais tempo do que o necessário para explicar cada detalhe de funcionamento do projeto. Vocês são incríveis!

Sei que este trabalho não foi feito apenas pelas minhas mãos e preciso agradecer muito os professores que me permitiram concluir esta obra. Muito obrigado, professora Artemis, ter feito minha primeira iniciação científica com você me iluminou sobre o significado de ciência, sei que amadureci muito com seu zelo e sem isso não teria a mentalidade curiosa que guiou este trabalho. Agradeço também ao professor Domingos que, desde quando nos conhecemos em 2017, sempre foi uma grande inspiração. Suas conversas comigo sobre meus trabalhos, incluindo este, foram muito valiosas e mudaram meu jeito de ver o mundo. Agradeço ao professor João Luiz, que foi muito importante em muitas etapas da minha graduação, sua paciência e cuidado foram muito significativos em todo meu percurso de graduação. E agradeço também por todos os docentes que conheci durante esse processo e me tornaram uma pessoa mais interessada em conhecer.

Agradeço profundamente a todos os meus amigos durante essa jornada. Os mais próximos, os que me conheceram antes de transferir de curso, os que conheci depois de transferir, aqueles que mantenho desde minha terra natal, e aqueles que encontrei no meu caminho. Muitas vezes foram meu alívio, alegria e paz. Nas amizades que fiz, encontrei um lugar para apenas respirar e existir, um apoio, um consolo e um lar.

Agradeço também a todos os projetos e comunidades dos quais participei e nos quais trabalhei durante esses anos de graduação. Muito obrigado, IEEE SSIT UnB, comunidade surda da UnB, UnBeatables, Ramo IEEE UnB, IEEE WiE UnB, PyLadiesDF, Ipê Digital, Big Open Source Sibling, Meninas.prog e UnBall. Todos foram fundamentais para meu amadurecimento e permitiram que eu conhecesse o mundo.

Sou grata pela oportunidade de ter me apresentado no Workshop da Pós-graduação/ Computação (WPOS) do Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Brasília com uma versão intermediária do trabalho. Foi uma experiência muito importante para mim, pois pude trocar ideias com muitos outros pesquisadores e afetou profundamente meu olhar sobre o desenvolvimento do projeto.

Agradeço profundamente também a Fundação de Apoio a Pesquisa do Distrito Federal por ter financiado a pesquisa científica que começou o desenvolvimento deste trabalho.

E, por fim, muito obrigada a todas as pessoas que me trataram como Emme. Tenham certeza que todas as vezes foram muito importantes para mim e serão guardadas com muito valor.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Acesso ao Portal de Periódicos.

# Resumo

Este trabalho apresenta a pesquisa e desenvolvimento de um sistema háptico vestível com o propósito de ser uma mecânica de acessibilidade para pessoas surdas no contexto de jogos eletrônicos. O principal objetivo deste sistema é proporcionar imersão e melhorar a experiência com *videogames* do público-alvo. Com a incorporação de motores de vibração, o sistema visa realçar a experiência de jogos provendo sinais tipicamente sonoros como efeitos de vibração. A abordagem modular no desenvolvimento permite que o protótipo elaborado possa ser aplicado em diferentes contextos além do de jogos sem a necessidade de mudanças, pois conta com uma interface gráfica para a criação e edição de efeitos hápticos. Para validação do sistema, foram realizadas entrevistas e testes com usuário, visando compreender questões como a usabilidade do protótipo, sensibilidade a diferentes intensidades de vibração em várias partes do corpo, criação de efeitos hápticos com a interface gráfica, e teste de um jogo de terror háptico-visual com usuários ouvintes e surdos. Os resultados obtidos são promissores e agradaram muito o público-alvo.

**Palavras-chave:** interface háptica, acessibilidade em jogos, surdez, tecnologias vestíveis, dispositivos hápticos

# Abstract

This work introduces a new haptic wearable system designed specifically for individuals who are hard of hearing or deaf. The primary objective of this system is to create an immersive and distinctive experience within video game contexts. By incorporating a haptic feedback interface with vibration motors, the system aims to enhance the overall gaming experience for individuals with hearing impairments, providing them with a unique and engaging sensory encounter. The modular approach to developing the system allows it to be applied in diverse contexts beyond video games without needing structure changes, and its own editor is a high-level graphic interface able to create and edit sequences regardless of its use. There were interviews and tests with users to validate the system. Question about usability and vibration sensibility were explored, and a haptic-visual game were developed and played by volunteers, to verify the technology.

**Keywords:** haptic interface, game accessibility, deaf, werable device, haptic devices

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Hipótese da pesquisa . . . . .	2
1.2	Objetivo . . . . .	2
1.3	Estrutura do documento . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>4</b>
2.1	Efeitos hápticos . . . . .	4
2.2	Método de Inspeção Semiótica para análise de sinais sonoros . . . . .	5
2.3	<i>Hardware</i> . . . . .	5
2.3.1	ESP32-WROOM-32 . . . . .	5
2.3.2	Motores de vibração . . . . .	6
2.4	<i>Software</i> . . . . .	7
2.5	Trabalhos Relacionados . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Metodologia Proposta</b>	<b>11</b>
3.1	Interface vestível . . . . .	12
3.1.1	<i>Driver</i> . . . . .	13
3.1.2	Protótipo vestível . . . . .	19
3.1.3	Entrevista de usabilidade . . . . .	23
3.1.4	Entrevista de sensibilidade . . . . .	24
3.2	Interface gráfica . . . . .	26
3.2.1	<i>Back-End</i> . . . . .	27
3.2.2	<i>Front-End</i> . . . . .	28
3.3	Implementação do jogo . . . . .	32
3.3.1	Base do jogo . . . . .	34
3.3.2	Elaboração de efeitos hápticos . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>37</b>
4.1	Interface vestível . . . . .	37
4.1.1	Módulo de Controle . . . . .	37



4.1.2	Protótipo vestível . . . . .	39
4.1.3	Usabilidade do protótipo . . . . .	40
4.1.4	Sensibilidade aos atuadores . . . . .	42
4.2	Elaboração de efeitos hápticos . . . . .	45
4.2.1	Luzes trêmulas . . . . .	45
4.2.2	Nervosismo . . . . .	47
4.2.3	Localização do monstro . . . . .	49
4.2.4	Susto . . . . .	52
4.2.5	Observações . . . . .	52
4.3	Adição de efeitos hápticos no jogo . . . . .	54
4.3.1	Interação entre efeitos . . . . .	57
4.4	Teste do jogo com voluntários . . . . .	60
4.4.1	Recepção detalhada dos jogadores surdos . . . . .	61
4.5	Revisão dos resultados obtidos . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>65</b>
5.1	Trabalhos futuros . . . . .	66
	<b>Referências</b>	<b>68</b>

# Lista de Figuras

2.1	Microcontrolador ESP32 . . . . .	6
2.2	Motores de vibração 1027 . . . . .	6
2.3	Vistas exterior e interiores da jaqueta elaborada no estudo de Georgios Karafotias <i>et al.</i> . . . . .	8
2.4	Vistas frontal e traseira do protótipo do estudo de Ibuki Tara <i>et al.</i> . . . .	9
2.5	Protótipo elaborado por Tomosuke Maeda <i>et al.</i> . . . . .	9
2.6	Protótipo elaborado por Tito Klautau . . . . .	10
3.1	Diagrama de funcionamento do sistema do jogo com efeitos hápticos . . . .	11
3.2	Circuito do <i>driver</i> do motor . . . . .	14
3.3	Circuito de simulação de uma entrada PWM . . . . .	15
3.4	Resposta transitória do circuito original ao sinal PWM . . . . .	16
3.5	Resposta transitória do circuito modificado ao sinal PWM . . . . .	16
3.6	Circuito modificado usado como <i>driver</i> dos motores . . . . .	17
3.7	PCB do projeto com 12 <i>drivers</i> , 6 de cada lado da placa . . . . .	18
3.8	Projeto de caixa de proteção do módulo de controle . . . . .	18
3.9	Diagrama do protótipo vestível . . . . .	21
3.10	Posicionamento dos motores nos braços . . . . .	23
3.11	Tela de Início da interface gráfica . . . . .	29
3.12	Referência de localização dos atuadores no usuário . . . . .	30
3.13	Tela do Editor da interface gráfica . . . . .	31
3.14	Tela da Biblioteca da interface gráfica . . . . .	32
3.15	Estética de <i>The Backrooms</i> . . . . .	33
3.16	Cena do jogo elaborado . . . . .	34
3.17	Mapa do jogo elaborado . . . . .	35
3.18	Fluxo de criação de efeito háptico . . . . .	36
4.1	Módulo de Controle soldado na PCB . . . . .	38
4.2	Módulo de Controle na caixa . . . . .	38
4.3	Usuário com o dispositivo montado, vista traseira . . . . .	39

4.4	Usuário com o dispositivo montado, vista frontal . . . . .	39
4.5	Modo de fixação dos motores . . . . .	40
4.6	Atuadores usados no efeito luzes trêmulas marcados em vermelho . . . . .	46
4.7	Representação do sinal de nervosismo em LIBRAS . . . . .	47
4.8	Atuadores usados no efeito nervosismo marcados em azul . . . . .	48
4.9	Atuadores usados no efeito monstro marcados em verde . . . . .	49
4.10	Relação entre atuadores e direção no efeito da localização do monstro, os atuadores estão em verde . . . . .	50
4.11	Atuadores divididos por efeito em que são usados . . . . .	53
4.12	Área de gatilho para efeito luzes trêmulas . . . . .	54
4.13	Diagrama sobre funcionamento do efeito do monstro . . . . .	56
4.14	Fluxograma do funcionamento do jogo com efeitos háptico . . . . .	58
4.15	Fluxograma da execução de efeito háptico . . . . .	59
4.16	Voluntária jogando o jogo de terror elaborado com o sistema háptico . . . . .	60

# Lista de Tabelas

3.1	Equivalência entre intensidades e tensão de entrada para os módulos . . . .	19
3.2	Medidas dos fios da interface vestível . . . . .	22
4.1	Sequência para efeito de luzes trêmulas . . . . .	46
4.2	Sequência para efeito de nervosismo . . . . .	48
4.3	Relação entre distância entre jogador e monstro e as propriedade de período e intensidade . . . . .	51
4.4	Sequência para efeito de susto . . . . .	52

# Lista de Abreviaturas e Siglas

**CIC** Departamento de Ciência da Computação.

**HTTP** Protocolo de Transferência de Hipertexto (do inglês *Hypertext Transfer Protocol*).

**IoT** Internet das Coisas, (do inglês *Internet of Things*).

**LIBRAS** Língua Brasileira de Sinais.

**MIS** Método de Inspeção Semiótica.

**OMS** Organização Mundial da Saúde.

**PCB** Placa de circuito impresso (do inglês *Printed Circuit Board*).

**PWM** Modulação por Largura de Pulso (do inglês *Pulse Width Modulation*).

**SQL** *Standard Query Language*.

**UnB** Universidade de Brasília.

**USB** Barramento Serial Universal (do inglês *Universal Serial Bus*).

**WPOS** Workshop da Pós-graduação/Computação.

# Capítulo 1

## Introdução

“A surdez é o nome dado à impossibilidade ou dificuldade de ouvir”  
(MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2017).

Estima-se que perdas auditivas afetam mais que 1,5 bilhões de pessoas, aproximadamente 20% da população, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) [1]. Para essas pessoas, é imprescindível que experiências audiovisuais tenham recursos de acessibilidade, que garantam que informações sonoras sejam transmitidas de maneira alternativa.

No setor de jogos eletrônicos, um mercado emergente de mais de 2 bilhões de usuários [2], a prática da acessibilidade está se popularizando. Tanto grandes empresas quanto empresas menores têm adotando padrões de tecnologia assistiva para atender um público maior [3].

Apesar disso, há poucos dados quantitativos sobre essa mudança e diretrizes sobre o assunto estão sendo propostas pela própria comunidade de pessoas com deficiência. O site *Game Accessibility Guidelines* [4] lista propostas de implementações assistivas por grau de dificuldade na implementação, e o site *Can I play that?* [5] apresenta análise de jogos com recursos de acessibilidade. Essas práticas permitem que a comunidade encontre jogos que atendam suas condições e disseminam conhecimento sobre inclusão.

Dentre os métodos de acessibilidade, há o uso de efeitos hápticos: efeitos relacionados ao sentido do tato, como temperatura, vento, vibração [6]. Efeito vibratórios são empregados há décadas em celulares e atualmente são aplicados em controles dos *videogames* mais modernos [7].

Neste trabalho, são explorados os efeitos hápticos vibratórios na forma de um dispositivo vestível, isto é, um sistema que cobre parte do corpo, geralmente torso e braços, e dispõe vários motores de vibração nessa região. Ao aumentar a superfície de contato, é possível expandir os tipos de combinação de vibração e assim aumentar a quantidade e

a qualidade da informação transmitida ao usuário. Isso pode melhorar a experiência do usuário e torná-la mais imersiva e vívida.

Como recurso de acessibilidade, o uso de um sistema háptico para transmissão de informações tipicamente informadas pelo meio sonoro pode trazer autonomia para indivíduos surdos. Um sistema assim pode cativar e engajar essas audiências em obras que geralmente não são tão imersivas ou proveitosas pelas adaptações limitadas a ferramentas visuais. A adição do tato pode atender essas expectativas como também pode ser usado para transmitir outros tipos de ideias que modelos audiovisuais não podem.

## 1.1 Hipótese da pesquisa

O uso de um sistema háptico baseado em motores de vibração é capaz de aumentar a imersividade de jogadores surdos em jogos eletrônicos.

## 1.2 Objetivo

O objetivo do projeto é implementar um dispositivo háptico vestível para transmitir efeitos tipicamente sonoros como efeitos vibratórios para pessoas surdas em jogos eletrônicos. Para o desenvolvimento deste trabalho, também se faz necessário cumprir os seguintes objetivos secundários.

- Desenvolver uma interface vestível de baixo custo e replicável;
- Criar um controle de alto nível da interface vestível com visual intuitivo e que possa ser manipulado por pessoas sem conhecimento técnico;
- Validar o sistema através da implementação de um jogo com mecânicas hápticas.

## 1.3 Estrutura do documento

Este trabalho está dividido em cinco capítulos além deste Capítulo 1 de Introdução.

O Capítulo 2, Fundamentação Teórica, revisa conceitos teóricos importantes para compreensão do estudo e apresenta alguns trabalhos da área de hápticos e/ou acessibilidade que inspiraram este trabalho;

A Metodologia Proposta é apresentada no Capítulo 3 e descreve a metodologia usada para o desenvolvimento do projeto.

O Capítulo 4 expõe os Resultados Obtidos. Este capítulo mostra o protótipo final, discute as soluções e problemas encontrados na implementação, discorre sobre o processo

de elaboração de sinais hápticos e adição desses no jogo, os resultados dos testes propostos, a recepção do público geral e do público surdo;

Por fim, o Capítulo 5, Conclusão, as considerações finais sobre o trabalho e aborda perspectivas futuras de melhorias e outras implementações similares.



# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta as tecnologias e métodos necessários para desenvolvimento do trabalho. A teoria foi dividida em duas etapas, *Hardware* e *Software*, e também conta com uma seção sobre o estado da arte do tema.

### 2.1 Efeitos hápticos

Os Efeitos hápticos se caracterizam pela interação com o tato e podem estar relacionados a diferentes tipos de propriedades, como força, vibração, calor, vento, movimento [6]. Em 1962, um sistema háptico foi lançado como um filme provido de efeitos como vibração, vento e cheiro por Heilig [8].

Na década de 1990, a Motorola introduziu um dos primeiros celulares com a função de VibraCall como um modo de alerta silencioso [9], tornando o celular também um sistema háptico. Hoje em *videogames*, esse recurso é muito explorado. Os controles mais modernos possuem motores de vibração e diferentes intensidades para representar uma gama variada de informações, como precisão ao puxar um gatilho e alerta de eventos [7].

Atualmente, os sistemas geralmente trabalham com apenas um tipo de propriedade, como vibração, pressão ou temperatura. Existem poucas pesquisas sobre sistemas com múltiplas modalidades. As limitações de espaço também existem, dado que alguns sistemas precisam de dispositivos grandes para emular algumas sensações, enquanto que sistemas portáteis geralmente se limitam ao uso de vibração [6]. Dentro do campo de acessibilidade, há muitos trabalhos instigantes sobre como usar essas ferramentas em prol da inclusão, mas há pouco dados quantitativos sobre o impacto promovido sobre essas pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias comercialmente acessíveis.

## 2.2 Método de Inspeção Semiótica para análise de sinais sonoros

O Método de Inspeção Semiótica (MIS) [10] é um método de avaliação da Engenharia Semiótica, para análise dos sinais ao qual o usuário está sendo exposto e a comunicação que é criada. O procedimento divide os tipos de sinais em três configurações: mensagens metalinguísticas explícitas, implícitas e mensagens dinâmicas. A dinamicidade se refere à necessidade de uma causa para que ocorra, como a interação do usuário ou passagem do tempo. Esse método é amplamente usado para análises de sistemas computacionais e usuário

Em 2012, Luiz Corrêa *et al.* [11] usaram o método para avaliar signos sonoros em jogos com foco em acessibilidade. Usando o mesmo sistema de divisão de signos do MIS, a pesquisa catalogou como:

- Metalinguísticos: signos que se referem ao próprio sistema, como sistema de tutorial via áudio;
- Estáticos: signos referentes a estado do sistema, como música de fundo;
- Dinâmicos: signos que dependem da interação no jogo, como som de tiro, jogadores se movimentando e personagens falando.

A partir dessa divisão, analisaram se esses mesmos signos eram representados de maneira acessível para o público surdo. A pesquisa concluiu que há recursos que, no jogo analisado, apenas foram transmitidos sonoramente, recursos que para serem percebidos visualmente requerem que o jogador tome uma postura diferente. Houve signos que a representação visual não incluía direção, um elemento importante dentro do jogo, entre outras falhas. Esses problemas não só podem ser causa de diminuição do potencial de imersão do jogo como podem prejudicar o jogador.

## 2.3 *Hardware*

O hardware se refere à parte física do trabalho. Sendo composto pelo protótipo vestível com os motores de vibração controlados por um microcontrolador. A seguir estão listados os principais componentes e especificações úteis para compreensão dessa parte.

### 2.3.1 ESP32-WROOM-32

O ESP32 [12], apresentado na Figura 2.1, é um microcontrolador com módulos de *Wi-Fi*, *Bluetooth* e *Bluetooth LE (Low Energy)*, com uma ampla gama de aplicações, muito

popular na área de Internet das Coisas, (do inglês *Internet of Things*) (IoT). No projeto, o ESP32 é o controlador dos módulos dos motores de vibração por meio de 12 pinos de I/O e o pino de Vcc.

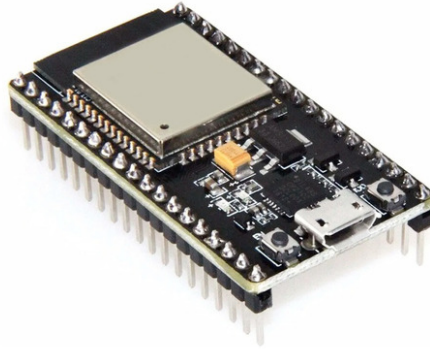


Figura 2.1: Microcontrolador ESP32

Fonte: [12]

A comunicação serial é a comunicação por meio de um cabo micro-USB. Permite que um mesmo cabo transmita dados e alimente o processador.

O processador contém o recurso de Modulação por Largura de Pulso (do inglês *Pulse Width Modulation*) (PWM) para geração de sinais analógicos. Essa técnica é caracterizada por um sinal de onda quadrada rápido, cujo porcentual do tempo com fornecimento de energia (*duty cycle*) é controlado para prover uma tensão eficaz equivalente ao valor desejado. O PWM produz valores analógicos a partir de dois estados, *on* e *off* alternados rapidamente, seguidos por uma filtragem Passa-Baixas.

### 2.3.2 Motores de vibração

Os motores de vibração usados na pesquisa são os motores de vibração 1027 [13], conforme mostrado na Figura 2.2.

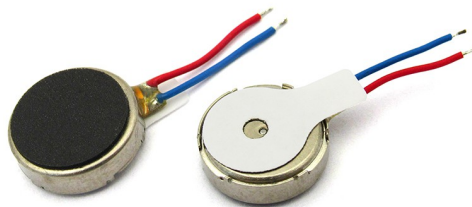


Figura 2.2: Motores de vibração 1027

Fonte: [13]

Sua tensão de operação é entre 2,7V e 3,3V e possuem 1 centímetro de diâmetro e 27 milímetros de espessura. Eles são comumente usados em aplicações como controles de *videogame*.

## 2.4 *Software*

As tecnologias usadas para desenvolvimento do *software* desta pesquisa são *Flask*, *React* e *Unity*.

Flask [14] é um micro *web framework* na linguagem Python. É um modelo de servidor bem simples com poucas abstrações. Permite uso de banco de dados como SQL.

React [15] é uma biblioteca para JavaScript para desenvolvimento de interfaces gráficas. É um projeto *open-source* mantido pela empresa Meta e é altamente difundido pelo uso baseado em componentes e fácil implementação.

Unity [16] é uma plataforma de desenvolvimento de jogos. Permite construção de jogos para multiplataformas, em 2D ou 3D, possui uma grande comunidade e muitos serviços disponibilizados gratuitamente.

## 2.5 **Trabalhos Relacionados**

Existem muitos estudos na área de tecnologias hápticas implementados em jogos ou focadas em acessibilidade, e alguns trabalhos propõem a interseção desses temas. Aqui estão listadas algumas pesquisas que foram base para o desenvolvimento deste projeto.

Em 2012, Fabien Danieau *et al.* [6] apuraram o cenário de hápticos, considerando sua aplicação atual, seu objetivo dentro de sistemas e suas vantagens e desvantagens. Propuseram também uma organização para adição efeitos hápticos em conteúdos audiovisuais dividido nas etapas de produção de efeitos, distribuição do material e renderização do conteúdo. Nesse processo, catalogaram modalidades de transmissão de efeitos existentes, interfaces vestíveis existentes e aplicações desses sistemas, como jogos, filmes e outras obras.

Wai-ling Ho-Ching *et al.* [17], em 2003, desenvolveram telas com o objetivo de transmitir informações sonoras para pessoas surdas no ambiente de escritório. Para isso, foi feita uma análise sobre os tipos de som que compõem o ambiente, como esses integram a vida das pessoas ouvintes, tecnologias assistivas já existem que trabalham sobre essa questão, como pessoas surdas percebem esses sons e a importância que atribuem a cada, e como captar, identificar e representar os sons.

Em 2021, Jasmine Granados [18] estudou e analisou o uso de sinais hápticos na transmissão de informações para pessoas surdas no contexto de jogos de tiro em primeira

pessoa. Jogadores surdos foram questionados sobre suas experiências em jogos com dicas visuais e hápticas e versões sem dicas. Foram debatidos pontos sobre performance, eficácia e preferência pessoal. Esse estudo foi importante para a pesquisa ao elaborar uma análise detalhada sobre jogos e acessibilidade.

Em 2017, Georgios Karafotias *et al.* [19] propuseram um sistema háptico para renderizar efeitos no contexto de filmes. Nesse trabalho, foi elaborada uma jaqueta com múltiplos motores de vibração mostrada na Figura 2.3. Foram testados padrões hápticos aleatórios e propositais durante o filme, com o objetivo de entender se o usuário conseguia criar uma correlação entre as duas informações e que tipo de emoções poderiam ser expressas. De maneira geral, observou-se que os efeitos hápticos melhoram a experiência audiovisual sem se tornar uma distração.



Figura 2.3: Vistas exterior e interiores da jaqueta elaborada no estudo de Georgios Karafotias *et al.*

Fonte: [19]

Em 2022, Ibuki Tara *et al.* [20] estudaram como o estímulo vibratório poderia incrementar a resposta ao medo em obras de terror. Os participantes, vestidos com o protótipo amostrado na Figura 2.4, assistiram vídeos temáticos acompanhados ou não de efeitos hápticos. Foram feitas medidas sobre o impacto do projeto sobre o sentimento de medo e o efeito sobre a condutância na pele, os quais indicaram que o protótipo realçou a experiência audiovisual .



Figura 2.4: Vistas frontal e traseira do protótipo do estudo de Ibuki Tara *et al.*

Fonte: [20]

Em 2019, Tomosuke Maeda *et al.* [21] propuseram um protótipo vestível háptico, apresentado na Figura 2.5, capaz de transmitir múltiplas sensações, tais como vibração, pressão e temperatura. O sistema foi testado com um filme para emular sensações condizentes com a obra.



Figura 2.5: Protótipo elaborado por Tomosuke Maeda *et al.*

Fonte: [21]

Em 2019, Tito Klautau [22] desenvolveu um sistema capaz de converter ritmos e música em efeitos hápticos. O modelo proposto conta com uma implementação para celulares Android, incluindo um sistema de captação de som em tempo real, um *software* que recebe uma música preexistente ou o som em tempo real, converte em padrões hápticos de vibração e envia para o protótipo vestível. O protótipo vestível contou com uma versão apenas no braço e outra com o braço e o torso, versões apresentadas na Figura 2.6. Esse

é controlado por uma placa Raspberry Pi 3B, que recebe o sinal e transmite para motores de vibração da interface vestível, acionando ou desligando esses. O sistema apenas aborda esses dois modos de configuração para os atuadores.

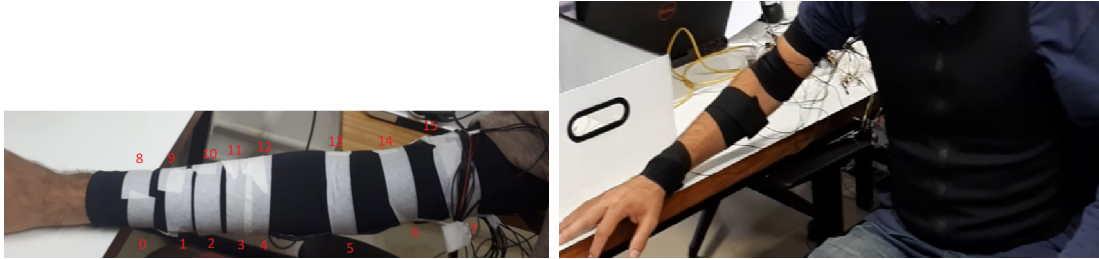


Figura 2.6: Protótipo elaborado por Tito Klautau  
Primeira versão à esquerda e segunda versão à direita  
Fonte: [22]

Em 2021, Ian Alexandre [23] continuou o trabalho de Klautau com destaque para o controle dos motores de vibração. O primeiro trabalho envolvia exclusivamente as operações de ligado e desligado, e Alexandre desenvolveu um *driver* para um motor mais potente, sendo possível trabalhar com várias intensidades perceptíveis na pele humana, analisando questões como tempo mínimo de vibração para identificar e a quantidade de intensidades diferentes capazes de serem reconhecidas.

Esses estudos e pesquisas foram fundamentais para a elaboração deste trabalho. Propuseram não apenas modos de implementação e conhecimentos técnicos, mas proveram ideias e inspirações para a elaboração da interface vestível, incluindo a roupa e o sistema de controle dos motores, assim como o modo de comunicação e interação entre as partes.

# Capítulo 3

## Metodologia Proposta

Este trabalho visa criar um sistema capaz de transmitir efeitos hápticos no contexto de jogos.

O projeto foi dividido em duas etapas: elaboração dos efeitos hápticos e implementação dos mesmos no jogo desenvolvido. Para realização das etapas, foi necessário também a elaboração da interface física e um sistema de controle. A proposta de funcionamento do jogo com os efeitos está descrita na Figura 3.1

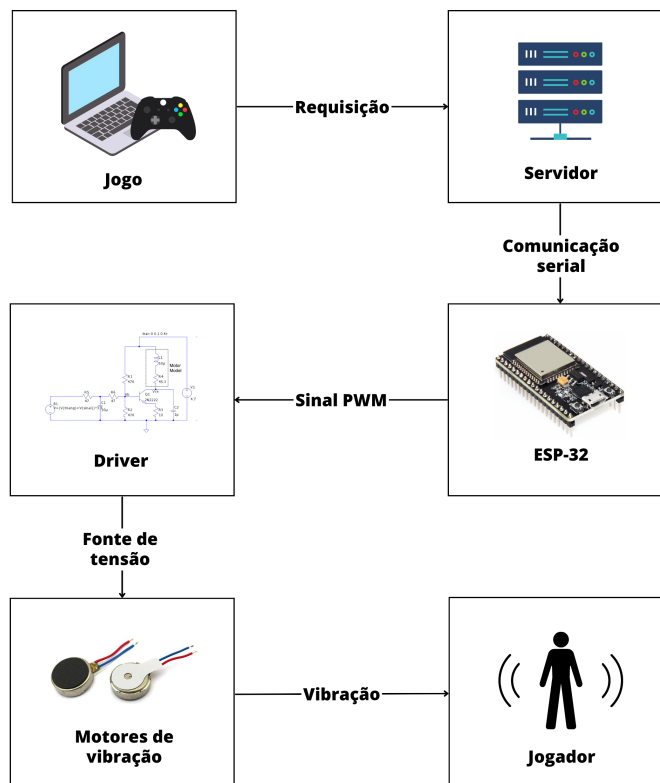


Figura 3.1: Diagrama de funcionamento do sistema do jogo com efeitos hápticos

Fonte: próprio autor



A partir de certas condições, o jogo envia requisições sobre os efeitos hápticos a serem executados. O servidor recebe e processa as requisições, e envia um sinal por comunicação serial para a interface vestível. Essa recebe os dados por meio do módulo de controle com o microcontrolador ESP32, o qual repassa o sinal para cada *driver* do protótipo por PWM. Os *drivers* são responsáveis por amplificar e filtrar o sinal, e repassam esse sinal limpo para os motores de vibração. Então os motores vibram de acordo com a tensão recebida.

O jogador com o protótipo recebe as vibrações e as interpreta. Munido dessa informação, é capaz de tomar decisões referentes ao jogo, como qual caminho seguir ou qual direção evitar. O jogo proposto é háptico-visual e depende completamente dessas informações para que a experiência do jogador seja completa.

Para atingir essa ideia, o sistema planejado foi dividido em três partes:

- Interface vestível com suporte para requisições seriais;
- Interface gráfica para manipulação da interface vestível;
- Implementação do jogo com efeitos hápticos, incluindo a criação e adição dos efeitos no sistema.

Além disso, vários experimentos foram realizados para garantir a qualidade de execução de cada parte:

- Simulação do *driver* elaborado para controle dos motores, considerando alterações feitas e garantindo que a resposta obtida é similar ao circuito original;
- Entrevista guiada sobre a usabilidade do protótipo vestível para garantir conforto do usuário e versatilidade para ser usado por usuários com portes físicos diferentes;
- Entrevista guiada sobre sensibilidade do usuários à vibração, testando fatores como intensidades capazes de serem diferenciadas pelo tato, se há diferença dependendo da localização do atuador, se é possível criar sequências com múltiplos motores que sejam assimilados com um efeito único, e se a roupa pode atrapalhar;
- Elaboração de efeitos hápticos de maneira interativa com a comunidade surda, garantindo que a interface atende os requisitos para criação de efeitos hápticos e que é possível criar sequências coerente para o contexto de jogos;
- Testagem do jogo háptico-visual elaborado com usuários ouvintes e surdos para testar a jogabilidade e compreensão dos sinais criados.

## 3.1 Interface vestível

Os requerimentos da interface vestível são:

- Receber requisições de maneira serial e controlar motores;
- Transmitir informação na forma de vibrações;
- Indicar quatro direções: frente, trás, direita e esquerda;
- Ser fácil de vestir e remover;
- Ajustar em pessoas com diferentes portes físicos;
- Ser confortável e não atrapalhar a movimentação durante o jogo, preferencialmente não ser perceptível a não ser quando efeitos hápticos estiverem sendo executados.

Para garantir que o modelo atenda os requisitos, foram elaboradas entrevistas guiadas de usabilidade e sensibilidade. A entrevista de usabilidade avaliou questões de conforto e movimentação para garantir que não incomodasse os usuários e não atrapalhasse a jogabilidade, seja por meio de mouse e teclado, ou controle. A entrevista de sensibilidade verificou se a percepção de usuários às vibrações eram compatíveis com os resultados obtidos pelo *driver* que inspirou o usado neste trabalho, definindo assim as intensidades possíveis de serem usadas nos efeitos hápticos.

Essas observações guiaram o desenvolvimento da interface vestível que foi dividida nas subetapas de *driver* - controle dos atuadores, interface vestível - elaboração do protótipo físico, e entrevistas guiadas de usabilidade e sensibilidade.

### **3.1.1 *Driver***

O circuito de *driver* para os motores de vibração proposto por Ian Alexandre [23] em sua monografia propõe melhorias a partir do trabalho de Tito Klautau [22], onde foi elaborado um sistema de controle usando o motor de vibração 1027, permitindo granulação no controle de intensidades. Alexandre analisou também a percepção de pessoas sobre os diferentes níveis de intensidade, garantindo que essa granularidade possa ser recebida pelo tato e, portanto, possa ser notada como diferentes informações.

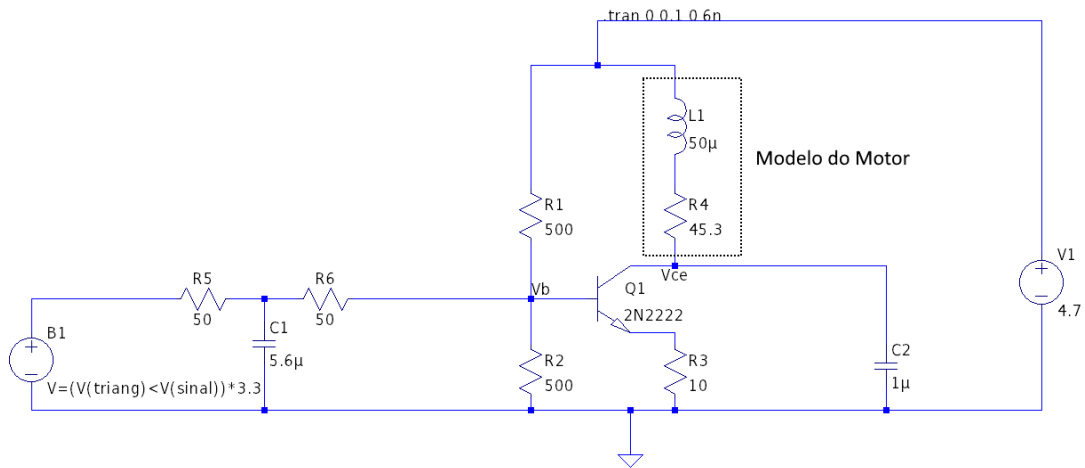


Figura 3.2: Circuito do *driver* do motor

Fonte: [23]

O circuito apresentado na Figura 3.2 faz uso do microcontrolador ESP32 para a geração de seu sinal PWM de entrada (modelado pela fonte de tensão B1). Trata-se de um modelo de circuito amplificador, usando o transistor bipolar NPN modelo 2N2222 (Q1), com um filtro passa-baixas de primeira ordem (R5, C1 e R6) na entrada a fim de transformar o sinal pulsado da entrada em um sinal contínuo para acionamento do amplificador. Os resistores R1, R2 e R3 são responsáveis pela polarização do transistor em sua região linear.

Alexandre testou também a sensibilidade de pessoas a diferentes intensidades e durações de vibração. Os testes foram feitos sobre a ponta dos dedos e o lado interno do pulso, regiões mais sensíveis à vibração. Além disso, houve um teste para identificar a percepção de diferentes níveis do PWM. Foi observado que os voluntários eram capazes de diferenciar em média 3,75 intensidades distintas, que estavam majoritariamente na faixa de 0% a 50% de intensidade. Foram obtidos outros resultados, mas este é o mais relevante para o desenvolvimento deste trabalho.

Para esta implementação, foram necessárias algumas modificações no circuito original para diminuir custos e quantidade de componentes, utilizando valores comerciais. As alterações feitas foram:

- Trocar o capacitor C1 de  $5,6\mu\text{F}$  para  $10\mu\text{F}$ ;
- Trocar os resistores R5 e R6 de  $50\Omega$  para  $47\Omega$ ;
- Trocar os resistores R1 e R2 de  $500\Omega$  para  $470\Omega$ .

Para garantir o funcionamento do circuito como planejado, foram refeitas as simulações de resposta transitória do circuito original. A análise transitória se refere a uma simulação

no domínio do tempo, com duração de 100 milissegundos e passo de 6 nanossegundos, onde o comportamento da corrente sobre o motor é analisado. O sinal PWM é um sinal muito ruidoso e é desejado que a corrente identificada seja estável com pouca ou nenhuma perturbação.

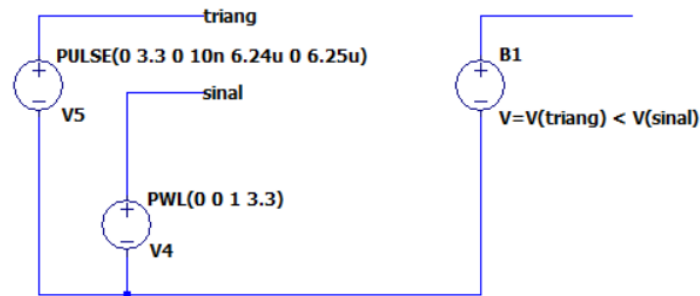


Figura 3.3: Circuito de simulação de uma entrada PWM

Fonte: [23]

Os circuitos foram testados com um fonte elaborada para simular uma entrada de PWM, mostrada na Figura 3.3, onde o comportamento de uma onda dente de serra é comparado com uma tensão. A simulação faz uso de um circuito equivalente fornecido pelo fabricante do motor, este circuito é composto por um indutor ( $L1$ ) de  $50\mu\text{H}$  em série com um resistor ( $R4$ ) de  $45,3\Omega$ .

O circuito final no trabalho de Alexandre, mostrado na Figura 3.2, foi projetado para diminuir os efeitos de variações geradas pela entrada em PWM, que funcionam em frequências elevadas. O circuito de *driver* inclui um filtro passa-baixa na entrada e outro no coletor do transistor (capacitor  $C2$ ). Este tratamento garante que os motores recebam pouca variação e ruído de alta frequência.

Na simulação, a resposta temporal do circuito, mostrada na Figura 3.4, apresenta a variação da corrente no motor ( $I(R4)$  em preto) com a tensão de saída do PWM filtrado ( $V(vb)$  em azul). Observa-se que há uma relação linear entre a tensão de entrada até  $1,6\text{V}$  e a corrente aplicada ao motor.

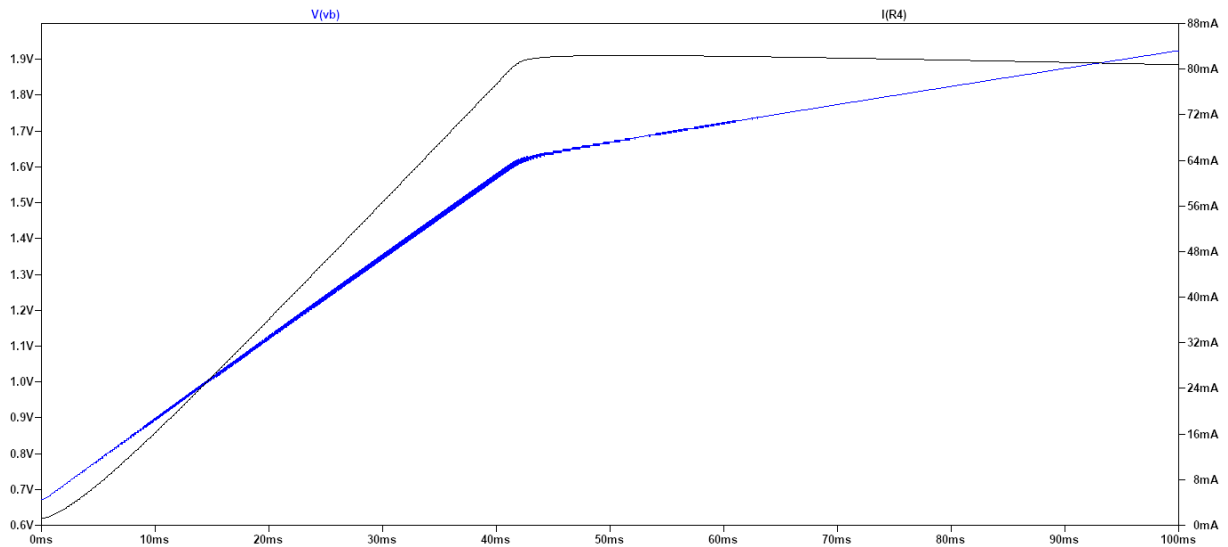


Figura 3.4: Resposta transitória do circuito original ao sinal PWM

Fonte: [23]

Com as alterações dos resistores e capacitores, ainda foi possível receber um sinal muito similar ao desejado, conforme mostra a Figura 3.5. Não havendo alterações significativas, como aumento na variação da corrente, as modificações foram mantidas e consideradas durante o resto da elaboração da placa.

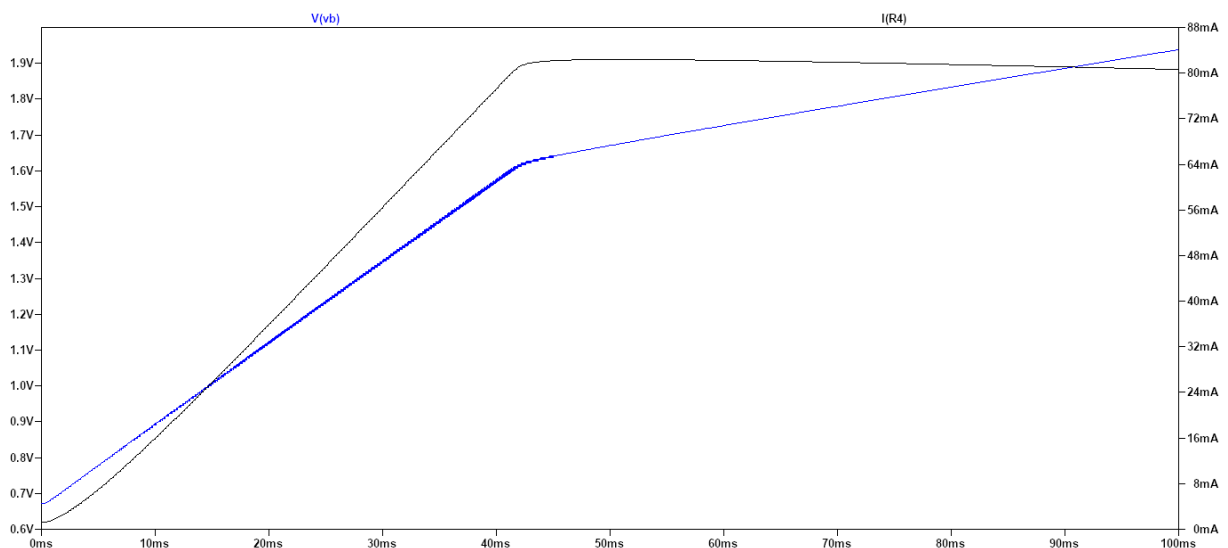


Figura 3.5: Resposta transitória do circuito modificado ao sinal PWM

Fonte: próprio autor

A versão final do circuito com modificações é apresentada na Figura 3.6.

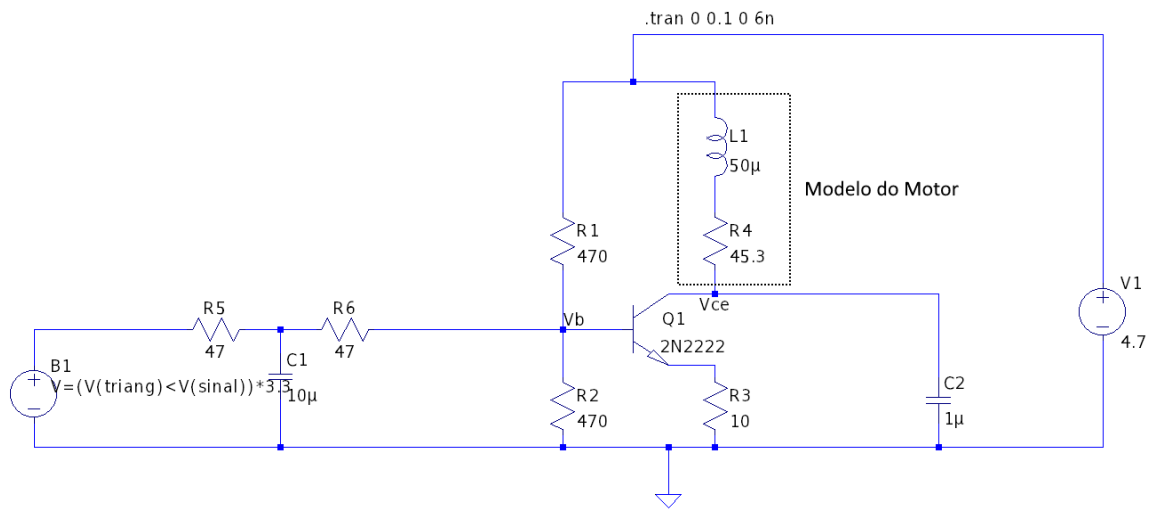


Figura 3.6: Circuito modificado usado como *driver* dos motores

Fonte: próprio autor

Com o módulo individual pronto, foi possível decidir sobre a quantidade de módulos para a interface vestível. Neste trabalho, inspirado em outros trabalhos hápticos revisitados no Capítulo 2, decidiu-se que o sistema teria 12 atuadores hápticos: 6 para cada lado, onde são 3 por braço e 3 por torso. Essa configuração atende o requisito de indicar 4 direções, ao colocar atuadores em posições capazes de representar direita, esquerda, frente e trás.

Assim foi elaborado um projeto de Placa de circuito impresso (do inglês *Printed Circuit Board*) (PCB) com o programa *Fritzing* apresentado na Figura 3.7, de dimensões  $11,5 \times 5,5 \text{ cm}^2$  e peso estimado de 50 gramas. A placa permitiu um modelo portátil, possível de ser fixado na vestimenta e fácil de transportar, diminuindo o risco de problemas de conexões frágeis que poderiam ocorrer com uma implementação em *proto-board*. Foi planejado que a placa deveria ficar nas costas, essa posição evita que os fios fiquem na frente do usuário e o atrapalhe ou incomode durante o jogo. Não foram consideradas questões de usabilidade sobre os cantos da caixa, em versões futuras poderiam ser feitos ajustes para arredondar e até incluir um material macio para fazer interface entre as costas do usuário e a caixa.

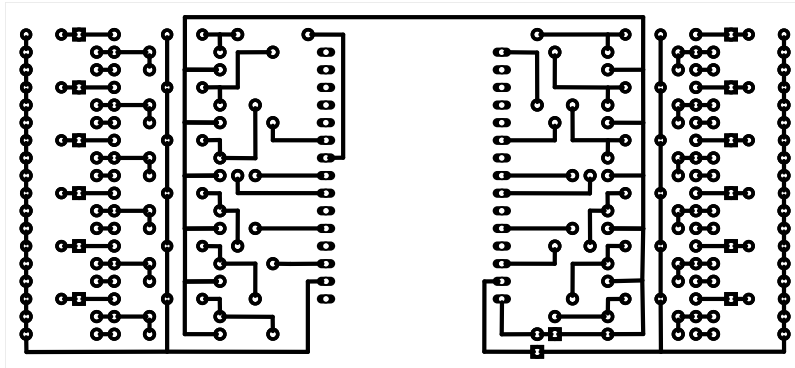


Figura 3.7: PCB do projeto com 12 *drivers*, 6 de cada lado da placa

Fonte: próprio autor

Como a placa deve ser fixada ao corpo, foi construída uma caixa em impressão 3D com tampa removível, mostrada na Figura 3.8.

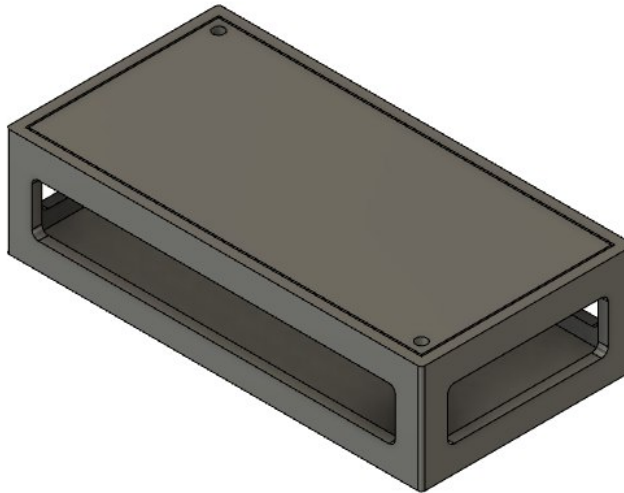


Figura 3.8: Projeto de caixa de proteção do módulo de controle

Fonte: próprio autor

Essa proteção permite acesso fácil à placa em caso de reparos e protege os usuários, evitando contato direto entre a pele e o circuito. A caixa tem dimensões de  $12,6 \times 3,3 \times 6,4 \text{ cm}^3$ , com vazamentos laterais, superior e inferior para cabos de alimentação dos módulos, cabo de comunicação serial USB e cabos de transmissão dos sinais dos *drivers*.

## Firmware

A função do *Firmware* é receber uma sequência de valores referentes aos módulos em um instante e repassar o valor para cada unidade. Essa implementação foi escolhida para priorizar o tratamento de dados no computador em alto-nível, assim qualquer nova sequência enviada é priorizada e se sobrepõe à atual imediatamente, evitando problemas de atrasos na transição por conta de processamento ou tratamento de dados, ou problemas na mesclagem de sinais. Isso também permite futuras implementações com microcontroladores mais simples.

Foram selecionados 8 níveis de tensão no intervalo de 0V a 3,3V, tensão de alimentação/saída do ESP32. Assim o dado recebido no sistema é apenas uma combinação de 12 caracteres de 0 a 7, um para cada módulo. A equivalência entre níveis e tensão está representada na Tabela 3.1. Os dados são recebidos por comunicação serial.

Tabela 3.1: Equivalência entre intensidades e tensão de entrada para os módulos

Intensidade	Tensão (V)
0	0,00
1	0,47
2	0,94
3	1,41
4	1,89
5	2,36
6	2,83
7	3,30

Fonte: próprio autor

Para a geração de sinais PWM para os módulos, usou-se o microcontrolador ESP32 com as configurações de frequência em 1.000 Hz com resolução de 3 bits, atendendo os valores de 0 a 7.

A alimentação e o recebimento de dados do *Firmware* são feitos pelo mesmo cabo Micro-USB. Os dados recebidos descrevem apenas o comportamento atual dos motores, o *Firmware* recebe o valor de todos os atuadores como um sinal apenas por comunicação serial e repassa para cada atuador

### 3.1.2 Protótipo vestível

O protótipo vestível é a composição da placa e dos motores em uma peça capaz de ser montada no usuário, atuando como interface física e permitindo a transmissão de



informações hápticas.

Foi decidido que o modelo deveria ser feito com o auxílio de elásticos e velcro para fixação. Essa combinação permite que os atuadores sejam posicionados de maneira fixa, diretamente no elástico, ou de maneira removível, com auxílio do velcro.

O modelo segue um esquema de alças e braceletes para comportar o protótipo. A preferência pelos membros superiores como braços e torso seguiu a proposta de Alexandre [23], a partir dos estudos de Verrilo e Chamberlain [24] sobre percepção de intensidade dos sinais vibratórios no corpo humano.

A Figura 3.9 e a Tabela 3.2 apresentam as definições do protótipo, com detalhes sobre medidas, localização do velcro e posicionamento no corpo.

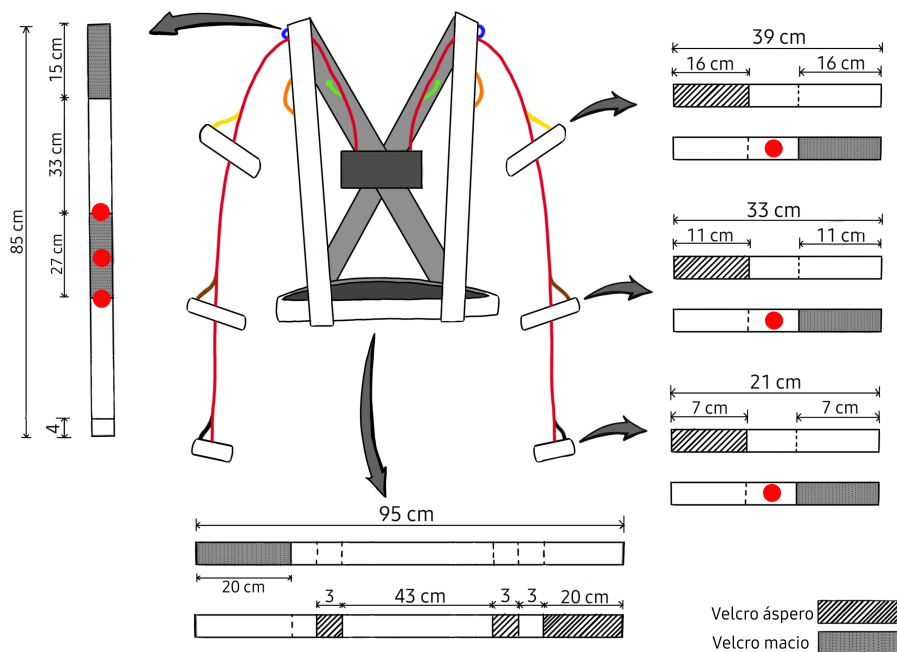


Figura 3.9: Diagrama do protótipo vestível

O traje é composto por alças, braceletes e cinto. As áreas em cinza representam o posicionamento do velcro, sendo o listrado para o velcro áspero, e o cinza, para o macio. Os pontos em vermelho representam a localização dos motores. A caixa cinza escura representa o módulo de controle dos motores, e deve ficar entre as alças e as costas do usuário. Este é o lugar de onde saem todos os fios de alimentação dos atuadores, representados pelos pontos vermelhos. Os braceletes são para pulsos, antebraço e braço. Os motores nessa posição devem ser fixados com cola, pois não devem ser reposicionáveis, se for preciso realocar algum desses atuadores, basta mudar o local dos braceletes, não dos motores. O detalhe das alças, apresentados nas medidas à esquerda, apresenta o lado inferior destas, onde a parte de cima se refere ao local que se fixa à frente do cinto, e a parte de baixo onde se fixa com a parte de trás do cinto, a área cinza se estende do tórax às costas. Para encaixar atrás, a alça tem uma margem que deve ser costurada para fazer um laço, por onde o cinto é passado. Pela frente, a alça é fixada pelo velcro, permitindo ajuste de altura pelo usuário. Os pontos vermelhos representam, respectivamente de cima pra baixo, os motores do tórax, do ombro e da costa, com espaçamento de quase 12 cm entre si. A área de velcro nas alças serve para encaixar os motores, que não são permanentemente fixos, estes possuem o velcro compatível, que permite que sejam soltos das alças e reposicionados a qualquer momento.

Fonte: próprio autor

Na Figura 3.9, as marcações em cinza claro representam o velcro macio e as marcações listradas representam o velcro áspero. O cinto e os braceletes possuem velcro nos dois lados, por isso há duas representações de cada. As alças apenas possuem velcro em um lado, o interno. A medida de 4cm ao fim representa uma margem extra que deve ser costurada, isso permite que a alça seja fixada ao cinto de maneira móvel. A caixa cinza nas costas representa o módulo de controle com os *drivers*. As marcações em vermelho nos braceletes e no velcro das alças representam a posição dos motores.

Tabela 3.2: Medidas dos fios da interface vestível

Localização do atuador	Cor do fio	Comprimento do fio (cm)
Costas	Verde	35
Ombro	Azul	50
Braço	Amarelo	70
Tórax	Laranja	70
Antebraço	Marrom	100
Pulso	Preto	115

Fonte: próprio autor

A Tabela 3.2 complementa a Figura 3.9 ao apresentar os comprimentos de cada fio de alimentação dos atuadores. As medidas se referem ao comprimento entre a saída da caixa nas costas, o retângulo em cinza escuro, até a localização do atuador. O fio vermelho é a alimentação geral e tem o mesmo comprimento que o fio do atuador no pulso, 115cm. No total, são 7 fios para cada lado.

A primeira versão incluía alças retas, mas esse modelo era mais instável e as alças eram mais suscetíveis a escorregarem; o modelo cruzado permitiu também um espaço para prender o *driver*. Usar braceletes e alças com velcro permite versatilidade no momento de colocar e retirar o protótipo.

Os motores das alças contam com velcro compatível com o velcro localizado pelo lado interior das alças, permitindo que o sistema de *driver* se separe das alças e os atuadores sejam realocados dependendo da preferência do usuário. Os motores dos braceletes foram fixados e, para evitar torção dos seus terminais, foi planejada a adição de abraçadeiras de nylon prendendo os fios aos braceletes. Todos os motores também possuem os terminais encapsulados por tubos termo retráteis para evitar torção. O posicionamento preciso dos motores nos braços está descrito na Figura 3.10.

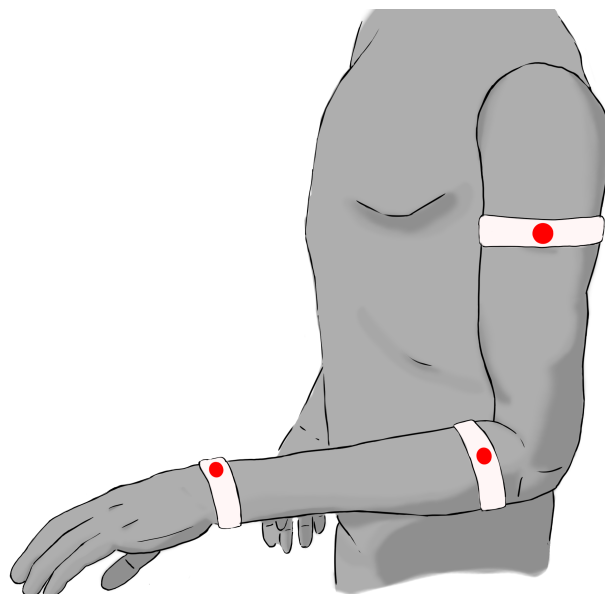


Figura 3.10: Posicionamento dos motores nos braços

Fonte: próprio autor

O protótipo foi elaborado para ser posto por cima de roupas ou em contato direto com a pele. O tecido do elástico escolhido é macio o suficiente para gerar pouco atrito, diminuindo a possibilidade de problemas como irritação ou incômodo.

Uma característica desse modelo é a necessidade de uma segunda pessoa para sua montagem, pois o *driver* é preso pelas alças nas costas, mas não é fixado, sendo necessário que alguém o posicione e o prenda, e fixe também os atuadores das costas nesse procedimento.

### 3.1.3 Entrevista de usabilidade

Para garantir qualidade do protótipo, foi elaborado um protocolo de apresentação do projeto seguido de uma entrevista guiada sobre usabilidade. As perguntas a serem respondidas nessa etapa são:

- O equipamento é confortável?
- Algum lugar específico incomoda?
- Há problemas de adequação em relação a peso e altura?
- O equipamento limita a mobilidade da pessoa durante o jogo?

Protocolo da entrevista:

- Para preparação das primeiras entrevistas, é possível usar a função teste da interface gráfica para conferir se todos os atuadores estão funcionando;
- Apresentar-se, explicar o funcionamento do protótipo e o objetivo do projeto;
- Pedir para a pessoa sentir com os dedos a máxima de vibração dos sensores, usando a entrada personalizada, e perguntar se isso a incomoda:
  - Se isso incomodar, reduzir o valor máximo até uma intensidade que não incomode;
  - Explicar também que as mãos são mais sensíveis, então como os motores estão espalhados por torsos e braços, talvez a pessoa se incomode menos com a vibração máxima e esse limite máximo poderá ser reajustado se preciso;
- Pedir licença e colocar o protótipo na pessoa, começando pelo sistema de cinto e alças, e depois ajustar os motores;
- Tomar cuidado com o lado áspero do velcro que pode incomodar a pele e pode causar danos a tecidos;
- Realizar as perguntas da entrevista previamente descrita e, no caso da pergunta sobre mobilidade, pedir para a pessoa voluntária se movimentar, como mexer os braços na horizontal e vertical.

### 3.1.4 Entrevista de sensibilidade

A sensibilidade aos atuadores foi prevista para ser testada com a usabilidade e seu protocolo é apenas continuação do procedimento anterior. Nessa etapa, as perguntas são:

- Quantos níveis de tensão dos motores os participantes são capazes de diferenciar? Esse valor é diferente para locais diferentes?
- É possível identificar sequências/padrões de atuadores com período definido?
- Onde os atuadores ficam melhor localizados? Em relação à altura em relação ao corpo e face para os braços.
- O tecido da roupa atrapalha?

As sequências/padrões são sequências hápticas que possam ser notadas como parte de um mesmo sinal, uma continuação, exemplos de sequências podem ser:

- Ligar alternadamente os motores em apenas uma direção, por exemplo: começar pelo pulso direito, ir para antebraço direito, braço direito;

- Ligar alternadamente dois motores: revezar o sinal entre os ombros, ou entre os motores das costas e da clavícula.

Essas entrevistas são importantes para compreender se o protótipo pode passar uma ideia de continuidade (após ligar em sequência, o usuário pode ser capaz de identificar que há uma sequência e não vibrações isoladas e desconexas?) e também identificar a percepção com múltiplos atuadores ligados. Há uma preocupação que, caso haja muitos motores ligados simultaneamente, não seja possível identificá-los e diferenciá-los, ainda mais em uma situação de estresse como ao jogar um jogo, e isso pode atrapalhar a experiência ao sobrepor sinais que poderiam ser importantes para o contexto. As respostas dessa pergunta também definem se será possível ou não o uso de efeitos que façam uso de múltiplos atuadores em sequência com a interface atual.

Protocolo da entrevista:

- Explicar que nessa etapa será testado cada atuador isoladamente e a pessoa deve identificar se a vibração aumentou, diminuiu, ou permaneceu a mesma a cada solicitação do entrevistador;
  - Esse teste pode ser realizado apenas de um lado, supondo a simetria dos sentidos, ou então intercalando os lados;
  - É esperado que os resultados sejam parecidos em todas as localizações, pois o protótipo tem uma faixa de variação de tensão pequena e pouca potência;
- Para essa etapa, o procedimento é o mesmo para todos os atuadores:
  - Escolher um módulo no nível máximo (a mesma intensidade definida no teste anterior) com a entrada personalizada e perguntar qual foi o módulo acionado:
    - \* Se o módulo não for identificado, checar se o motor está funcionando;
    - \* Se o módulo foi identificado incorretamente, checar sobre a possibilidade de o tecido da roupa ou do protótipo ter transmitido a vibração, confundindo sua origem;
    - \* Caso o problema continue, pode ser um problema de atribuição dos atuadores no *Firmware* ou no servidor que não estão sincronizados;
  - Aumentar, diminuir ou não alterar a intensidade, e perguntar ao participante se sentiu alguma diferença e, se sim, qual foi;
  - Não permitir que a pessoa veja qual foi a alteração ou quantos níveis existem;
  - Registrar os resultados, observando sempre de qual nível para qual nível foi testado;

- Repetir padrões para confirmar as anotações;
- Após o procedimento ser repetido com todos os atuadores necessários, executar a sequência de onda (sequência onde todos os atuadores são testados, um de cada vez na direção de um braço para o outro) com diferentes períodos e perguntar sobre a sensação sentida pelo participante;
- Também é possível elaborar algumas sequências no editor, como versões reduzidas da onda para apenas o braço ou torso;
- Explicar sobre a próxima etapa para encontrar a melhor localização dos atuadores;
- Manter o atuador dos pulsos na posição arbitrária do procedimento anterior;
- Testar uma intensidade qualquer e pedir ao voluntário para deixar os braços na posição em que o jogo deve ser jogado, e assim pedir para este virar as palmas;
- Perguntar se o movimento altera sua sensibilidade e, se sim, qual a melhor posição;
- Estabilizar os braços na posição final, em que o jogo deve ser jogado, e alternar a posição do motor para encontrar o ponto ótimo;
- Repetir o procedimento para o atuador do braço e do antebraço, considerando sempre a aplicação do projeto, no caso deste, foi observado com mais cautela a posição em que o braço está para a frente e as palmas estão para baixo, pois foi planejado o uso de *mouse* e teclado.

Com as respostas dessas duas entrevistas, é possível definir as condições para criação dos efeitos hápticos, assim como identificar os pontos fortes e os pontos de melhoria da interface háptica.

## 3.2 Interface gráfica

Para controle do sistema nas etapas de análise da interface vestível e elaboração de sinais hápticos, foi planejado um sistema em alto nível composto por uma interface gráfica para manipulação do sistema com um servidor para prover interação com o *Firmware* e o banco de dados. Por questão de praticidade, foram usados os apelidos *Front-End*, interface gráfica, e *Back-End*, servidor, na explicação do sistema.

A comunicação entre servidor e *Firmware* é feita por comunicação serial, e o servidor recebe comandos por meio de requisições HTTP, tanto por parte da interface gráfica quanto do jogo.

### 3.2.1 *Back-End*

Para melhor compreensão, algumas definições são importantes. Aqui, sequência é uma lista de strings em baixo nível que descreve um comportamento a ser executado pelo protótipo. Chama-se efeito quando essa lista já está formatada como objeto, com as propriedades de nome, período e a sequência em si. Requisições com propriedades se referem a sequências hápticas geradas dinamicamente durante o jogo, a partir de propriedades como intensidade e atuadores a serem utilizados.

O *Back-End* tem os objetivos de i) transmitir dados para o *Firmware* por comunicação serial; ii) receber requisições de outras partes; iii) executar requisições de sequências; iv) executar requisições de efeitos; v) gerar sequências com base em requisições com propriedades e executar; vi) salvar e resgatar efeitos.

Essas objetivos definem um sistema pouco robusto com grande maleabilidade para criar novas sequências e modelos de sequências, fazendo uso de banco de dados para salvar e resgatar registros. Por esse motivo, o mini-framework *Flask* foi utilizado, transmitindo informações para o *Firmware* por comunicação serial e recebendo informações do jogo ou do *Front-End* por requisições web HTTP.

A seguir estão listados todas as funções necessárias:

- Executar sequência;
- Executar sequência a partir de propriedades;
- Salvar efeito;
- Resgatar um efeito a partir de identificador único;
- Listar itens da biblioteca;
- Executar efeito da biblioteca.

Essas funções atendem tanto as possibilidades da interface gráfica quanto o jogo.

Para comunicação com o *Firmware*, o *Back-End* envia uma requisição via serial. A configuração do sistema e o comando para comunicação estão apresentado no trecho de código a seguir.

```
import serial

serialPort = serial.Serial(
    port="/dev/ttyUSB0",
    baudrate=115200,
    bytesize=8,
```



```
timeout=2,  
stopbits=serial.STOPBITS_ONE)
```

```
sequence = "012345670123 "  
serialPort.write(bytes(sequence, 'utf-8'))
```

A biblioteca *serial* encapsula o acesso à interface serial, porta de comunicação com o *Firmware*. A função *serial.Serial* configura a comunicação. A função *bytes*, nativa em *Python*, cria um objeto em *bytes* a partir de uma sequência de caracteres, seguindo a codificação binária *UTF-8*. A função *write* envia para porta o valor convertido. Observa-se que é enviado um instante da sequência por vez, pois o *Firmware* não é responsável por armazenar a sequência completa.

Ao se comunicar com outros módulos, o *Back-End* recebe uma requisição para execução de efeito, conforme está descrito no código a seguir.

```
{  
    input: { "111111111111", "000000000000" },  
    period: 1  
}
```

Caso o objetivo da requisição seja salvar a sequência, o corpo deve ser como o apresentado no trecho a seguir, adicionando apenas o título à requisição anterior.

```
{  
    title: "Titulo da sequencia",  
    input: { "111111111111", "000000000000" },  
    period: 1  
}
```

### 3.2.2 *Front-End*

O *Front-End* tem os objetivos de i) ser uma interface gráfica de alto nível, fácil e intuitiva de ser manuseada por usuários técnicos e não técnicos; ii) testar módulos individualmente; iii) testar módulos em conjunto; iv) permitir a criação de sequências complexas com período; v) salvar efeitos; permitir criar variações de efeitos; vi) listar a biblioteca de efeitos e vii) permitir que as atividades executadas sejam rápidas e fáceis.

A interface gráfica também inibe o usuário de executar funções impróprias ao limitar a quantidade de configurações disponíveis do sistema.

Para atingir os objetivos propostos, foram planejadas três telas, Tela de Início, Tela do Editor e Tela da Biblioteca.

A Tela de Início, mostrada na Figura 3.11, permite testar o sistema ao controlar todos os atuadores simultaneamente ou individualmente.

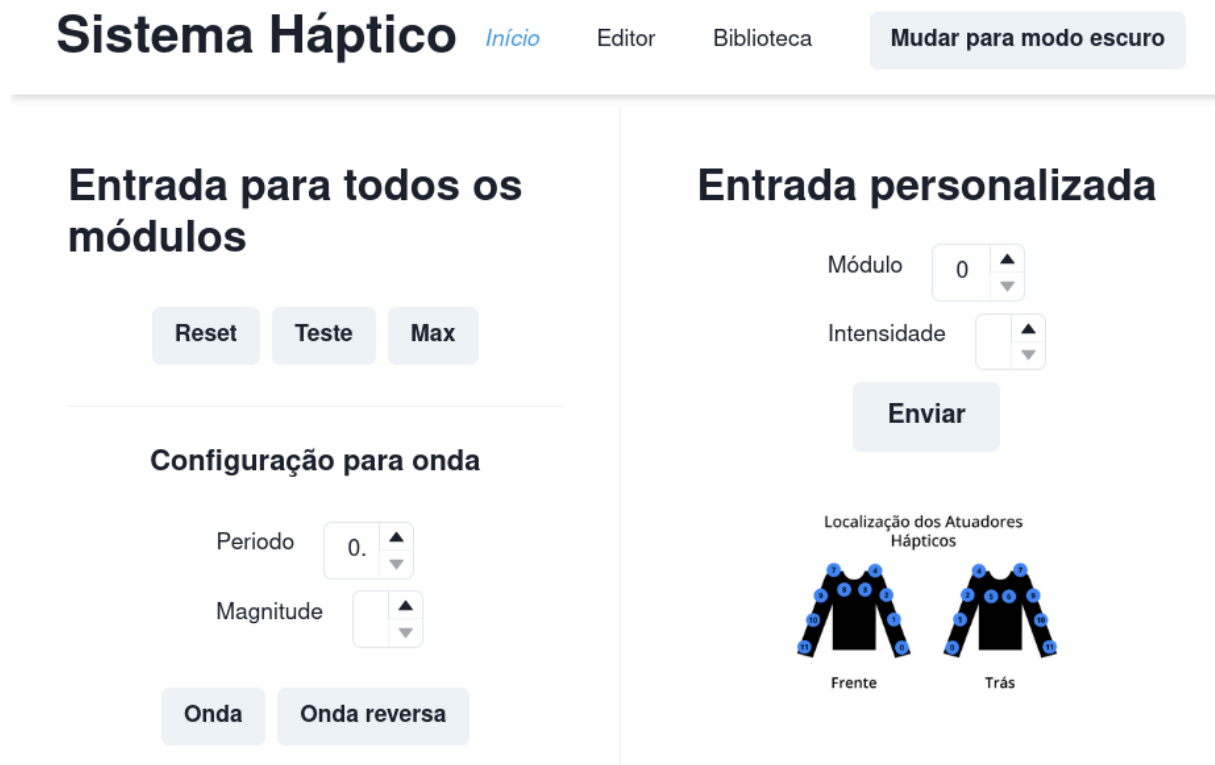


Figura 3.11: Tela de Início da interface gráfica

Fonte: próprio autor

Na Figura 3.11 à esquerda, estão funções que interagem com todos os módulos:

- *Reset*. Configura todos os atuadores para a intensidade 0;
- *Teste*. Configura todos os atuadores para a intensidade 1;
- *Max*. Configura todos os atuadores para a intensidade 7;
- *Onda*. A partir das configurações de período e magnitude, executa todos os atuadores sequencialmente da esquerda para direita, sendo referência o usuário com o protótipo;
- *Onda reversa*. O mesmo que onda, mas executa da direita para esquerda.

A ordem referida no modo direito é a ativação dos atuadores de 0 a 11. Para compreensão desse comportamento, a Figura 3.12 apresenta as posições dos atuadores com suas numerações.

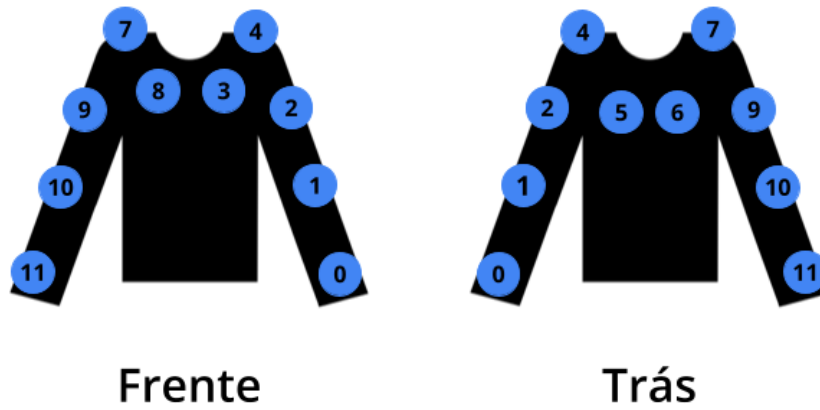


Figura 3.12: Referência de localização dos atuadores no usuário

Fonte: próprio autor

Essas funções podem ser úteis para preparação das entrevistas, garantindo que todos os módulos estão operantes, além de zerar o sinal de saída e oferecer uma implementação pronta de sequência.

À direita na Figura 3.11, está a função que interage com um módulo por vez a partir da escolha do módulo e intensidade. Essa função é útil para a entrevista guiada de sensibilidade, descrito na Subseção 3.1.4.

Adicionar colunas					Enviar					Salvar					Editar sequência salva					Limpar					Periodo
MOD	T 0	T 1	T 2	T 3	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	0.1								
	☰	☰	☰	☰	0	0	0	0	2	0	0	7	0	0	0	0									
	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼								
	☰	☰	☰	☰	0	0	0	0	7	0	0	2	0	0	0	0									
	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼								
	☰	☰	☰	☰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼								
	☰	☰	☰	☰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼								
	☰	☰	☰	☰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼								
	☰	☰	☰	☰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼	▲▼								

Figura 3.13: Tela do Editor da interface gráfica

Fonte: próprio autor

A Figura 3.13 apresenta o editor de efeitos hápticos. Cada coluna se refere a uma sequência a ser executada, e o período é o intervalo de tempo entre as sequências até que sua execução seja concluída, devendo ser um número inteiro positivo. Mod, abreviação de módulo, se refere a numeração vista na Figura 3.12, onde a cada momento cada módulo tem um campo de seleção numérica entre 0 e 7.

Os botões superiores permitem i) adicionar uma nova coluna/instante à sequência; ii) enviar para o protótipo, executar; iii) salvar no banco de dados; iv) resgatar e editar uma sequência salva e v) limpar a sequência atual, deletando todas as colunas.

O cabeçalho do editor se refere ao instante de tempo (T0,T1,T2,...), e cada um possui um menu com opções para i) deletar a coluna selecionada; ii) duplicar a coluna e inserir a seguir; iii) duplicar a coluna e inserir no final; iv) mover a coluna para esquerda e v) mover a coluna para direita.

Essas funcionalidades foram implementadas após a versão inicial para agilizar a criação de efeitos. Ao clicar em salvar efeito, um modal é aberto com campo de texto obrigatório

para registro do nome e um botão para confirmar salvamento.

A última tela é a de biblioteca, mostrada na Figura 3.14. Sua funcionalidade é resgatar a lista de efeitos e executar o selecionado.



Figura 3.14: Tela da Biblioteca da interface gráfica

Fonte: próprio autor

Para atingir o objetivo de realizar atividades de maneira fácil e rápida, as três telas foram desenvolvidas com o foco em priorizar o uso de *mouse*, em detrimento de alternativas que necessitam de teclado. Todas as funções, excluindo a função de adicionar o nome da sequência, podem ser executadas por meio de cliques, tornando o sistema mais amigável para o usuário.

### 3.3 Implementação do jogo

O jogo escolhido para apresentação do sistema é baseado em um jogo *indie* chamado *The Backrooms* [25, 26], estética apresentada na Figura 3.15. O jogo foi escolhido por seu

gênero de terror, um tipo de jogo onde sons de alerta também provém direção e criam um ambiente incerto e desconfortável.



Figura 3.15: Estética de *The Backrooms*

Fonte: [27]

Essa decisão também segue a proposta do MIS, onde houve preferência por jogos com mais sons dinâmicos - dependentes de aspectos causais e temporais. Essa abordagem vetou outros estilos de jogos, com atmosfera mais tranquila ou focada em aventura, por ter poucos ou rápidos sons dinâmicos.

As variantes desse jogo geralmente inserem o jogador em um labirinto com temática de escritório enquanto um ou mais monstros, com diferentes atributos, perseguem o jogador que deve procurar pela saída.

Segundo o MIS, todos os mecanismos sonoros a serem aplicados são dinâmicos. A implementação proposta é uma versão simplificada do jogo original com quatro mecânicas:

- **Luzes trêmulas.** As luzes emitem um efeito de zumbido quando o jogador está próximo;
- **Sentimento de nervosismo.** Na medida que o tempo passa, o jogador começa a ouvir seu próprio personagem arfando;
- **Monstro.** Ao se locomover pelo labirinto, o monstro emite um som que permite que o jogador identifique sua localização;
- **Susto.** Se o jogador se aproxima demais do monstro, este é atacado com um grito alto e o jogo acaba.

### 3.3.1 Base do jogo

A *game engine Unity* foi escolhida para implementação por ser uma ferramenta popular de criação de jogos, com muitos recursos prontos disponíveis gratuitamente.

A base do jogo foi feita antes dos efeitos, permitindo um contexto para que estes fossem testados. Como uma versão de *The Backrooms*, um pequeno labirinto com temática de escritório foi feito. As luzes são piscantes e menos luminosas que o comum para produzir um ambiente hostil, como mostra a Figura 3.16.

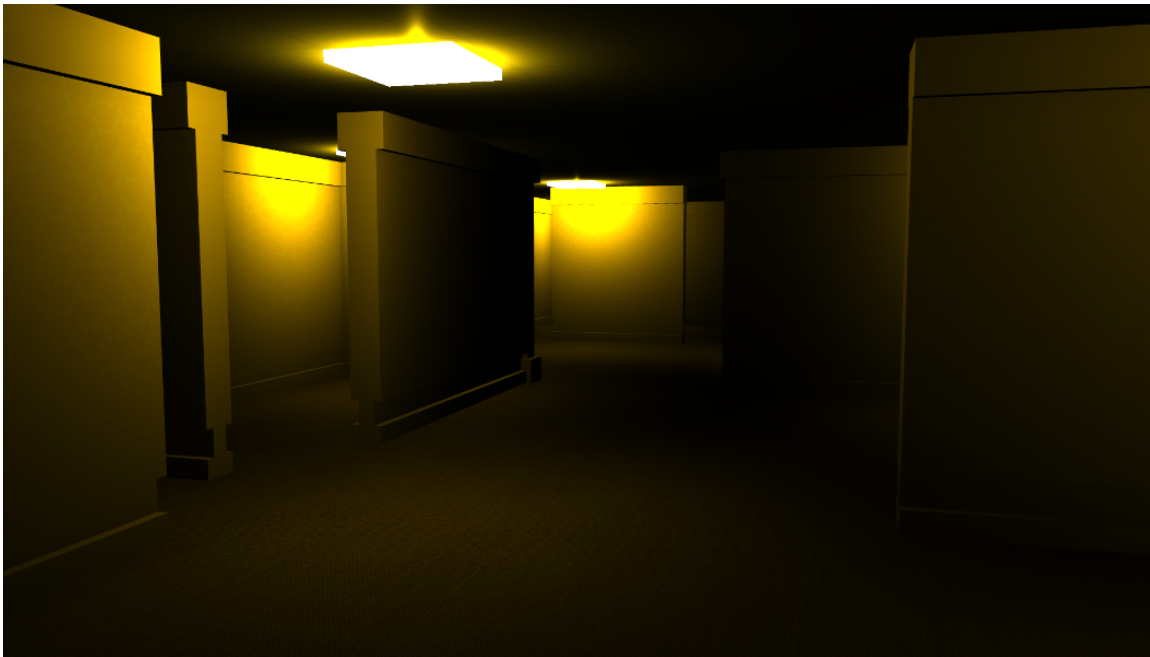


Figura 3.16: Cena do jogo elaborado

Fonte: próprio autor

O mapa final é apresentado na Figura 3.17, e o objeto selecionado representa a localização inicial do jogador.



Figura 3.17: Mapa do jogo elaborado

Fonte: próprio autor

O jogador inicia a partida no canto inferior esquerdo e deve encontrar a saída no canto superior direito.

Foi implementado um controle de jogador em primeira pessoa da *Unity*, com mecânicas básicas como controle de câmera, andar e correr. O objetivo neste jogo é encontrar a saída, que é caracterizado por uma sala pequena e clara com duas luzes no teto, sinalizada na Figura 3.17.

Para adição do monstro, foi decidido um movimento de velocidade constante onde este começa em um ponto do mapa entre o jogador e a saída e é direcionado por uma coordenada aleatória escolhida dentro do mapa com velocidade constante. O monstro não persegue o jogador em nenhum momento. O problema dessa decisão poderia ser a quebra de expectativa ao jogador ver o monstro atravessando paredes, para evitar isso foi definido que o monstro deveria ser invisível, assim sua única dica de localização seria via háptica, explorando mais a mecânica principal deste trabalho.

### 3.3.2 Elaboração de efeitos hápticos

Por decisão técnica, optou-se pela criação manual de efeitos. Estes foram feitos em parceria com a comunidade surda da Universidade de Brasília (UnB) usando a Língua Brasileira



de Sinais (LIBRAS) como meio de comunicação. Isso permitiu a integração direta da comunidade foco do projeto com a pesquisa na parte principal do trabalho.

Para elaboração dos efeitos hápticos, considera-se os resultados da entrevista guiada de sensibilidade, como quantidade de intensidades diferenciadas pelo usuário e capacidade de reconhecimento de padrões. Com essas informações, foi possível seguir o seguinte protocolo para criação dos sinais.

1. A preparação inclui o usuário vestir o protótipo e abrir a interface gráfica na tela do Editor;
2. Explicar ao voluntário o efeito a ser desenvolvido usando imagens do jogo, o sentimento que o efeito deve invocar e seu gatilho, indicando direções se existir;
3. Propor uma sequência inicial de teste;
4. Receber o retorno do voluntário sobre propriedades que poderiam ser mudadas como período, intensidade nos atuadores e atuadores utilizados;
5. Repetir o processo de teste e alteração até o efeito atingir seu objetivo;
6. Salvar efeito na biblioteca.

Esse fluxo está representado no diagrama da Figura 3.18. Este processo é repetido para todos os efeitos.

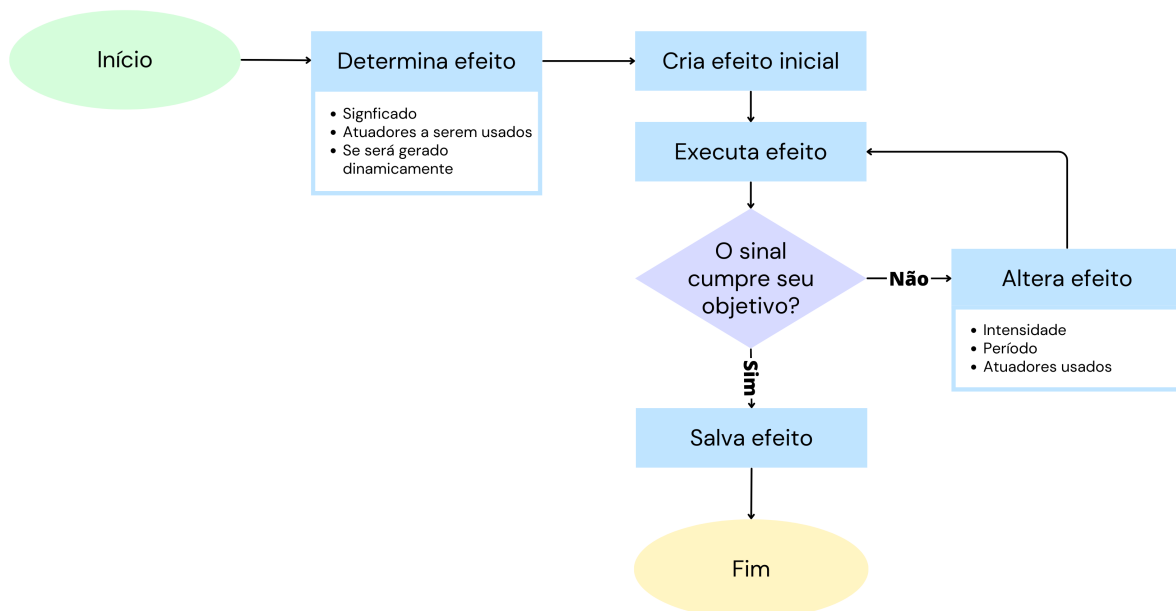


Figura 3.18: Fluxo de criação de efeito háptico

Fonte: próprio autor

# Capítulo 4

## Resultados

Este capítulo de resultados é dividido em interface vestível, elaboração de efeitos hápticos, adição dos efeitos em jogos e teste do jogo com voluntários.

Os códigos das implementações a seguir podem ser encontradas nos seguintes repositórios no site *GitHub Firmware*<sup>1</sup>, *Back-End*<sup>2</sup> e *Front-End*<sup>3</sup>.

### 4.1 Interface vestível

Esta seção é dividida da mesma forma que no Capítulo 3, começando pela construção da interface vestível e a sua recepção pelo público, tanto quanto a usabilidade quanto a sensibilidade.

#### 4.1.1 Módulo de Controle

A partir do projeto, foi confeccionada a placa de circuito impresso, a partir de uma placa de cobre virgem. A Figura 4.1 mostra a PCB com os componentes eletrônicos e o microcontrolador. Foram escolhidos os capacitores de 10  $\mu\text{F}$  eletrolíticos e os de 1  $\mu\text{F}$  de tântalo. Foram usados conectores de barra para encaixar o microcontrolador.

---

<sup>1</sup><https://github.com/emnezes/hapticsys-firmware>

<sup>2</sup><https://github.com/emnezes/hapticsys-server>

<sup>3</sup><https://github.com/emnezes/hapticsys-interface>

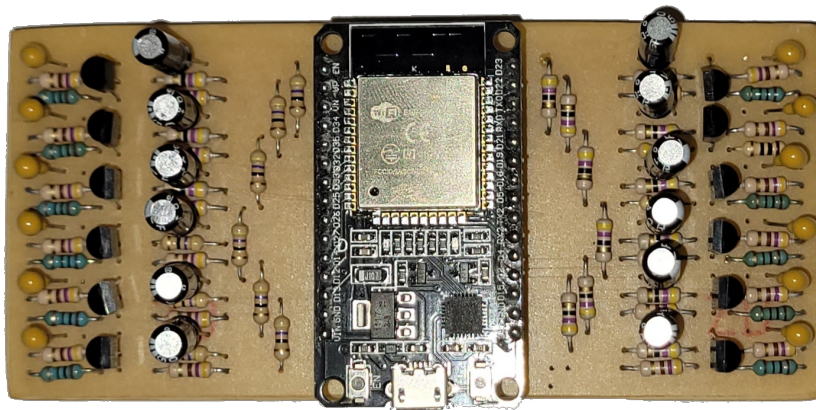


Figura 4.1: Módulo de Controle soldado na PCB

Fonte: próprio autor

A PCB elaborada para o projeto precisou de melhorias por restrições de entrada e saída do ESP32 durante sua construção, a versão apresentada é a versão final.

Os atuadores foram um problema constante durante os testes por serem peças frágeis e estarem em posições que precisam ser constantemente manuseadas e reposicionadas. Alguns vieram com problemas de fábrica e seus conectores eram delicados e facilmente quebravam. Isso atrapalhou a experiência, pois problemas poderiam ocorrer durante o procedimento de colocar e ajustar do protótipo. Seu conserto foi geralmente simples, mas requeria instrumentos especializados e não poderia ser feito imediatamente.

A Figura 4.2 apresenta a caixa com o Módulo de Controle. Pelas laterais saem os fios de alimentação dos atuadores e pela saída superior está o cabo de alimentação e dados.

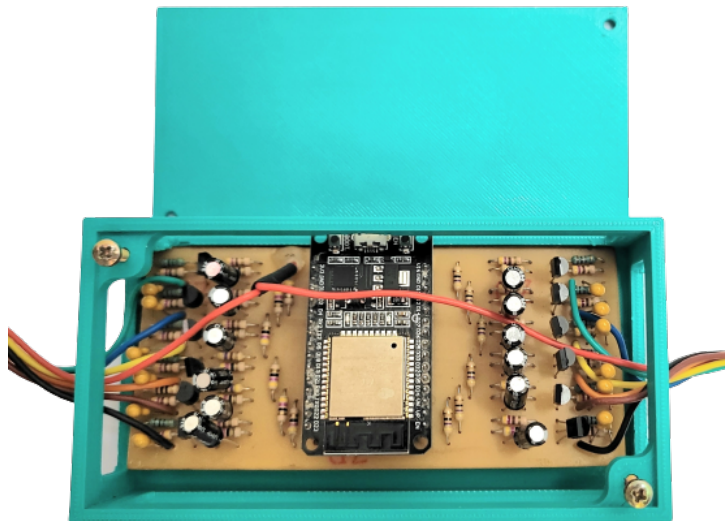


Figura 4.2: Módulo de Controle na caixa

Fonte: próprio autor

### 4.1.2 Protótipo vestível

Seguindo as instruções do modelo proposto foi possível conceber o sistema visto nas Figuras 4.3 a 4.4.



Figura 4.3: Usuário com o dispositivo montado, vista traseira

Fonte: próprio autor

Na Figura 4.3, é possível ver os fios saindo das laterais indo para os atuadores do torso e dos braços.



Figura 4.4: Usuário com o dispositivo montado, vista frontal

Fonte: próprio autor

Essa é a versão final do protótipo. A princípio, os atuadores seriam fixados nas alças permanentemente, mas isso poderia gerar um problema de posicionamento dependendo da altura da pessoa. A fixação removível dos motores também foi um problema, pois

foi preciso cuidado para escolher um método que não cobrisse o lado do motor que está em contato com o usuário, pois isso pode atenuar a vibração, um efeito indesejado. A Figura 4.5 mostra os dois modos de fixação.

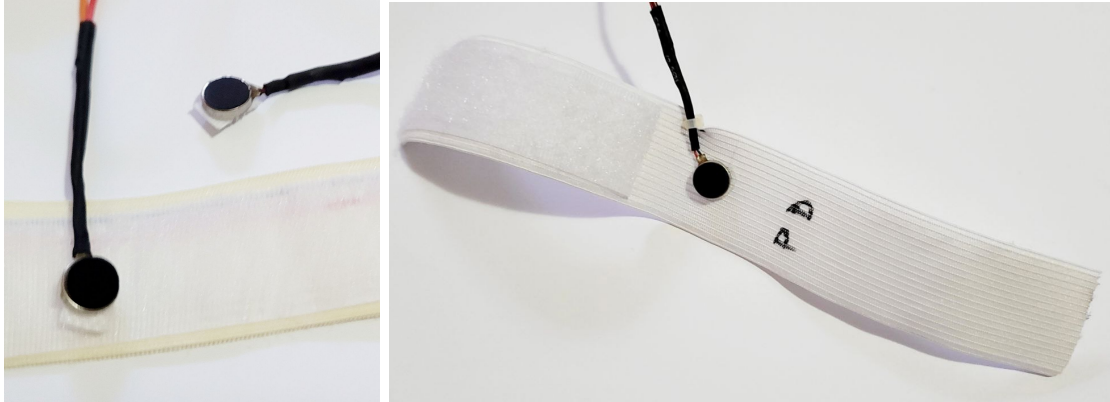


Figura 4.5: Modo de fixação dos motores

À direita, motores com velcro que podem ser encaixados em qualquer lugar do velcro da alça e, à esquerda, motor de um bracelete fixado permanentemente com cola quente e com os terminais presos por uma abraçadeira

Fonte: próprio autor

Outra decisão arbitrária foi o posicionamento dos atuadores da frente até um pouco abaixo da clavícula. Essa decisão foi tomada como uma contraproposta a outras implementações, pois esse modelo pode causar desconforto em pessoas com seios, tanto na utilização da tecnologia quanto no posicionamento. Para evitar qualquer problema, desde o princípio foi considerada a abordagem onde os atuadores da frente ficariam localizados na altura indicada. O protótipo final cabe em uma caixa de medidas  $21 \times 8,5 \times 18 \text{ cm}^3$ , sendo fácil de locomover.

Para geração das medidas básicas dos fios e dos elásticos, foi considerado um usuário de 1,79 m e um usuário de 1,50 m. Os fios foram considerados percorrendo o caminho desde o Módulo de Controle, percorrendo todos os atuadores precedentes, até sua localização adicionada de uma margem entre 5 a 10cm. Isso foi escolhido para evitar o excesso de fios, cada lado tem uma fonte comum, que o fio de alimentação Vcc compartilhado por todos os atuadores. Durante a implementação, no entanto, com a adição de um pequeno enxerto saindo da fonte comum, os longos fios não foram necessários e ficaram folgados. Por isso, nas figuras em que há usuários usando o projeto é possível ver os fios enrolados.

### 4.1.3 Usabilidade do protótipo

Durante as entrevistas, foi verificado um tempo de até cinco minutos para montagem e dois minutos para desmontagem. Durante o começo, os principais fatores para um tempo

superior a este eram a falta de procedimento e posicionamento incorreto, e para isso foi criado uma sequência de passos para montagem:

- Encaixar as alças no cinto, conferindo se estão no lado certo;
- Encaixar o cinto no usuário, pedindo a este para ajustar o tamanho;
- Passar as alças, indicando onde cada uma deve ser encaixada, garantido que a altura do velcro interno cobre bem os ombros e passa um pouco da clavícula;
- Passar a caixa por trás do cruzamento da alça nas costas;
- Ajustar todos os atuadores do torso;
- Ajustar todos os braceletes.

Nesse procedimento, é importante observar o posicionamento dos atuadores dos ombros para ficarem bem alinhados ao meio, e os atuadores da frente e das costas devem ficar no limite do velcro. Essa decisão será justificada na seção a seguir sobre os resultados da entrevista sobre sensibilidade. Sobre a satisfação dos usuários a respeito do protótipo, este foi bem recebido pelos participantes. O pouco tempo necessário para montar e desmontar foi elogiado, permitindo testes com múltiplos usuários no mesmo dia. O rigor no método de montagem facilitou o processo para voluntários que não conheciam a pesquisa, evitando desgastes e perda de tempo.

No entanto, algumas melhorias foram necessárias até alcançar o protótipo apresentado. As medidas atenderam o propósito geral de se encaixar em várias pessoas, mas houve exceções: a primeira versão do bracelete do braço era muito estreita e causou desconforto em alguns usuários, enquanto que o tamanho mínimo das alças foi insuficiente em alguns usuários, nesses casos ficou frouxo e a pessoa não sentiu a intensidade diretamente na pele. As alterações feitas para atender estes casos foram o aumento de todos os braceletes e aumento do velcro interno de encaixe das alças no cinto. Além disso, observa-se que a proposta atual é focada em adultos a partir de 1,50 m de altura, portanto o protótipo não fica ajustado em pessoas menores, incluindo crianças.

No início, a seleção do lado do velcro não foi considerada na montagem e isso gerou muitos problemas. O lado áspero causou incômodo nos pulsos ou na região dos ombros ao fazer contato direto, além de prender ocasionalmente em tecidos, causando danos. O posicionamento das abraçadeiras, que foi feito no início sem critérios, também foi criticado, pois ficava res à pele, deixando marcas. Na versão final, o velcro foi reposicionado para sempre estar com o verso macio direcionado para o usuário e as abraçadeiras sempre ficam presas para o lado de fora. É preciso cuidado para deixar o motor justo sem causar incômodos

#### 4.1.4 Sensibilidade aos atuadores

Esta seção foi subdividida seguindo as perguntas propostas em Subseção 3.1.4. Para uso do sistema e elaboração de efeitos hápticos com a interface vestível, é preciso compreender quais níveis de intensidade de vibração podem ser diferenciados pelo usuário, qual a melhor localização dos atuadores nos braços, se há diferença dependendo do posicionamento, por exemplo, com as palmas para cima ou para baixo, e considerar essa resposta no contexto de um jogo para computador, se é possível criar sequências que envolvam múltiplos atuadores e que gerem sinais coerentes entre si para o usuário, e, por fim, como se dá a interação entre tecidos de roupa e a vibração.

##### Níveis de intensidade diferenciados

Como o propósito era apenas validar o sistema em detrimento do seu original, não foi feita uma análise quantitativa dos valores, apenas observações qualitativas. Com 8 níveis, os usuários raramente sentiram o nível 1 e em valores maiores que 2 falharam muitas vezes em diferenciá-los entre si. Em média, os participantes testados nessa etapa sentiram 3 níveis distintos (0, 2 e 7), corroborando com os resultados obtidos por Alexandre [23]. Houve casos em que candidatos foram capazes de notar mais níveis, mas, para o intuito geral do projeto de criar um jogo com comunicação háptica que seja compreendida pela maior parte das pessoas, decidiu-se considerar apenas os valores que foram mais facilmente diferenciados entre si.

Um fenômeno não compreendido durante essa etapa era o participante apontar uma variação decrescente quando o sinal era crescente entre 5 e 6 ou 4 e 6, e vice-versa. Não se identificou a causa desse evento.

Ao testar com pessoas ouvintes, os resultados foram enviesados pelo som da vibração. Mesmo sem perceber pelo tato diferença de vibração, os participantes conseguiam identificar uma mudança para um som mais agudo e grave, principalmente ao testar os atuadores do torso. Como o som é capaz de distorcer a percepção do indivíduo à sua própria sensibilidade, esses resultados não foram considerados na avaliação dos níveis a serem utilizados.

Testando os atuadores do pulso, percebeu-se que estes eram mais sensíveis a níveis baixos que todos as outras localização, sendo capazes de identificar e diferenciar o nível 1. Por padronização, o nível 1 não foi usado nesta pesquisa por estar limitado a apenas esta localização.

É importante ressaltar que este estudo foi superficial, com foco exclusivo para compreensão das limitações de intensidade para desenvolvimento dos efeitos do jogo. Um estudo aprofundado com mais voluntários poderia prover compreensão melhor do nível de inten-

sidades capazes de serem diferenciadas, testando também com pessoas ouvintes, usando fones com cancelamento de ruído para evitar o problema relatado, por exemplo, aumentando a base de voluntários e sendo fonte de compreensão da diferença de sensibilidade entre pessoas surdas e ouvintes.

Essa etapa não considerou o público obeso ou avaliou possível desconforto que a intensidade mais forte pode gerar na pele

### **Localização dos atuadores nos braços**

A tese inicial sobre localização dos atuadores propunha preferência pelo lado do braço com menor proporção de gordura corporal, sendo menos propício a abafar a vibração, e sua comprovação ou não foi a razão desses testes.

Durante a avaliação, foi observada variação da sensibilidade no braço dependendo da posição em que este estava, seja esticado ou retraído, com as palmas para cima ou para baixo. Foge da proposta deste trabalho compreender cada uma dessas variações e posições ótimas, mas, após observação deste fenômeno, foram encontradas referências na medicina que elaboram sobre a ideia [28].

Comprovando este fato, somadas a experiência dos participantes e os estudos, a proposta inicial foi descartada e as posições preferidas para cada um dos atuadores estão apresentadas na Figura 3.10.

### **Implementação de sequências**

Os testes com sequência foram feitos nos primeiros voluntários apenas com a onda, que foi a primeira função a ser implementada, e, após a conclusão do editor, este também foi adicionada a essa etapa. O efeito onda é uma função onde um atuador é acionado por vez, passando por todos os atuadores de um pulso para o outro, a sequência exata é pulso, antebraço, braço, tórax, ombro, costas de um lado e a sequência inversa, começando pelas costas, para o outro lado, como uma onda percorrendo todos os atuadores. Uma versão reduzida da onda seria a execução deste comportamento com apenas alguns atuadores.

Nos testes de sequência com a onda, o fenômeno foi explicado de antemão, causando viés nos voluntários. Como um efeito que envolve todos os atuadores, também é mais fácil compreender sua sequência. Dessa forma, o efeito foi compreendido com uma unidade, mesmo que essa experiência tenha sido descartada. No entanto, uma observação foi feita sobre a alteração da frequência: mesmo executando o mesmo efeito, quando aplicado com períodos menores e logo mais rápidos, há uma sensação latejante de ansiedade e expectativa. Essa percepção foi valorizada para o desenvolvimento dos efeitos do jogo.

Os testes considerados para a experiência foram feitos apenas nos braços, restringindo o espaço para compreender a sequência. As sequências feitas eram uma implementação



curta da onda com apenas três etapas (pulso, antebraço e braço) e duas variações: com propagação e sem. Por propagação, entende-se como o efeito de quando um atuador está no máximo, o próximo da sequência está em um valor inferior, criando expectativa, e o atuador anterior está com o mesmo valor inferior. Além disso, variações foram feitas alterando a ordem, subindo ou descendo o braço, e a frequência.

Desta etapa, as observações relevantes obtidas foram:

- Em todas as variações, a distância entre os atuadores do braço foi grande o suficiente para gerar dificuldade de compreensão como um efeito contínuo. Os sinais foram recebidos como pontos isolados que variavam de intensidade;
- Como o teste foi realizado com um voluntário surdo, este descreveu o sinal como uma escada, quando o efeito desejado se assemelhava mais com uma rampa ou onda em si;
- Aplicar a ideia de rampa era difícil pela baixa sensibilidade aos diferentes níveis, e pelo modelo de controle de PWM proposto não ter suporte para este comportamento, portanto foi vetada;
- Quando a frequência era alta, o atuador central localizado no antebraço geralmente passou despercebido, parecendo um efeito entre pulso e alto do braço, outro efeito indesejado;
- No caso da sequência com propagação, a propagação não foi percebida.

Em resumo, a ideia de sequências usando múltiplos atuadores com ativação em cascata foi descartada nesta implementação de efeitos hápticos.

Adiciona-se aqui também sobre a experiência de explicar os procedimentos e testes feitos em LIBRAS. Mesmo em uma língua oral, explicar a granulação de um atuador ou a mudança de nível e o padrão que é formado é complicado sem auxílio visual, seja por meio da tela do Editor mostrando a evolução de um padrão ao longo do tempo ou por meio de gesticulação. A colaboração de todos os envolvidos foi essencial.

## **Interação tecidos e motores**

Este teste foi feito recorrentemente e persistiu também durante a aplicação do jogo.

Um problema percebido desde o começo foi a propagação de vibração pelos motores fixados pelo velcro das alças. Isso acontece, pois estes compartilham a mesma superfície de contato e quando a intensidade é forte, causam um sinal no resto do velcro. Esse efeito é mais proeminente no velcro áspero que é rígido do que no velcro macio que abafa o efeito. Pensou-se em apenas partir os pedaços de velcro, interrompendo a propagação, mas, na

aplicação, apenas a fonte do sinal e o ponto mais forte é relevante, pois foi elaborado um método para execução de um sinal por vez.

Isso também realçou a importância da localização dos atuadores do torso. A princípio, a faixa toda era usada para localizar os motores, mas pelo motivo acima isso foi desencorajado, pois quanto mais próximos, mais fácil era para o usuário confundir os atuadores. Um outro evento que corroborou com a proposta foi uma confusão constante entre os atuadores do torso quando aplicados em jogos. Quando o atuador dos ombros estava levemente para a frente do ombro, passando do ponto ideal, rapidamente surgia uma confusão entre este e o do peito, enquanto que quando para trás, era confundido com o atuador das costas. Por mais que no jogo os efeitos entre estes atuadores sejam muito distintos, o fenômeno atrapalhou a experiência.

Portanto, o propósito da faixa de velcro para permitir diferentes alocações foi descartado, sendo seu uso focado em fixar os atuadores da frente e de trás no limite do mesmo, e o do ombro localizado o mais centralizado possível na pessoa. Todos distantes o suficiente entre si para evitar confusão. Por esse e outros motivos previamente listados, a implementação final incluiu apenas velcro macio para ambas as alças.

Sobre tecidos de roupa em si e os motores, percebeu-se que os tecidos conduzem vibração, mas geralmente esse efeito é pouco perceptível se os motores estiverem justos a pessoa. Esse fenômeno foi mais observado em casos que os tecidos eram muito leves, mas não atrapalhou o suficiente para gerar mudanças de projeto.

## **4.2 Elaboração de efeitos hápticos**

O desenvolvimento de cada sinal influenciou o procedimento do sinal seguinte, pois sua construção foi feita de maneira colaborativa e gradual, partindo dos que pareciam mais fáceis de serem explicados e elaborados para os que pareciam mais difíceis de se explicar visualmente e sensorialmente.

Durante esse processo, imaginaram-se as sequências hápticas como uma linguagem sensorial, onde a posição, intensidade e padrão provém um significado. Como o jogo não tem efeitos sonoros, os efeitos hápticos são parte fundamental da experiência e foram elaborados com cuidado para serem coerentes com o jogo e até com os sinais sonoros dos quais se originaram.

### **4.2.1 Luzes trêmulas**

O som das luzes trêmulas pode ser ouvido no jogo quando o jogador fica abaixo das luzes do teto e pode ser descrita como um zumbido contínuo. Foi sugerido que fosse uma

sequência localizada nos atuadores dos ombros, Figura 4.6, pois estes apontam para cima e podem ser mais facilmente associados com as luzes.

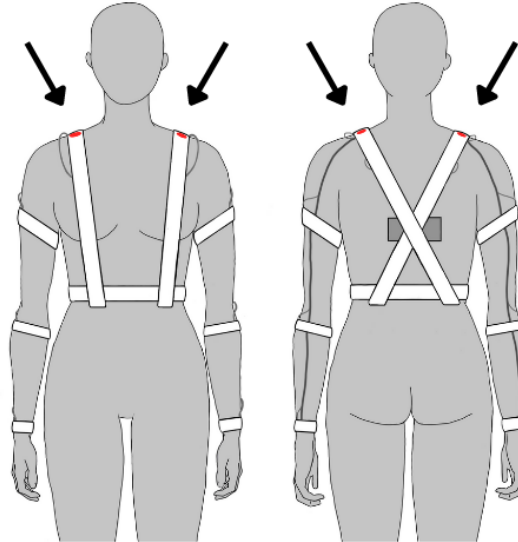


Figura 4.6: Atuadores usados no efeito luzes trêmulas marcados em vermelho

Fonte: próprio autor

A sugestão inicial foi uma sequência onde ambos os atuadores recebem uma intensidade de 4 por um intervalo inferior a um segundo. Foi uma proposta bem recebida e como as luzes piscam no jogo, é um sinal relacionável com essa ondulação de intensidade.

No entanto, após testes de outros sinais, adicionou-se uma assincronia entre os ombros: um ombro é ativado, logo o outro, e o ciclo se repete mais uma vez e para. A mudança também foi bem recebida, causando um sentimento maior de confusão e ansiedade pelo sinal pulsante, e esse foi estabelecido como o sinal final para o protótipo do jogo.

A versão final ficou com duração final de 1,5 segundos, com período de 0,5 segundos, a descrição está na Tabela 4.1, os módulos não citados permanecem em 0 durante todo o processo.

Tabela 4.1: Sequência para efeito de luzes trêmulas

Módulo	Instante 0	Instante 1	Instante 2
m5	2	5	2
m8	5	2	5

Fonte: próprio autor

A Tabela 4.1 descreve o comportamento dos atuadores no efeito. Os atuadores estão dessincronizados com intensidades possíveis de serem diferenciadas.

## 4.2.2 Nervosismo

O sinal de nervosismo pode ser engatilhado pela passagem do tempo ou por circunstâncias perturbadoras durante o jogo que podem aumentar um estado de estresse, e alcançar um nível de estresse pode levar a uma comportamento diferente do jogador, como uma respiração audível ou movimento oscilante da visão do jogador. No caso desta implementação, decidiu-se por apenas efeitos hápticos para representarem essa perturbação.

Foi difícil de explicar o motivo e sentimento do efeito. No início, foram usados termos como ansiedade, preocupação, estresse. Durante este processo, os voluntários apontaram como um bom sinal em LIBRAS: a palavra nervosismo. O sinal desta palavra é feito sobre a região interna do antebraço, onde há dois atuadores localizados em cada lado, apresentado na Figura 4.7.

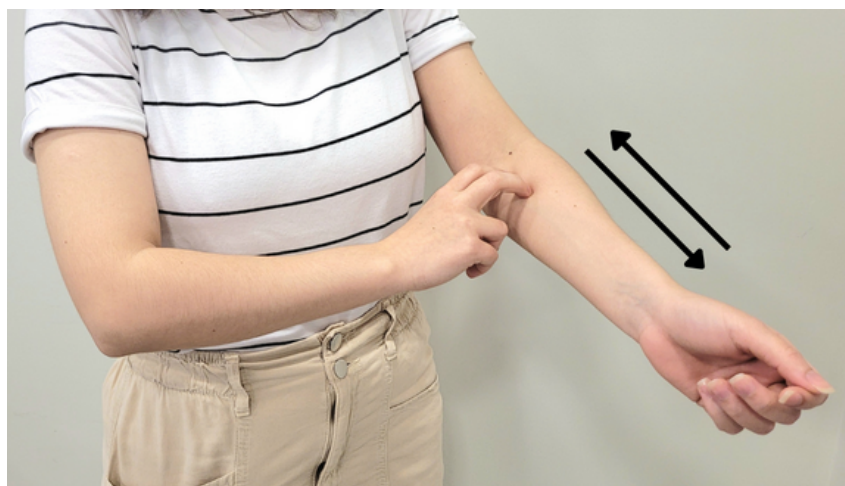


Figura 4.7: Representação do sinal de nervosismo em LIBRAS

Fonte: próprio autor

Até este momento, não havia efeitos que usassem esses atuadores então decidiu-se que, combinando com o termo em LIBRAS, o efeito háptico seria feito no mesmo local, como mostra a Figura 4.8.

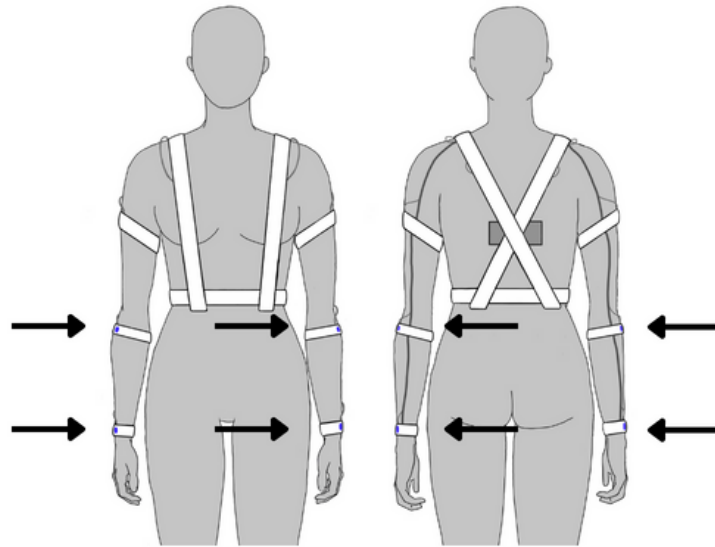


Figura 4.8: Atuadores usados no efeito nervosismo marcados em azul

Fonte: próprio autor

Com os atuadores definidos, começaram os testes com sequências. As primeiras propostas incluíam apenas longos pulsos na região. Essa abordagem não parecia evocar bem o sentimento e iterações foram feitas até se chegar no resultado atual: sequências de pulsação crescente. Esse sinal se assemelha a um batimento cardíaco, pulsos cada vez mais fortes com uma pausa abrupta.

O efeito foi definido com 1,8 segundos e período de 0,3 segundos. É um sinal rápido para combinar com as outras implementações e pelo design de todos os efeitos hápticos tentarem se ater a ideia de efeitos sonoros, que também são curtos nas aplicações apresentadas. A descrição final do efeito está na Tabela 4.2, com os módulos não citados em 0.

Tabela 4.2: Sequência para efeito de nervosismo

Módulo	Instante 0	Instante 1	Instante 2	Instante 3	Instante 4	Instante 5
m0	2	0	4	0	6	0
m1	2	0	4	0	6	0
m10	2	0	4	0	6	0
m11	2	0	4	0	6	0

Fonte: próprio autor

A Tabela 4.2 apresenta um comportamento uniforme de pulsação crescente. Cada iteração é mais forte que a anterior, tentando criar um sentimento de expectativa.

### 4.2.3 Localização do monstro

Durante o jogo, é possível localizar o monstro pelo ruído emitido por este, como colisões com a parede ou pegadas, que varia de intensidade dependendo da distância que está do jogador. Com isso, entendeu-se que o sinal deveria ser gerado dinamicamente a partir da distância e direção entre o monstro até o jogador.

Para essa aplicação, era fundamental atuadores capazes de referenciar as quatro direções: direita, esquerda, frente e costas. Para isso, foram definidos os dois motores da frente e das costas e os motores do alto do braço, totalizando seis, mostrados na Figura 4.9. Desde o planejamento do protótipo, os atuadores da frente e de trás já tinham esse propósito, mas os do braço foram escolhidos por estarem na mesma altura do outros atuadores e diminuir o salto necessário para o usuário assimilar que estão relacionados ao mesmo efeito.

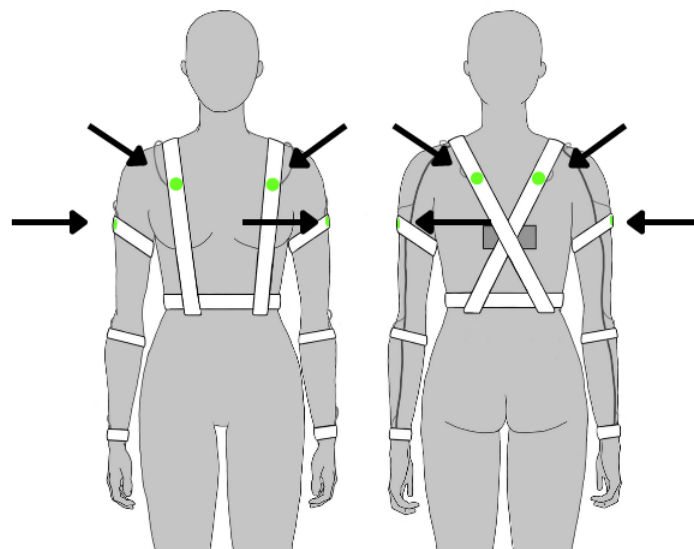


Figura 4.9: Atuadores usados no efeito monstro marcados em verde

Fonte: próprio autor

Essa configuração permite a implementação de até oito diferentes direções com uso simultâneo de atuadores. Mas essa abordagem foi evitada, optando pela versão simplificada com quatro direções. Essas versões são apresentadas na Figura 4.10, onde foi feita comparação das direções com os pontos cardeais.

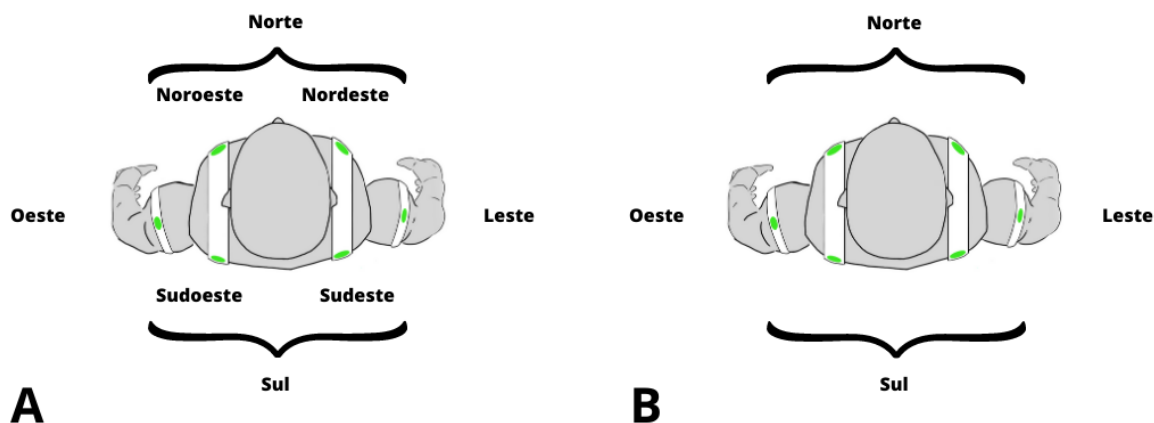


Figura 4.10: Relação entre atuadores e direção no efeito da localização do monstro, os atuadores estão em verde

Fonte: próprio autor

Na Figura 4.10, norte se refere aos dois atuadores do tórax e sul se refere aos dois atuadores das costas. A versão A mostra a implementação com oito direções e a versão B com quatro direções.

A abordagem com oito direções foi evitada, pois foi observado nos usuários dificuldade de assimilar atuadores ligados simultaneamente, como apontado nos testes de sequências hápticas da seção anterior. Houve voluntários que perceberam a diferença, mas não era o comportamento mais comum. O mais comum era ser notado após repetição e viés, quando o voluntário sabe o sinal que vai ser executado. Isso prejudicaria a diferenciação entre sinais como Norte, Nordeste e Noroeste. Portanto, foi descartada.

Essas foram as decisões tomadas para referenciar direção. Para explicar a distância, foram manipuladas as propriedades de duração e intensidade do sinal. No início, discutiu-se sobre ser um sinal pulsante, mas isso poderia requerer muita atenção do jogador, que precisaria contar a quantidade de pulsos ou observar a duração de cada um. Esse não é um efeito desejado, não se espera que o jogador precise de muita atenção e cuidado com cada detalhe, o foco é um produto mais imersivo e intuitivo, portanto a ideia foi rejeitada.

Sendo o sinal não pulsante, a proposta foi ser um sinal de pulso único com variações de intensidade e duração. Duas limitações foram impostas neste momento, definiu-se que quando o monstro está longe o sinal deveria ser fraco e curto, e quando estivesse perto deveria ser longo e forte. Definiu-se também que o fraco representa a intensidade 2 e o forte, 4, e o período curto seria de 0,1 segundos e o longo, 0,6 segundos. Trabalhando com um passo de 0,1 segundos para o período, há 3 níveis de intensidade e 6 períodos para serem combinados.

Para as opções intermediárias, inicialmente planejou-se misturar esses dois conceitos, usando todas as 24 possibilidades. Porém, essa implementação tem um problema sério de

usabilidade: como ordenar as sequências linearmente de forma coerente para o usuário? A sequência de intensidade 3 e 0,1 segundos vem antes ou depois da sequência com intensidade 2 e 0,4 segundos? Elaborou-se uma tentativa seguindo a lógica de distribuição eletrônica usando linhas diagonais para cortar uma tabela com todas as combinações, mas não atendeu aos requisitos esperados de usabilidade e foi descartada.

Por fim, estabeleceu-se que as duas propriedades deveriam crescer juntas e serem redundantes em significado, representando a mesma coisa. Isso permite que o usuário não precise dos dois dados para ter uma compreensão da distância, ainda que seja uma informação incompleta. A proposta de usar os níveis de 2 a 4 também foi alterada, pois apesar de tecnicamente distintos, eram valores sensorialmente muito próximos e insuficientes para expressar significado, decidiu-se por usar apenas as intensidade 2 e 7. As combinações geradas estão apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Relação entre distância entre jogador e monstro e as propriedade de período e intensidade

Distância entre jogador e monstro	Longe					Perto
Período (segundos)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Intensidade	2	2	2	2	7	7

Fonte: próprio autor

Na Tabela 4.3, as medidas são arbitrárias, perto e longe, pois isso depende do tamanho do mapa e algumas adaptações foram feitas para o jogo desenvolvido.

O uso dos níveis 2 e 7 poderia atrapalhar a experiência, pois desejava-se deixar a intensidade mais alta apenas para o efeito de susto. Para evitar isso, foi proposto um tratamento ao sinal que é abordado na seção a seguir.

Um problema da implementação que só foi percebido tardiamente foi que o sinal em execução não se adéqua à mudança de direção do jogador. Se um efeito tocar à direita, e o usuário se virar para este lado antes do fim da execução, o sinal continuará tocando à direita, mas não representa mais a direção do monstro. Isso ocorre, pois, após a requisição ser feita, o sistema do jogo não busca por atualizações ou mudanças no jogador, apenas aguarda e prepara a próxima requisição.

Isso é um problema de identificação do sistema do jogo e pode ser uma informação enganosa para o jogador. No entanto, após descoberto, não foi um problema explorado, pois como sinal é curto, no máximo 0,6 segundos, não causou problemas de compreensão, mas pontuou uma questão a ser melhorada em futuras implementações.



#### 4.2.4 Susto

O efeito de susto é engatilhado quando o jogador está muito próximo ao monstro. Foi um efeito fácil de se definir: todos os atuadores deveriam ser ativados simultaneamente, simulando um susto. Para incrementar esse sinal, foi feita uma versão onde a sequência com todos os atuadores no máximo era precedida por uma sequência com todos os atuadores na intensidade 3, quase metade da potência máxima. Essa versão foi descartada por criar uma breve expectativa antes do susto em si, diminuindo seu efeito final.

A versão final começa com a intensidade máxima, sem nenhum aviso prévio, e ao fim brevemente cai para a intensidade média, 3, suavizando a parada do efeito.

O efeito conta com duração de 1,2 segundo, com 0,4 segundos de período e 3 estados, como está na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Sequência para efeito de susto

Módulo	Instante 0	Instante 1	Instante 2
mx	7	7	3

Fonte: próprio autor

Na Tabela 4.4, mx se refere a todos os atuadores.

#### 4.2.5 Observações

O desenvolvimento de efeitos hápticos foi um processo muito esclarecedor sobre o projeto em si. Foram semanas criando propostas, fazendo e refazendo sinais, incrementando versões antes completas, e alterando tudo de novo com o desenvolvimento do jogo.

Durante o processo, houve uma constante comparação entre os efeitos hápticos e os efeitos sonoros. Os efeitos sonoros se caracterizam por serem curtos, muitos duram menos que um segundo, com variações de intensidade para expressar uma informação. Tentou-se emular essa proposta com efeitos hápticos, mas foi uma tentativa falha.

O sistema atual tem limitações de vibração e a pele humana tem limitações de sensibilidade. Não há motivo para utilizar todas as vibrações possíveis quando a maioria dos voluntários não conseguiu perceber a diferença. A principal comunicação aconteceu não no domínio da intensidade, mas no domínio do tempo, criando padrões para transmitir as informações.

Esse foi um método muito mais efetivo, por outro lado entra em conflito com a proposta de sinais curtos. Sabe-se, como estudou Alexandre [23], que é preciso um tempo mínimo de vibração para que o usuário identifique o efeito vibratório, mas, considerando um ambiente não restrito, como o contextos dos testes, mas sim um ambiente estressante

onde o foco é dividido também com efeitos visuais, como o jogo, não é boa prática usar o limite inferior de percepção para elaboração de sequências. Usar períodos que geralmente não vão ser percebidos ou cria efeitos longos que entram em conflito com a dinamicidade do jogo não é interessante. Não se deve, por exemplo, um efeito visual de meio segundo seja acompanhado por um efeito háptico de um segundo, é preciso que ambos coincidam em duração e sejam perceptíveis.

Esse dilema foi muito impactante em todo o processo e limitou como os efeitos foram criados, além de ajudar a elaborar possíveis melhorias para continuações da pesquisa.

Durante o desenvolvimento, os efeitos hápticos, excluindo o susto, acabaram por não compartilhar os mesmos atuadores entre si, apresentado na Figura 4.11. Isso não foi uma decisão planejada, aconteceu naturalmente, a ordem de elaboração foi: luzes trêmulas, localização do monstro e nervosismo. Essa construção foi útil também para ajudar a guiar o jogador durante a experiência, isso aborda a questão da redundância do sistema e melhora a usabilidade.

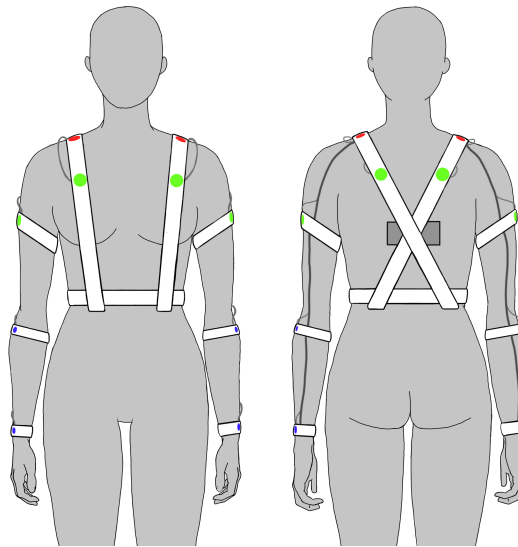


Figura 4.11: Atuadores divididos por efeito em que são usados

Vermelho para luzes trêmulas, verde para distância do monstro e azul para nervosismo

Fonte: próprio autor

Ao fim de todo o procedimento, houve um momento também onde um dos voluntários surdos recebeu instruções sobre o funcionamento da interface gráfica. Após as explicações da funcionalidade de cada botão, o usuário teve alguns instantes para desenvolver um sinal, testar cada funcionalidade. Foi um momento proveitoso que validou o objetivo da interface de ser fácil de manusear, garantiu que em poucos minutos, o usuário fosse capaz de compreender cada recurso e pudesse criar coisas significativas para si. Isso pode ser

interpretado como um caminho para trabalhos futuros, onde a comunidade surda também seja agente de criação e desenvolvimento além de ser peça de estudo da obra.

### 4.3 Adição de efeitos hápticos no jogo

Com os efeitos prontos, foi possível começar o processo de adição desses no jogo. Essa etapa foi caracterizada por tentativas de balanceamento em busca de um jogo que não seja irritante por repetir demais um mesmo sinal, que seja intuitivo em repassar as informações pelo tato, que proponha alguma dificuldade com o monstro e que esteja em um meio termo entre o fácil e o difícil. No fim, busca-se elaborar uma experiência proveitosa e divertida com os efeitos hápticos. A ordem de execução foi luzes trêmulas, localização do monstro, nervosismo e susto.

Ao adicionar as luzes, dois problemas surgiram: frequência de repetição do sinal e distância para engatilhar o evento. O problema da distância é que não deveria ser tão inferior que dependesse que o usuário estivesse em um ponto específico para acioná-lo e, simultaneamente, não deveria ser abrangente o suficiente para ser ativada em qualquer posição. A versão final considerou um raio de distância arbitrário abaixo das luzes, como visto na Figura 4.12, para restringir esse efeito.

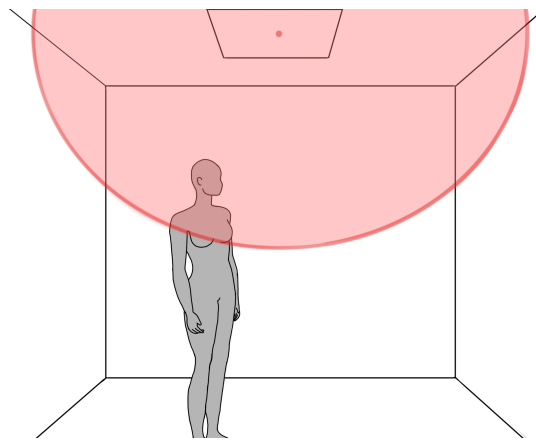


Figura 4.12: Área de gatilho para efeito luzes trêmulas

Apenas se o usuário estiver dentro do raio proposto, o efeito é ativado

Fonte: próprio autor

A decisão de delimitar o espaço diminuiu as chamadas sequenciais do trabalho, mas não foram suficientes para resolver o problema da frequência de repetição. Como um efeito de 1,5 segundos, o efeito não pode ser gerar uma requisição atrás da outra, senão o efeito nunca executa um ciclo completo a não ser na última execução, além de ser um comportamento que incomoda o jogador e pode atrapalhar outros sinais. A solução foi

adicionar um contador que inibe outras requisições do mesmo tipo até que o tempo alcance o zero, quando é reiniciado para o valor máximo. Na versão final, foi decidido o tempo de 4 segundos como suficiente, gerando uma brecha de 2,5 segundos entre requisições, caso não seja interrompido por outros sinais.

Um detalhe de implementação que não foi corrigido e gerou reclamações foi a falta de sincronização entre as lâmpadas piscarem e o efeito háptico. Isso não foi possível até conclusão da pesquisa pelos métodos de implementação do objeto de lâmpada.

A seguir foi adicionado o efeito do monstro. Como o efeito pode variar entre 0,1 segundos e 0,6 segundos, seria possível criar requisições a cada um segundo, no entanto, tantos efeitos poderiam ser uma sobrecarga além de adicionarem pouco ao jogador: se o monstro está a frente do jogador, aquele provavelmente estará nessa mesma referência pelo próximo segundo.

Decidiu-se adotar dinamicidade no processo das requisições. Assim como as propriedades de intensidade e duração, o período de repetição também depende da distância, quanto mais longe estiverem um do outro, mais demora para o sinal se repetir.

Assim, quando monstro está perto, o sinal se repete com mais frequência e é mais fácil localizá-lo. Apesar de esperado, não é interessante para um jogo de terror facilitar tanto o processo de desviar do inimigo, então decidiu-se arbitrariamente adicionar uma distância mínima para percepção do monstro. Se a distância for menor que a distância mínima, não há nenhum sinal, e o jogador deve recordar o último sinal recebido até conseguir se distanciar o suficiente para voltar a receber sinais.

Isso incrementou a experiência, adicionou dificuldade, e tornou o susto mais emocionante, pois cria expectativa ao avisar o usuário que este está muito próximo do monstro e a qualquer momento pode encontrá-lo. E, nesse instante pré-susto, o único outro sinal que usa potência máxima dos atuadores, a localização do monstro, está desligada, aumentando o impacto do efeito de susto, se vir a ocorrer.

Essa combinação de atributos está explicada na Figura 4.13.

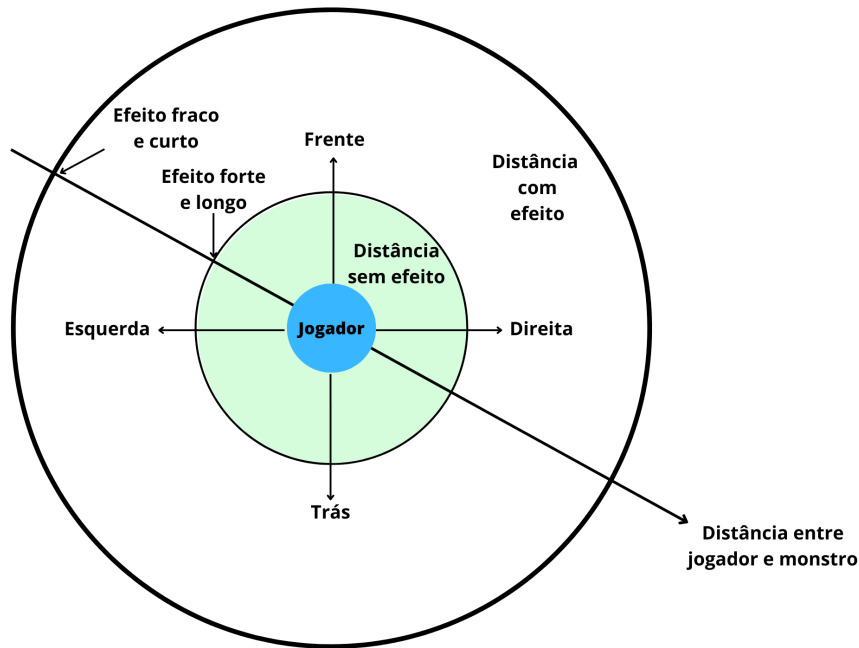


Figura 4.13: Diagrama sobre funcionamento do efeito do monstro

Quando o monstro está longe do usuário, o efeito háptico é curto e rápido, e quando está perto, forte e longo. Observa-se que a localização do efeito depende da direção do monstro em relação à frente do usuário

Fonte: próprio autor

A seguir, o efeito de nervosismo foi acrescentado. Sua forma, apesar de associar ao nervosismo, não era suficiente para condizer com sua intenção e seu gatilho também foi tornado dinâmico. A princípio, este é chamado a cada 10 segundos, e a cada requisição esse tempo de espera é reduzido em 1 segundos até o mínimo de 4 segundos. Assim, se torna um lembrete háptico da passagem de tempo no labirinto e pode criar uma ambientação mais estressante para o jogador. Por último, o susto foi adicionado e é engatilhado quando o usuário chega muito próximo do monstro.

O processo de balanceamento não foi simples, encontrar o ponto ideal entre as mecânicas, tentar prover ideias intuitivas e usar um sistema háptico, incomum em jogos, não foi um objetivo alcançado plenamente e deixou brechas para serem corrigidas em versões futuras. Mas ainda foi possível alcançar condições e regras de acionamento que puderam agradar os voluntários, principalmente o uso único dos atuadores para um efeito. Como o foco é testar o sistema háptico em jogos, é importante que essa etapa exista ao mesmo tempo que se sabe que não é o foco deste trabalho, portanto não foi tão aprofundado e definido quanto uma implementação de jogo deveria ser.

### 4.3.1 Interação entre efeitos

Um evento recorrente com múltiplos efeitos ativados por gatilhos diferentes é a sobreposição destes. A implementação inicial propôs que uma nova requisição sempre deve sobrepor a anterior, mesmo que interajam com atuadores diferentes. As vantagens desse modelo são a unicidade de efeitos, logo o usuário não é sobrecarregado por múltiplos efeitos por vez.

Uma outra alternativa de implementação seria o uso de um programa de mesclagem de sinais quando uma requisição surge enquanto outro sinal já está sendo executado. Para realizar essa abordagem, seria preciso um programa no servidor para fazer a combinação de sequências, registrando a entrada de cada nova sequência e também os efeitos teriam que ser salvos com o mesmo período. Para adequar o banco de dados atual, os padrões poderiam ser refeitos se adequando a um período em comum.

Esses processos não seriam difíceis de serem implementados, mas trazem uma desvantagem já abordada anteriormente. Com as limitações de intensidade do sistema atual, é confuso para o usuário lidar com múltiplos efeitos simultaneamente em diferentes partes do corpo, considerando que é preciso compreender sua origem para saber seu significado, e talvez atentar ao padrão para saber os detalhes desse significado. Por esse motivo, manteve-se a ideia original e a alternativa foi descartada.

Com o modelo escolhido, os efeitos de luzes trêmulas e nervosismo ganharam uma nova função durante o jogo, atrapalhar a compreensão de onde está o monstro. Como só há um sinal por vez, as requisições se sobrepõe constantemente, podendo também distrair o jogador e atrapalhar sua compreensão sobre o último sinal do monstro recebido. Em particular, como o efeito de nervosismo se torna mais frequente durante o jogo, gera gradativamente mais interrupções.

Isso não foi recebido como um efeito negativo, questão que será explorada com mais detalhes na seção a seguir, pois incrementou a dificuldade do jogo, tornando a experiência algo além de um jogo de esconde-esconde com sinais hápticos. Pode-se comparar a construção com efeitos sonoros também. Em um jogo orientado fortemente ao áudio, a sobreposição de sons é normal e impede o jogador de compreender completamente todos os efeitos simultâneos, compondo a ambientação e dificultando o jogo.

Essa implementação está descrita por meio de um fluxograma na Figura 4.14

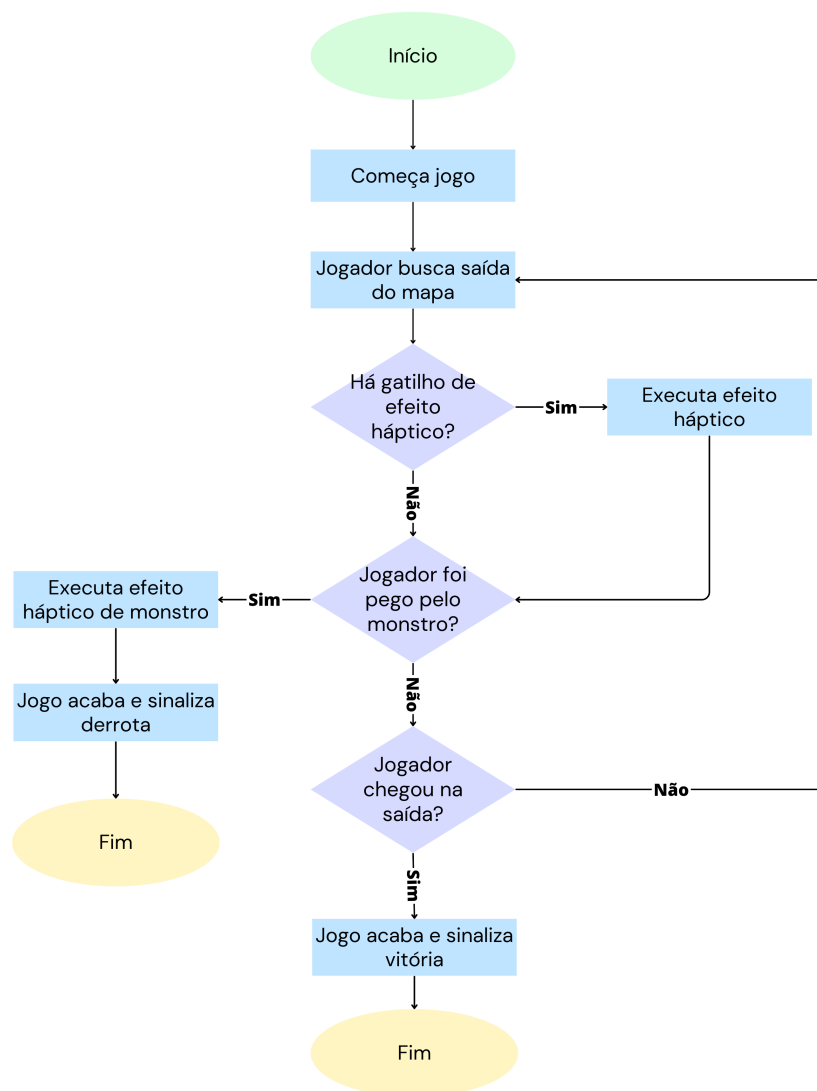


Figura 4.14: Fluxograma do funcionamento do jogo com efeitos háptico

Fonte: próprio autor

O jogo está constantemente checando as condições para ativar efeitos e o processo só é interrompido quando se alcança o fim do jogo, seja sendo por meio do encontro com o monstro, derrota, ou entrando na sala de saída, vitória.

Com maior detalhe, a Figura 4.15 apresenta o fluxo de execução dos efeitos e interação entre o jogo, o *Back-End* e o *Firmware*.

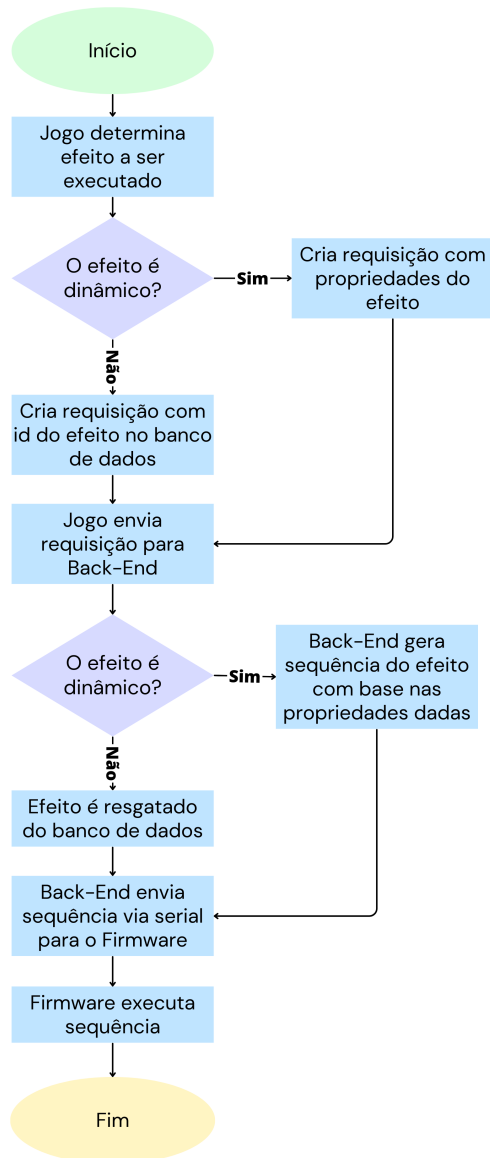


Figura 4.15: Fluxograma da execução de efeito háptico

Fonte: próprio autor

O jogo determina qual sinal será executado. A partir disso, confere se é dinâmico ou não, se não for pode preparar uma requisição apenas com o identificador do sinal, caso contrário precisa calcular as propriedades e inserir na requisição. O jogo envia a requisição e o *Back-End* trata. Este identifica se o sinal é dinâmico, se for, gera uma sequência, senão resgata a sequência do banco de dados e envia para o *Firmware*. O módulo de controle do *Firmware* recebe e redireciona para os *drivers*.



## 4.4 Teste do jogo com voluntários

No total, 11 pessoas testaram o jogo com pelo menos duas mecânicas implementadas, sendo três pessoas surdas.

Um pré-requisito não observado antes dos testes foi a necessidade do usuário de estar acostumado com o ambiente de jogos e o uso de teclado e mouse simultaneamente. Houve uma ocasião apenas que a pessoa que testou não estava acostumada com os controles e teve dificuldade com locomoção do personagem, mas isso não impediu que a pessoa usufruísse da ambientação e da mecânica háptica.

Os procedimentos para os testes foram mais simples que os testes executados nas etapas anteriores. O principal objetivo era observar se os voluntários conseguiriam jogar o jogo, atendendo a requisitos como compreender as mecânicas, ajustar seu comportamento a elas e sentir a experiência como imersiva. A Figura 4.16 apresenta um voluntário jogando.

O protocolo do procedimento era:

- Explicar o funcionamento do protótipo vestível;
- Explicar a ambientação e objetivo do jogo e como funciona a movimentação do jogador;
- Explicar cada uma das mecânicas, gatilhos, posição dos atuadores e significado;
- Montar o protótipo seguindo o passo a passo;
- Executar o jogo.

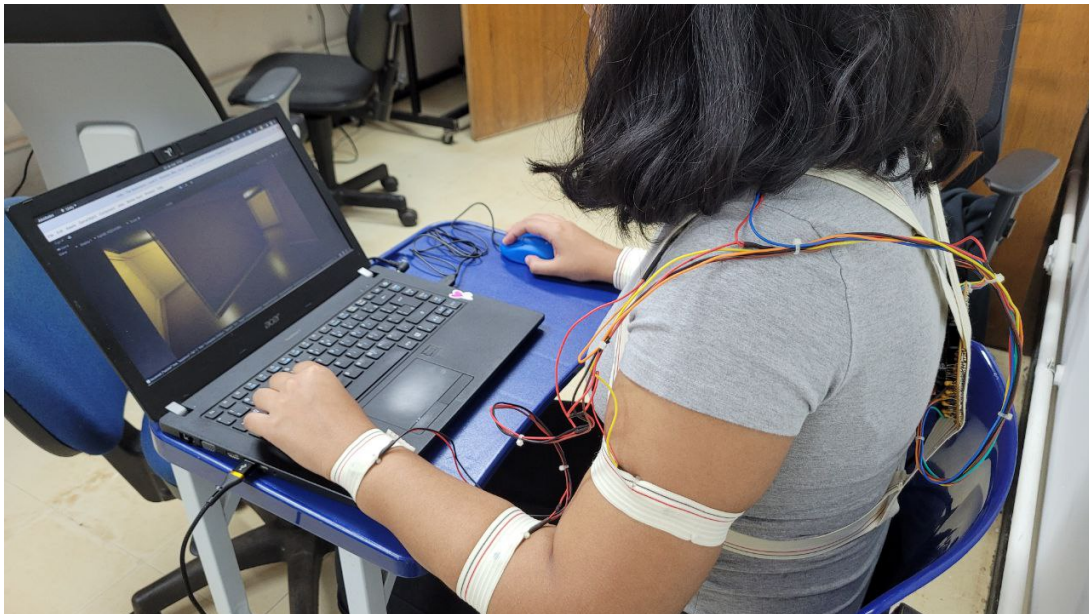


Figura 4.16: Voluntária jogando o jogo de terror elaborado com o sistema háptico

Fonte: próprio autor

Apesar da explicação, geralmente esta não foi suficiente para a compreensão do sistema. Os voluntários comumente precisavam de três a cinco rodadas-teste para se acostumarem com os múltiplos estímulos para o sentido do tato. Após essas rodadas, eram capazes de identificar os diferentes sinais e seus propósitos e buscar a saída, evitando o máximo possível o monstro. Pode-se dizer que esse comportamento descreve uma curva de aprendizagem abrupta, onde o jogador tem um entendimento súbito durante o jogo, e consegue encaminhar o jogo sem muitas dificuldades de um momento para o outro.

Uma das razões levantadas para esse fenômeno seria a confusão de sinais hápticos. Como não há nenhum tratamento para se adicionarem gradativamente no início, o jogo começa com várias eventos acontecendo simultaneamente, é difícil acompanhar e entender. As rodadas-teste permitem essa compreensão até que a mistura de sinais hápticos deixa de ser vista com estranheza, e passa a ser absorvida pelo usuário.

Um dos pontos de melhoria aqui seria um sistema de tutorial, permitindo do usuário usufruir e testar individualmente cada efeito háptico, para compreender seu significado além da descrição. Criar uma curva de aprendizagem menos drástica e amigável ao jogador, onde permita que este comece o jogo já compreendendo todos os fenômenos ao seu redor, e tenha uma experiência menos frustrante do que perder o jogo por não ter entendido bem suas regras.

Foi apontado também como o sistema de sobreposição de sinais criava uma ambientação mais estressante e ansiosa. Após a fase inicial de reconhecimento e compreensão do sistema, o modelo de sobreposição tem um papel de ditar o ritmo de jogo com as constantes mudanças, requerendo atenção constante do jogador e sendo parte fundamental da ambientação.

A latência entre a requisição do jogo e a execução do efeito háptico não foi medida, mas durante os testes com jogo não foi percebida, pois os efeitos hápticos não são sincronizados com efeitos visuais.

#### **4.4.1 Recepção detalhada dos jogadores surdos**

As pessoas surdas todas testaram a versão completa do jogo e puderam usufruir de todas as mecânicas existentes.

Após a fase de compreensão do jogo, todos puderam usufruir do sistema e deram opiniões que serão transcritas a seguir. Nathanael e Andressa, duas pessoas surdas, foram voluntários que participaram da etapa de elaboração dos efeitos hápticos. Apresenta-se a seguir os depoimentos de voluntários que testaram o sistema.

*“[...] Eu gostei muito de jogar no computador e de colocar o aparelho nos braços, eu consegui sentir os avisos como o susto, o nervosismo e os acontecimentos dos lugares que estavam nos jogos. Eu gostei muito, foi muito bom ver o desenvolvimento e o uso do*

*aparelho, auxiliou na informação visual, a vibração e a intensidade dela. Você me ajudou muito a abrir a cabeça e ver o uso do aparelho para jogos em que se encaixou muito bem, e dá para ser usado para filmes também. [...]* (Nathanael, 2023)

*“[...] Eu sentei e senti diversas vibrações sendo leves, moderadas e mais fortes, em que me avisava dos acontecimentos. Foi boa e divertida a experiência, eu fiquei ansiosa e animada, combinou muito com os surdos. Quando eu senti a vibração no braço direito, já associei que tinha algo chegando e eu precisava fugir do jogo, a fuga era difícil e sentia se ele aproximando de mim sendo pela vibração do braço direito ou esquerdo, quando vibrava os dois a tensão aumentava. Foi muito boa e divertida a experiência, gostei muito, muito obrigada. Que no futuro, essa tecnologia se desenvolva e melhore cada vez mais o sistema de vibração para surdos na área de jogos. [...]* (Amanda, 2023)

*“[...] Eu participei do projeto, foi muito interessante. Colocaram um aparelho nos meus braços, no tórax e nas costas, e pude sentir a vibração passando. O projeto combina muito com nós surdos, por termos o sentido do tato, conseguimos receber as informações pelos braços, pelas costas, pela frente, do lado direito e esquerdo. Foi muito bom, o projeto é importante para o surdo pois combina as vibrações, porque nós surdos não ouvimos, então as vibrações são como informações. Foi muito bom, muito importante e muito legal o projeto. Nos jogos eu tive um pouco de dificuldade porque quando vibrava eu me assustava e falhava algumas vezes, mas foi ótimo, foi muito importante. [...]* (Lourraynny, 2023)

*“Eu testei o jogo e senti a vibração, por exemplo, quando o monstro estava perto, eu senti a vibração no braço me perguntei se estava perto, não sabia se estava na frente, do lado ou atrás. Quando eu senti o monstro se aproximando tentei fugir, mas não consegui passar pelo caminho, o monstro já tinha chegado, mas eu não sabia. Eu senti o monstro se aproximando, senti a vibração, ele me pegou e então eu morri. Eu fiquei triste porque não senti a vibração do lado esquerdo, eu senti a vibração só do lado direito, então isso é algo que poderia consertar no jogo. Foi muito bom, eu gostei muito da experiência, gostaria de jogar de novo, sentir o monstro chegar e dessa vez ganhar o jogo. [...]* (Andressa, 2023)

Os comentários somados às observações feitas durante o experimentos ressaltam a percepção positiva do trabalho e como este foi capaz de atingir seu objetivo na transmissão de informação háptica. As pessoas envolvidas se sentiram empolgadas, principalmente após compreensão das mecânicas, e puderam aproveitar e se divertir com o jogo.

Nota-se o entusiasmo com a tecnologia, a implementação permitiu um tipo de dinamicidade incomum, e cativou os voluntários. Foi uma experiência inovadora, que além de propor uma nova forma de se vivenciar jogos, incentivou outras maneiras de pensar outros tipos de obras audiovisuais.

Em sequência, isso pode abrir questionamentos como pessoas surdas também poderiam aproveitar o sistema não pelo lado de experienciá-lo, mas criar com este. Sabe-se que pessoas surdas sentem o mundo em parte pelas vibrações [29], então tendo este conhecimento já de maneira prática, poderiam usar o protótipo para recriar vibrações, sinais e padrões que já conhecem do mundo real para o mundo digital com o sistema, não apenas para uso próprio, mas para a criação e produção de arte, em forma de jogo, experiência, filme.

## 4.5 Revisão dos resultados obtidos

A interface vestível é composta pelo módulo de controle dos atuadores com o protótipo vestível, composto por elásticos e velcro. O traje foi versátil e coube em pessoas com diferentes portes físicos, mas apresenta limitações nos casos extremos, crianças e pessoas altas ou obesas. Foi observado que o uso de velcro deve ser feito com cuidado, pois o lado áspero além de incomodar a pele, comumente fica preso a tecidos e cabelo. O modelo atual não permite que o usuário monte o sistema em si mesmo, mas é prático e o processo de montagem mais desmontagem demora menos de 10 minutos.

Sobre os resultados de sensibilidade, observou-se que três intensidades, das sete disponíveis, foram diferenciadas pela maior parte dos usuários. É preciso um estudo qualitativo para compreender a predominância desse resultado numa população maior, e também qual seria a intensidade máxima a ser usada sem causar desconforto ao usuário, e também as diferenças de sensibilidade entre áreas do corpo distintas. O modelo atual não permitiu a criação de sequências de atuadores, padrões onde um atuador é acionado após um outro, como um movimento. Notou-se também que há diferenças de sensibilidade provocadas pela posição dos braços, palmas pra cima ou para baixo, e foi observado a melhor localização dos atuadores para o caso em estudo, quando o usuário está jogando em um computador usando *mouse* e teclado. E, por fim, os usuários relataram que o velcro da região das costas ao tórax era capaz de transmitir vibração, um comportamento indesejado. Isso não foi visto com roupas, provavelmente por se tratarem de tecidos mais macios e que abafam a vibração. Destaca-se que, ao testar pessoas ouvintes, é preciso impedir que essas ouçam o barulho dos atuadores, pois isso pode enviesar a avaliação.

Na criação de efeitos hápticos, a interação com a comunidade surda incrementou a experiência, pois são pessoas acostumadas a lidar com a vibração no dia a dia. Os efeitos obtidos foram possíveis de se relacionar com seus gatilhos físicos e, quando cabível, se relacionar com um sentimento, como tensão e nervosismo.

Por fim, nos testes com jogos, os jogadores a princípio tiveram dificuldade se acostumar com múltiplos sinais ocorrendo rapidamente, mas, após se acostumarem, acharam

os sistema intuitivo e fácil de se lidar. Isso comprovou que o sistema foi capaz de trazer imersividade à experiência, principalmente para pessoas surdas, e foi capaz de transmitir informações relevantes para o jogo, como a direção do monstro, sendo mecânica fundamental durante o processo.

# Capítulo 5

## Conclusão

Este trabalho apresentou a implementação de um sistema háptico capaz de transmitir informações em uma aplicação de jogo, com foco na questão de acessibilidade para pessoas surdas. O sistema, formado por motores de vibração dispostos em uma interface vestível, foi capaz de interagir por meio de padrões de sinais hápticos caracterizados por características como localização, intensidade, duração e padrão.

Nesta versão, as modificações feitas em relação ao *driver* do motor proposto por Alexandre [23] permitiram a diminuição de custos e quantidade de componentes, provendo uma implementação de PCB de  $11,5 \times 5,3$  cm<sup>2</sup> com 12 módulos. O uso do microcontrolador ESP32 reduziu o tamanho e o custo em relação ao trabalho [22] que usou Raspberry Pi. A interface háptica também foi caracterizada por ser leve, junto do conjunto de elásticos e velcro, foi apontando como fácil de se transportar, podendo ser replicado facilmente e simples de se montar e desmontar. O custo estimado da interface vestível é de 180 reais. A etapa de entrevista guiada também permitiu compreender se o sistema atendia os objetivos da interface vestível, como questões de usabilidade do traje, se era versátil para caber em todos os voluntários, se causava desconforto, como o material interagia com tecidos e pele e o efeito disso, e questões de sensibilidade, a percepção dos usuários sobre diferentes intensidades, sequências de vibração com múltiplos atuadores e melhor posicionamento dos atuadores para o contexto da implementação em um jogo de computador.

O sistema de controle em alto nível, por meio do editor, gerou mais praticidade e agilidade no momento de interagir com o sistema. Apesar de limitar o uso deste, compensou com um sistema com várias funções de fácil acesso, como os testes de módulos individualmente ou em conjunto, a tela de edição que permite criar sequências complexas com até todos os atuadores simultaneamente e o uso de banco de dados o qual facilitou o acesso para consulta e edição. A implementação da interface gráfica também foi feita para ser intuitiva e fácil de usar, onde opções clicáveis são prioridade, os botões são explícitos sobre suas funções e isso não impede o sistema de disponibilizar a ampla gama de funções

previamente descrita.

Com o sistema foi possível criar efeitos hápticos diretamente com a comunidade surda. Isso não apenas mostrou a facilidade de montar e desmontar a interface vestível, pois muitos testes foram realizados até no mesmo dia, como permitiu que o projeto interagisse diretamente com a comunidade surda que é seu foco. Os voluntários puderam criar e elaborar efeitos que se relacionasse com a sua perspectiva de mundo, que inclui o efeito vibratório diretamente por meio das superfícies.

Quando os efeitos criados foram adicionados ao jogo, os voluntários puderam testar o jogo háptico-visual. Em particular, houve problemas para explicar os efeitos verbalmente ou por língua de sinais, mas após os jogadores compreenderem cada efeito em rodadas-teste puderam usufruir de toda experiência, esse comportamento foi definido como uma curva de aprendizagem com crescimento abrupto. A tecnologia foi bem recebida e empolgou os participantes. Em particular, os voluntários surdos se mostraram muito cativados pela perspectiva háptica, se empolgaram com o jogo e também puderam imaginar como a tecnologia poderia se encaixar em outros aspectos da sua realidade.

## 5.1 Trabalhos futuros

O trabalho foi conduzido de forma a pontuar ideias que não puderam ser executadas no momento atual e também encontrar caminhos que poderiam ser explorados. Por esse motivo, esta seção trabalha em cima de três pilares dessas propostas: melhorias no projeto atual, desenvolvimento com a comunidade surda e aplicações possíveis.

As propostas de melhoria começam pelo protótipo vestível. A interface poderia ter menos fios, usar motores mais potentes, uniformizados e caracterizados, fazer uso de bateria e se comunicar via *Bluetooth*, evitando o uso de cabos, além de usar outros tipos de efeito háptico, como força e calor. O protótipo vestível poderia ser obra de estudos aprofundados sobre tecnologias vestíveis com auxílio de profissionais da área e abordagens voltadas à experiência do usuário. Essa implementação poderia contar também com um material mais firme e que permitisse o usuário colocar facilmente em si mesmo. Pelo lado do editor, uma versão mais robusta, com mais opções de personalização, que permitisse diferentes tempos entre sequências, como programas de edição de áudio ou vídeo, poderia ser elaborada. Apenas essas melhorias poderiam permitir testes melhores com os efeitos simultâneos e explorar as possibilidades que essa mecânica pode trazer para o projeto. Testes quantitativos poderiam gerar resultados mais precisos sobre a sensibilidade de usuários, ouvintes e surdos, sobre a intensidade de vibração e localização dos motores, produzindo resultados mais generalistas. Sobre o jogo, seria de grande acréscimo sua implementação incluindo pessoas da área de desenvolvimento de jogos, que podem trazer

implementações mais criativas com enfoque na experiência do jogador, incluindo tutoriais e mecânicas amigáveis para novos usuários.

Espera-se também que este projeto não pare apenas como uma tentativa de inclusão e acessibilidade, e possa engajar pessoas surdas e colocá-las como protagonistas de um trabalho direcionado a elas, através da promoção de material e guias de montagem e desenvolvimento em LIBRAS e outros recursos de acessibilidade. Espera-se que isso possa incentivar a comunidade local a conhecer e engajar na área de computação, e talvez desenvolver pesquisas em hápticos também.

E, por fim, espera-se que o modelo proposto possa ser testado em outras aplicações, como outros estilos de jogos eletrônicos ou em jogos de tabuleiro, com o propósito de aumentar a imersão e a acessibilidade. Em particular, com o uso de realidade virtual, o trabalho pode ser testado como melhoria na experiência do usuário, adicionando um lado sensorial à simulação [30]. Seguindo a questão de acessibilidade, o protótipo poderia também ser testado com pessoas com deficiência visual e outras questões de adaptação poderiam ser revistas na implementação do jogo, como por exemplo, transmitir a ideia do espaço físico por meio de vibrações. Este modelo poderia acompanhar também obras audiovisuais, como filmes e animações, e ser um aliado em aplicações de cidades inteligentes.



# Referências

- [1] *World Report on Hearing*, 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240020481>. 1
- [2] Wijman, Tom: *The Games Market Will Show Strong Resilience in 2022, Growing by 2.1% to Reach \$196.8 Billion*, 2022. <https://newzoo.com/insights/articles/the-games-market-will-show-strong-resilience-in-2022>. 1
- [3] Shin, Mira: *A Growth of Accessibility in Video Games*, 2022. <https://www.washington.edu/doit/growth-accessibility-video-games>. 1
- [4] Ellis, Barrie, G. Ford-Williams, L. Graham, D. Grammenos e I. Hamilton: *Game accessibility guidelines*, 2022. <https://gameaccessibilityguidelines.com/>. 1
- [5] *Can I play that?*, 2022. <https://caniplaythat.com/>. 1
- [6] Danieau, Fabien, Anatole Lécuyer, Philippe Guillotel, Julien Fleureau, Nicolas Mollet e Marc Christie: *Enhancing audiovisual experience with haptic feedback: a survey on HAV*. *IEEE transactions on haptics*, 6(2):193–205, 2012. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6357188>. 1, 4, 7
- [7] Charity, Justin: *Video Games’ Sensory Revolution: How Haptics Reinvented the Controller*, 2021. <https://www.theringer.com/2021/9/15/22674685/video-games-controllers-haptic-feedback-ps5-returnal>. 1, 4
- [8] Heilig, Morton L: *Sensorama simulator*. US PAT. 3,050,870, 1962. 4
- [9] Motorola: *Motorola StarTAC Userguide*, 1999. <https://ringtones.specialtyansweringservice.net/wp-content/uploads/2014/08/manuals/motorola-startac-userguide.pdf>. 4
- [10] De Souza, Clarisse Sieckenius, Carla Faria Leitão, Raquel Oliveira Prates e Elton José Da Silva: *The semiotic inspection method*. Em *Proceedings of VII Brazilian symposium on Human factors in computing systems*, páginas 148–157, 2006. 5
- [11] Corrêa, Luiz Paulo Damilton, Flávio RS Coutinho, Raquel Oliveira Prates e Luiz Chaimowicz: *Uso do MIS para avaliar signos sonoros: quando um problema de comunicabilidade se torna um problema de acessibilidade*. Em *Proceedings of the 11th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, páginas 47–56, 2012. 5

- [12] Espressif Systems, Shanghai, China: *ESP32 - Technical Reference Manual*, 2023. [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf). 5, 6
- [13] Vybronic: *Coin Vibration Motor VC1027B001D Datasheet*, 2023. <https://www.vybronic.com/wp-content/uploads/datasheet-files/Vybronic-VC1027B001D-datasheet.pdf>. 6
- [14] Ronacher, Armin: *Flask*, 2010. <https://flask.palletsprojects.com/en/2.3.x/>. 7
- [15] Walke, Jordan: *React*, 2013. <https://react.dev/>. 7
- [16] Technologies, Unity: *Unity*, 2005. <https://unity.com/>. 7
- [17] Ho-Ching, F Wai ling, Jennifer Mankoff e James A Landay: *Can you see what I hear? The design and evaluation of a peripheral sound display for the deaf*. Em *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, páginas 161–168, 2003. 7
- [18] Granados, Jasmine A: *Level-up! Identifying ways to make video games more accessible for deaf and hard-of-hearing individuals*. Tese de Doutorado, Wichita State University, 2021. 7
- [19] Karafotias, Georgios, Akiko Teranishi, Georgios Korres, Friederike Eyssel, Scandar Copti e Mohamad Eid: *Intensifying emotional reactions via tactile gestures in immersive films*. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 13(3):1–17, 2017. 8
- [20] Tara, Ibuki, Shogo Okamoto, Yasuhiro Akiyama e Yoji Yamada: *Heightening fear response to horror video scenes by applying vibratory stimuli to upper bodies of viewers*. Em *2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)*, páginas 250–252. IEEE, 2022. 8, 9
- [21] Maeda, Tomosuke e Tetsuo Kurahashi: *Haptiple: A wearable, modular and multiple haptic feedback system for embodied interaction*. Em *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, páginas 19–20, 2019. 9
- [22] Klautau, Tito Marcos De Moraes: *Dispositivo de conversão de sinais sonoros para sinais táteis voltados a usuários deficientes auditivos*. Universidade de Brasília, 2019. 9, 10, 13, 65
- [23] Alexandre, Ian Moura: *Estudo, caracterização e acionamento de atuadores vibrotáteis destinado ao desenvolvimento de interfaces hápticas para pessoas com deficiência auditiva*. Universidade de Brasília, 2021. [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/30573/1/2021\\_IanMouraAlexandre\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/30573/1/2021_IanMouraAlexandre_tcc.pdf). 10, 13, 14, 15, 16, 20, 42, 52, 65
- [24] Verrillo, Ronald T e Steven C Chamberlain: *The effect of neural density and contactor surround on vibrotactile sensation magnitude*. *Perception & Psychophysics*, 11(1):117–120, 1972. 20

- [25] *The Backrooms Game*, 2019. [https://store.steampowered.com/app/1111210/The\\_Backrooms\\_Game\\_FREE\\_Edition/](https://store.steampowered.com/app/1111210/The_Backrooms_Game_FREE_Edition/). 32
- [26] *Enter The Backrooms*, 2021. [https://store.steampowered.com/app/1511670/Enter\\_The\\_Backrooms/](https://store.steampowered.com/app/1511670/Enter_The_Backrooms/). 32
- [27] Huuxloc: *Backrooms Another Level - 3D model*, 2022. <https://skfb.ly/otW0o>. 33
- [28] Murray, Wendy M, Scott L Delp e Thomas S Buchanan: *Variation of muscle moment arms with elbow and forearm position*. *Journal of biomechanics*, 28(5):513–525, 1995. 43
- [29] Marques, Rodrigo Rosso: *A percepção do corpo próprio e o “ser surdo”*. *Ponto de vista*, páginas 75–85, 2007. 63
- [30] Burdea, Grigore C: *Keynote address: haptics feedback for virtual reality*. Em *Proceedings of international workshop on virtual prototyping*. Laval, France, páginas 87–96, 1999. 67