

DANIEL ALUISIUS FERREIRA SANTOS

TruDrum

**PROJETO DE UM INSTRUMENTO MUSICAL DIGITAL
DE PERCUSSÃO BASEADO EM MOVIMENTO**



DANIEL ALUISIUS FERREIRA SANTOS

TruDrum

**PROJETO DE UM INSTRUMENTO MUSICAL DIGITAL
DE PERCUSSÃO BASEADO EM MOVIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
da Universidade de São Paulo FAUUSP como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em Design

Área de concentração: Projeto Integrado de Produto
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nakamura



SÃO PAULO, 2023

Resumo

Partindo da importância do movimento do corpo humano como mecanismo de expressão musical e focando especificamente em instrumentos de percussão, este trabalho tem como objetivo conceituar e desenvolver um produto que aproveite a ampla adoção de sistemas microeletromecânicos (MEMS) e o recente aumento na popularidade de tecnologias relacionadas à inteligência artificial (IA) para criar uma experiência de "air drumming", ou seja, a experiência de tocar bateria “no ar”, como se ali houvesse uma bateria invisível. Além de detectar movimentos musicais e reproduzir sons realistas, este projeto de um dispositivo eletrônico portátil também tem como objetivo prover um sistema de feedback tátil, simulando a sensação física que se tem ao tocar um instrumento de percussão.

A hipótese se divide em três argumentos principais: em primeiro lugar, que o input de MEMS pode ser processado utilizando-se um modelo de aprendizagem profunda para avaliar os movimentos do usuário com relação a uma espécie de “kit de bateria virtual”. Em segundo lugar, que uma mudança repentina na distribuição de massa causada por um mecanismo dentro do dispositivo pode gerar uma força de reação de maneira consistente com àquela sentida nas baquetas ao tocar bateria. E, por último, que esse sistema baseado em gestos pode ser usado como uma ferramenta de criação musical, permitindo expressividade por meio de movimentos intuitivos.

Palavras-chave: Design de instrumentos musicais digitais; Feedback tátil; Percussão.

Abstract

Departing from the importance of body movements as a mechanism for musical expression and focusing specifically on percussion instruments, this work aims to conceptualize and develop a product that leverages the widespread adoption of microelectromechanical systems (MEMS) and the recent increase in the popularity of artificial intelligence (AI) tools to achieve an "air drumming" experience, that is, the experience of playing the drums without a drum set. In addition to detecting musical movements and reproducing realistic sounds, this project of a portable electronic device also aims to provide haptics, simulating the physical sensation of playing a percussion instrument.

The hypothesis is threefold: firstly, that the input from MEMS can be processed using a deep learning model to assess the user's movements in relation to a kind of "virtual drum kit". Secondly, that a sudden shift in mass distribution caused by a mechanism inside the device can generate a reaction force consistent with the one felt in drumsticks when playing the drums. And finally, that this gesture-based system can be used as a tool for music making, allowing expressiveness through intuitive movements.

Keywords: Design of digital musical instruments; Percussion; Tactile feedback.

Sumário

INTRODUÇÃO			
0.1 Som e movimento	7		
0.2 Enquadramento do problema de design	9		
0.3 Estrutura do trabalho	11		
PARTE 1 - PESQUISA E DESENVOLVIMENTO			
1.1 Informações gerais sobre a área e motivações de projeto	13		
1.2 Design de instrumentos musicais digitais	15		
1.2.1 MEMS como input	16		
1.2.2 Aprendizagem profunda como técnica de classificação dos movimentos	18		
1.2.3 O rebote: projetando um sistema de feedback tátil	23		
1.3 Painéis semânticos	26		
1.4 TruDrum	28		
1.4.1 Controle	28		
1.4.2 App	33		
1.4.3 Arquitetura do sistema	35		
PARTE 2 - TESTES COM USUÁRIOS			
2.1 Objetivos da pesquisa com usuários	37		
2.2 Experimento A: Precisão rítmica versus feedback tátil	38		
2.2.1 Metodologia do Experimento A	33		
2.2.2 Discussão dos resultados do Experimento A	43		
2.3 Experimento B: Validação do percurso de uso do App	48		
2.3.1 Metodologia do Experimento B	48		
2.3.2 Discussão dos resultados do Experimento B	49		
CONCLUSÃO			
3.1 Objetivos alcançados e limitações do projeto	51		
3.2 Desafios para próximas iterações	53		
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS			
ANEXOS			
	58		

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

0.1 Som e movimento



Fig. 1: Dave Grohl tocando bateria
tonedeaf.thebrag.com

Sempre me senti atraído por apresentações de música ao vivo. Há algo de muito especial em estar em meio à multidão, sentindo o peso físico das ondas sonoras habilmente organizadas do grave ao agudo, da direita à esquerda, do fraco ao forte, criando um cenário auditivo complexo. Uma coisa interessante sobre esta paisagem sonora é que ele emerge sempre de uma sequência ensaiada de gestos realizados pelos músicos em seus instrumentos. Mesmo na música eletrônica, ou seja, na música produzida com computadores e outros equipamentos eletrônicos em oposição a instrumentos acústicos e eletroacústicos, os paradigmas de interface com o usuário dependem quase inteiramente de movimentos das mãos, como tocar botões coloridos para disparar sons, ou mexer em barras deslizantes para processar e editar a música. Esses movimentos das mãos são, aliás, muitas vezes exagerados e incorporados à dança pelos DJs durante suas apresentações. Também no caso de produtores musicais que em vez de fazer apresentações ao vivo trabalham em um estúdio de gravação, nada muda em relação ao fato de que criar música é algo que sempre acaba envolvendo a realização de um conjunto correto de movimentos para tocar sons, gravá-los, editá-los e mixá-los.

Falando de forma muito genérica, a própria natureza do som requer golpear, dedilhar, apertar, tocar, esfregar, ou qualquer outra forma de interação física que

INTRODUÇÃO

possa excitar o instrumento e fazê-lo vibrar, comprimindo e descomprimindo o ar ao seu redor e criando ondas de pressão que alcançam nossos tímpanos e são interpretadas como som em nossos cérebros. Eu poderia simplesmente argumentar que som é movimento, porque é isso que ele é: o movimento oscilatório de ondas mecânicas. Mas, além disso, o ponto que quero tocar aqui é que a música surge a partir do momento em que ocorre uma interação física entre uma pessoa e um instrumento musical.

Se, para todos os efeitos, som é movimento, esse movimento ocorre por ação humana. Claro que o conceito de música, digamos, como uma composição, pode preceder sua execução. Quero dizer, poderia se dizer que a música pode existir antes e além de ser tocada. No entanto, é durante a performance (ou reprodução) que a natureza abstrata da música assume sua forma mais concreta. Ela se torna um fenômeno físico.

Além disso, a importância dos movimentos corporais, ou gestos, não se limita à sua função de input nos instrumentos musicais. Fechando o ciclo, o instrumento reage ao músico, fornecendo resposta tátil ao toque: o piano tem "peso" nas teclas, a guitarra tem tensão em suas cordas, as peles dos tambores na bateria são elásticos. Até mesmo botões e controles deslizantes, considerando música eletrônica e produção musical em estúdios, fornecem a quantidade necessária de resistência ao movimento. O feedback tátil não é apenas uma mera

consequência de tocar um instrumento, ele ocorre por uma escolha consciente de design.

Levando em consideração a importância do movimento do corpo como mecanismo de input-output na música, o objetivo deste trabalho é projetar um kit de bateria virtual acionado por um dispositivo portátil que capture os movimentos do usuário, os processe como entrada e retorne o som adequado e feedback tátil como saída. A hipótese é que, utilizando tecnologias acessíveis mas simultaneamente consideradas estado-da-arte, é possível criar uma experiência de "air drumming" verossímil.



Fig. 2: DJ incorporando movimentos de dança à sua performance
edmsauce.com

I. Som e movimento



Fig. 3: Experimento com pesos em teclas de piano balanceadas
sweetwater.com

INTRODUÇÃO

0.2 Enquadramento do problema de design



Fig. 4: Pessoa utilizando um produto de air drumming
aerodrums.com

A bateria é possivelmente um dos instrumentos mais difíceis de se tocar. Não apenas por causa de sua técnica intrincada, mas também porque, para os músicos, pode ser muito difícil ter mobilidade e praticar em um instrumento extremamente ruidoso, grande e pesado. Agora, com a ampla adoção de microchips e, consequentemente, com o barateamento dos produtos de alta tecnologia, soluções como Aerodrums, Senstroke, Freedrum e PocketDrum surgem, aproveitando a popularização de ferramentas como Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) e até mesmo Visão Computacional para oferecer, de alguma forma, uma experiência de tocar bateria sem a bateria física.

Existem várias vantagens em adotar um kit virtual. Obviamente, há a praticidade de ter um instrumento portátil, que você pode usar tanto para tocar com amigos quanto para praticar tarde da noite, usando fones de ouvido para não incomodar os vizinhos. Além disso, existem oportunidades interessantes envolvendo educação musical e gamificação. E, por fim, há a possibilidade de usar esses produtos eletrônicos como controladores MIDI para gravar e produzir faixas: a conexão com Estações de Trabalho de Áudio Digital (Digital Audio Workstations, ou DAWs) permite simular instrumentos virtuais e efeitos, criando possibilidades virtualmente infinitas.

"Air drumming" pode ajudar a tornar a música

INTRODUÇÃO

mais acessível. No entanto, há algumas lacunas significativas a serem preenchidas. Em primeiro lugar, temos o problema do feedback tátil. Atualmente, objeto de muitas pesquisas para aplicações de Realidade Virtual e Realidade Aumentada, a resposta tátil é extremamente importante nesta aplicação específica. É claro que bater no ar é diferente de tocar em uma bateria física. No cenário tradicional, existem limites físicos claros, fica óbvio se o usuário acertou ou errou. Mas, mesmo se ignorarmos isso e assumirmos que o músico possa lidar perfeitamente com o conceito de se posicionar diante de uma bateria invisível, ainda temos que levar em conta uma característica essencial dos instrumentos de percussão: o rebote. Quando o baterista bate em seu instrumento, as baquetas recebem uma força de reação, sendo empurradas de volta um pouco. Esse efeito sutil é fundamental ao tocar, tanto por razões técnicas (notas fantasmas, ritmos rápidos, viradas de bateria, etc.) quanto por efeitos psicológicos (percepção da velocidade e força dos golpes, sincronização rítmica).

Outras questões que afetam a usabilidade de baterias virtuais estão relacionadas à latência do sistema e à precisão ao detectar qual parte da bateria está sendo tocada. Uma opinião comum entre os testadores de produtos de “air drumming” é que o músico precisa adaptar sua técnica ao instrumento, por exemplo, batendo mais cedo ou tocando com os braços em um ângulo específico.

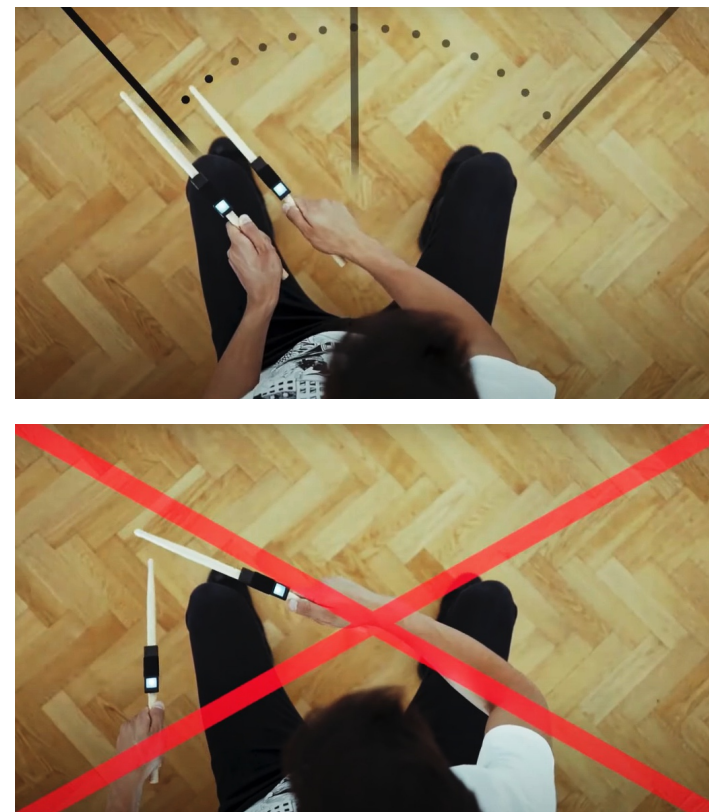


Fig. 5 e 6: Demonstração de um produto de air drumming
freedrum.rocks

Em suma, essas baterias virtuais existentes, embora sejam consideradas pelos músicos como “divertidas de se tocar”, não são adequadas como equipamento musical sério. Com este trabalho, pretendo desenvolver um novo instrumento eletrônico para

II. Enquadramento do problema de design

bateristas e percussionistas em geral, abrangendo a inovação tecnológica existente e tentando lidar com os desafios mencionados, caminhando em direção a um ciclo de input-output mais transparente entre o músico e o dispositivo. O produto deve ser um sintetizador de bateria baseado em movimento. Deve ser portátil e fácil de configurar e usar, aproximando o músico da experiência de uma bateria ou outros instrumentos de percussão. Deve ser divertido de tocar, sensível à força e, o mais importante, confiável como ferramenta de criação musical.

Tendo o aspecto sensorial como ponto focal, este trabalho inclui o projeto de um mecanismo de feedback tátil capaz de proporcionar um movimento consistente e convincente. Também será explorado o conceito de Aprendizagem Profunda como técnica de processamento do input dos sensores MEMS para avaliar e classificar os movimentos de percussão de forma robusta e confiável.

Embora neste projeto o produto seja desenvolvido com a intenção de ser usado de maneira o mais semelhante possível a uma bateria “real”, é importante reconhecer antecipadamente que ele não pretende ser um substituto do kit de bateria tradicional. É, na verdade, uma maneira nova e estimulante de experimentar instrumentos de percussão, com mais liberdade e flexibilidade, de forma análoga ao que ocorre, por exemplo, com instrumentos de teclas se compararmos um teclado eletrônico a um piano.

0.3 Estrutura do trabalho

Este relatório se divide em duas seções principais: "Parte 1: Pesquisa e Desenvolvimento" e "Parte 2: Testes com Usuários".

A primeira seção, de pesquisa e desenvolvimento, se trata de um resumo da primeira iteração deste projeto, realizada em 2022 como tese de graduação no curso de Laurea Magistrale em Progetto Integrato de Prodotto (Integrated Product Design), apresentada ao Politécnico di Milano no âmbito do programa de duplo diploma FAU-POLIMI. Essa tese, intitulada “TruDrum : achieving a verisimilar air drumming experience through haptics, microelectromechanical systems and machine learning”, teve como orientador o Professor Mario Bisson (Polimi Design) e está disponível para consulta no POLITesi, arquivo digital de teses do Polimi.

A segunda seção, de testes com usuários, se trata de uma série de experimentos feitos em uma segunda iteração do projeto, realizados no primeiro semestre de 2023 sob a orientação do Professor Dr. Ricardo Nakamura (FAUUSP) e tendo como finalidade a validação de conceitos e o aprimoramento de elementos do projeto.

As duas partes aqui apresentadas consolidam o percurso de projeto de TruDrum, que é o objeto deste trabalho de conclusão de curso.

PARTE 1: PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

PARTE 1: PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

1.1 Informações gerais e motivações de projeto

Quando se trata de produtos de bateria virtual, as primeiras impressões da pesquisa foram de que já existem algumas soluções no mercado, o que poderia significar que não há muita inovação em se propor mais um produto neste campo. No entanto, após uma investigação mais aprofundada, ficou claro que este ainda é um ramo de mercado relativamente novo, com muito potencial a ser explorado.

Em seu livro "Diffusion of Innovations", Everett M. Rogers afirma que, em relação ao comportamento humano, a inovação tem pouco a ver com o quão objetivamente nova uma tecnologia é. A novidade é mais uma questão de conhecimento, persuasão ou decisão de adoção. Rogers estabelece cinco características-chave que definem o quão bem-sucedida é a adoção de uma inovação:

- (1) Vantagem relativa - o quão superior uma inovação é percebida em relação aos seus antecessores;
- (2) Compatibilidade - o quão consistente com experiências e necessidades anteriores é uma inovação;
- (3) Complexidade - o quão difícil é entender e usar a inovação;
- (4) Testabilidade - o grau de facilidade e conveniência em que usuários podem testar a eficácia da solução;
- (5) Observabilidade - quão facilmente os resultados de uma inovação podem ser vistos pelos usuários.

Inovações percebidas por indivíduos como tendo maior vantagem relativa, compatibilidade, testabilidade e observabilidade e menor complexidade serão adotadas mais rapidamente do que outras inovações. (Rogers, 2003, p.16)

Refletindo sobre a visão de Rogers, na verdade, pode ser benéfico para este projeto o fato de que outros já estejam avançando na área, porque essas características-chave estabelecidas por Rogers, especialmente a observabilidade, são facilitadas pelo marketing dos produtos existentes. Não é por acaso que, em muitos casos, os produtos precursores de uma inovação não são necessariamente os mais lembrados em sua área.

Além disso, tanto do ponto de vista da implementação técnica quanto da interação humana, acredito que exista um espaço de "oceano azul" a ser explorado (Kim e Mauborgne, 2005), onde o desempenho e os fatores de conveniência do produto ainda têm espaço para melhorias. Para ilustrar o que quero dizer, as soluções existentes pesquisadas são plotadas a seguir em um gráfico de cenário competitivo (Fig 7).

No eixo horizontal, foram consideradas características relacionadas à conveniência, ou seja, o quão fácil é adquirir e usar o produto. Na minha

opinião, esses fatores são principalmente preço (o investimento financeiro para adquirir a solução), portabilidade (a possibilidade de usar o produto em vários ambientes e situações) e facilidade de configuração (o processo de instalação e/ou configuração do produto de forma fácil).

No eixo vertical, foram avaliadas as características relacionadas ao desempenho, ou seja, a aplicabilidade do produto em um cenário musical real. Essas características são principalmente precisão (quão consistente é a usabilidade), expressividade (a faixa dinâmica do som) e qualidade do som (o timbre ou "cor do tom").

O produto projetado neste trabalho ocuparia o quadrante superior direito deste gráfico. Idealmente, essa solução deve ser tanto musicalmente útil quanto fácil de usar. Em outras palavras, usando o framework de inovação de Rogers, ela deve ser altamente compatível com as necessidades e expectativas dos usuários e ter pouca complexidade em relação à sua adoção.



Fig. 7: Gráfico de cenário competitivo

1.2 Design de instrumentos musicais digitais

Como é geralmente o caso quando se trata de arte, é muito difícil chegar a uma definição precisa de “música”. Algumas definições são mais estritas e técnicas, enquanto outras são bastante subjetivas e abstratas. Os mais tecnicamente inclinados argumentam que a música deve ter pelo menos três elementos - melodia, harmonia e ritmo na forma escrita para ser considerada como tal (Latham, 2003). Outros, mais partidários da expressão humana, defendem que a intenção se sobrepõe à técnica, e que qualquer obra sonora pode ser considerada musical, desde que essa seja a intenção do autor (Sarrazin, 2016).

Todas as definições, no entanto, indicam de alguma forma que a música é uma forma de arte espaço-temporal. Ou seja, diferentemente, por exemplo, de obras de arte visuais que costumam ser estáticas, a música ocorre em um determinado espaço e em um determinado intervalo de tempo. Ousando trazer a minha própria definição simplificada, neste trabalho irei considerar que a música é uma sequência de sons organizados de forma a permitir a percepção de padrões (ou a ausência deles) e que, devido a referências culturalmente compartilhadas, transmitem as emoções que associamos a uma peça musical.

Esta definição, no entanto, levanta outra questão: se sons organizados fazem música, quais regras e parâmetros estão sendo observados e ajustados para tornar os sons organizados? Quero dizer, que conjunto de

propriedades nos permite distinguir a ordem do caos no som? Instrumentos musicais são projetados de maneira a permitir o controle de quatro propriedades musicais: altura, duração, intensidade e timbre. A altura refere-se à frequência das notas musicais, a duração está relacionada ao tempo que uma nota é tocada, a intensidade diz respeito ao volume do som e à força aplicada ao instrumento, e o timbre descreve o perfil harmônico ou “identidade sonora” do instrumento. Pesquisando instrumentos existentes, a principal conclusão é que, em todos os casos, é através de gestos muito precisos e ensaiados que os músicos exercem controle sobre essas propriedades e produzem sons musicais. O movimento do corpo é a essência da música.

Traduzindo essas descobertas para o ponto de vista do design de instrumentos musicais digitais, o que chamamos de “usabilidade” neste projeto pode ser definido pelas características que permitam: (a) Detectar as batidas, ou seja, o usuário está tocando? Com que intensidade?; (b) Determinar a posição das mãos em relação ao kit de bateria virtual, ou seja, qual tambor ou prato da bateria está sendo tocado?; (c) Ligar as entradas recebidas nos itens (a) e (b) à síntese do som, ou seja, tocar o som correspondente com a intensidade adequada; E (d) Fornecer feedback tátil, ou seja, a cada golpe, o usuário sente uma sensação semelhante à de tocar um instrumento de percussão.

1.2.1 MEMS como input

Vários tipos de sensores foram considerados para a tarefa de captar os movimentos de percussão. Microfones, infravermelho, ultrassom, lidar, fotosensores, câmeras, sensores de pressão, elementos piezoelétricos e acelerômetros são exemplos de transdutores considerados pela pesquisa.

Pela sua vasta aplicação em smartphones, controles de videogame e outros dispositivos eletrônicos, além de sua ampla capacidade de amostragem, uma Unidade de Medição Inercial com nove Graus de Liberdade (9DoF IMU) foi selecionada. Este item se trata de um sistema microeletromecânico que pode ser incorporado em um único microchip, com preço acessível e alto grau de disponibilidade. O chip consiste em um conjunto de giroscópio, acelerômetro e magnetômetro, capaz de fornecer uma alta taxa de leitura para mudanças na orientação em rad/s (comumente convertidos em ângulos de rotação - alpha, beta, e gamma), aceleração em m/s², e intensidade do campo eletromagnético em µT. Cada uma dessas três leituras apresenta seus três respectivos eixos X, Y e Z, totalizando nove pontos de dados. Essas nove leituras são chamadas de Graus de Liberdade (Degrees of Freedom - DoF).

Produtos como Senstroke, Freedrum e Pocketdrum parecem utilizar este tipo de sensor, já que

não requerem equipamentos externos além de controladores análogos às baquetas de bateria. No entanto, essa técnica possui algumas limitações relacionadas à classificação dos movimentos de percussão. Essas limitações existem principalmente porque, mesmo que em teoria os dados provenientes dos nove eixos de leitura sejam o suficiente para calcular a posição do dispositivo no espaço 3D, na prática o ruído em baixas magnitudes nas leituras do sensor causa deriva na posição estimada.

Para determinar a viabilidade técnica deste projeto, foram desenvolvidas provas de conceito por meio de iterações de software utilizando os sensores prontamente disponíveis em um smartphone. Estes testes consistiram em aplicativos simples desenvolvidos em JavaScript e HTML, executados em um navegador Chrome para Android. Apesar da aparente dificuldade em classificar o movimento lateral, isto é, a posição das mãos do usuário com relação ao kit de bateria virtual, os testes foram muito bem sucedidos em detectar a ativação das notas, ou seja, detectar cada movimento de percussão e suas respectivas intensidades.

O algoritmo para detecção de batidas foi desenvolvido com base em experimentos feitos com os eventos JavaScript "deviceorientation" e "devicemotion", que lidam respectivamente com os ângulos de inclinação e as acelerações do dispositivo. A abordagem consiste em receber dados de aceleração vertical dos sensores e, com

base nos picos e vales do gráfico plotado, determinar a intensidade de cada batida. Primeiro, um limiar deve ser definido para evitar considerar qualquer movimento diminuto como uma batida. Somente quando o usuário se move com uma "intenção de tocar" alta o bastante, ou seja, acima de uma determinada aceleração vertical absoluta, o algoritmo interpreta o movimento como um gatilho de percussão. O valor específico desse limiar geralmente foi mantido a 5 m/s² durante os testes. Esse limite mínimo foi definido empiricamente por meio de

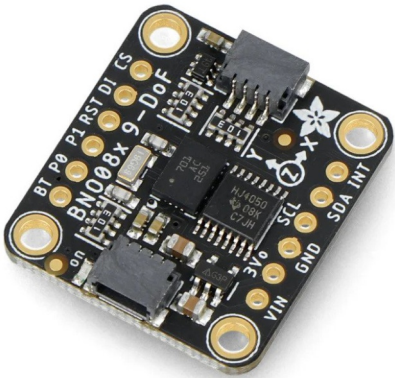


Fig. 8: Chip com unidade de medição inercial de 9 eixos (9 DoF IMU)
botland.store

uma série de testes com o objetivo de encontrar o ponto ideal entre "sensível o suficiente" (por exemplo, é possível tocar muito suavemente) e "não muito sensível" (por exemplo, é possível se mover sem acionar batidas inadvertidamente). Em seguida, as amostras de aceleração vertical precisam ser analisadas para obter informações que determinam os movimentos de tocar a bateria. O gráfico típico de uma batida consiste em dois picos com um vale no meio.

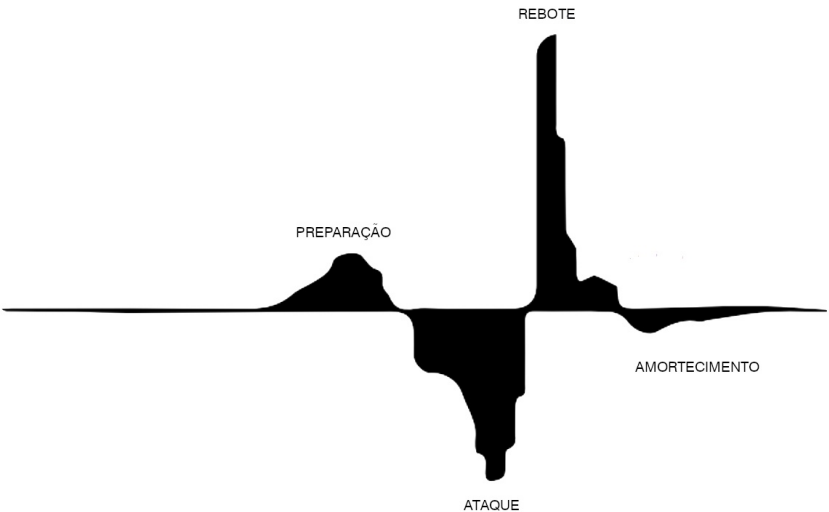


Fig. 9: Aceleração vertical de um movimento de percussão, capturada em testes realizados com um smartphone

Para interpretar este gráfico, é necessário considerar que as acelerações para cima e para baixo são lidas como valores positivos e negativos, respectivamente. O primeiro pico, geralmente mais curto, é causado pela fase de preparação, quando o usuário levanta a mão para se preparar para cada batida. Como esse pico pode variar radicalmente de uma batida para outra e não apresenta um padrão discernível, ele não é um dado confiável para ser considerado como input e, portanto, é simplesmente ignorado. O vale registrado após cada fase de preparação corresponde à intensidade com que o usuário toca a bateria. São esses valores que são testados em relação ao limiar para ativar notas. O ponto mais baixo do vale corresponde à máxima aceleração em direção ao solo e seu valor absoluto é passado adiante como parâmetro de intensidade (volume) para a função que reproduz os sons. Isso é possível porque, ao tocar a bateria, batidas mais fortes são necessariamente mais rápidas e, portanto, exigem mais aceleração considerando o tempo relativamente fixo de uma batida. Por fim, o segundo pico indica o fim do ciclo de batida, com uma aceleração intensa oposta ao movimento de tocar. Esse segundo pico corresponde à ação de desacelerar abruptamente o movimento descendente, como se as baquetas estivessem atingindo a “bateria invisível”, e é responsável por encerrar o movimento de batida e reiniciar o algoritmo para detectar os próximos movimentos.

1.2.2 Aprendizagem profunda como técnica de classificação dos movimentos

No campo da inteligência artificial e da programação existe a ideia geral de que, se um problema pode ser resolvido de forma eficiente e adequada usando instruções condicionais if/else (ou seja, lógica programática tradicional), não é necessário recorrer à implementação de técnicas de inteligência artificial. Isso se baseia no princípio de que soluções mais simples e diretas são preferíveis, evitando a complexidade adicional introduzida pela utilização de algoritmos de aprendizado de máquina ou outras técnicas de IA. A escolha de utilizar um modelo de Aprendizagem Profunda para a classificação dos movimentos de percussão foi feita após o esgotamento das possibilidades da lógica programática tradicional, com base no resultado de testes realizados em três iterações de software.

A primeira tentativa de detectar a posição das mãos com relação à bateria foi baseada no ângulo de inclinação do dispositivo. Esse método utiliza os dados do giroscópio para determinar a orientação do dispositivo e atribui a cada tambor um intervalo de ângulo específico.

Para testar essa hipótese, foi prototipado um kit de bateria virtual com um cursor 2D controlado pela inclinação do dispositivo, utilizando os dados do evento "deviceorientation" do Javascript. A lógica de operação

deste modelo é similar à de operar um laser pointer, onde o usuário aponta o dispositivo para uma projeção.

Esse método mostrou-se bastante confiável, no sentido de que o giroscópio envia informações precisas e limpas que podem ser processadas rapidamente, porém ele se baseia em um modelo biomecânico falho, ignorando a articulação dos pulsos e assumindo que os punhos se movem lateralmente girando em torno dos cotovelos do músico, sempre perfeitamente em linha com o antebraço e, portanto, sempre dentro desses intervalos de ângulo predeterminados. Isso gera um problema, já que, na verdade, os punhos podem se mover em qualquer direção e em qualquer posição lateral. Ou seja, segurar a mão do lado direito do corpo enquanto se aponta o dispositivo para a esquerda, por exemplo, resultaria erroneamente na seleção do tambor mais à esquerda, mesmo com a mão lateralmente posicionada no lado oposto.

A segunda iteração foi baseada na ideia de rastrear a posição do dispositivo em tempo real, calculando suas coordenadas tridimensionais a partir dos dados do acelerômetro. "Dead reckoning", em navegação, é o método usado para determinar a posição instantânea de um objeto em movimento. Usar apenas unidades de medição inercial (IMUs) para dead reckoning é um problema conhecido e a maioria das pesquisas concorda que é inviável fazê-lo (exceto a curto prazo). Em teoria, se um acelerômetro de 3 eixos mede as acelerações sofridas

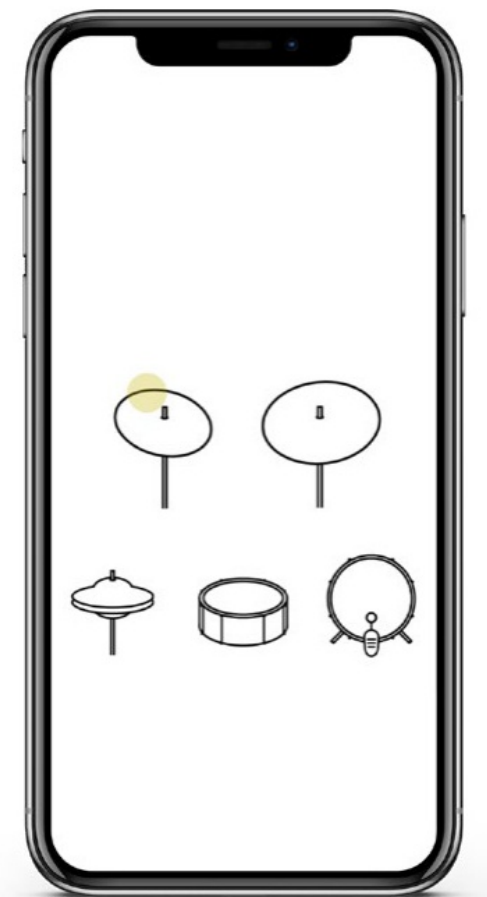


Fig. 10: Captura de tela do primeiro modelo de estudo dos controles, com cursor estilo "laser pointer" baseado na orientação do smartphone

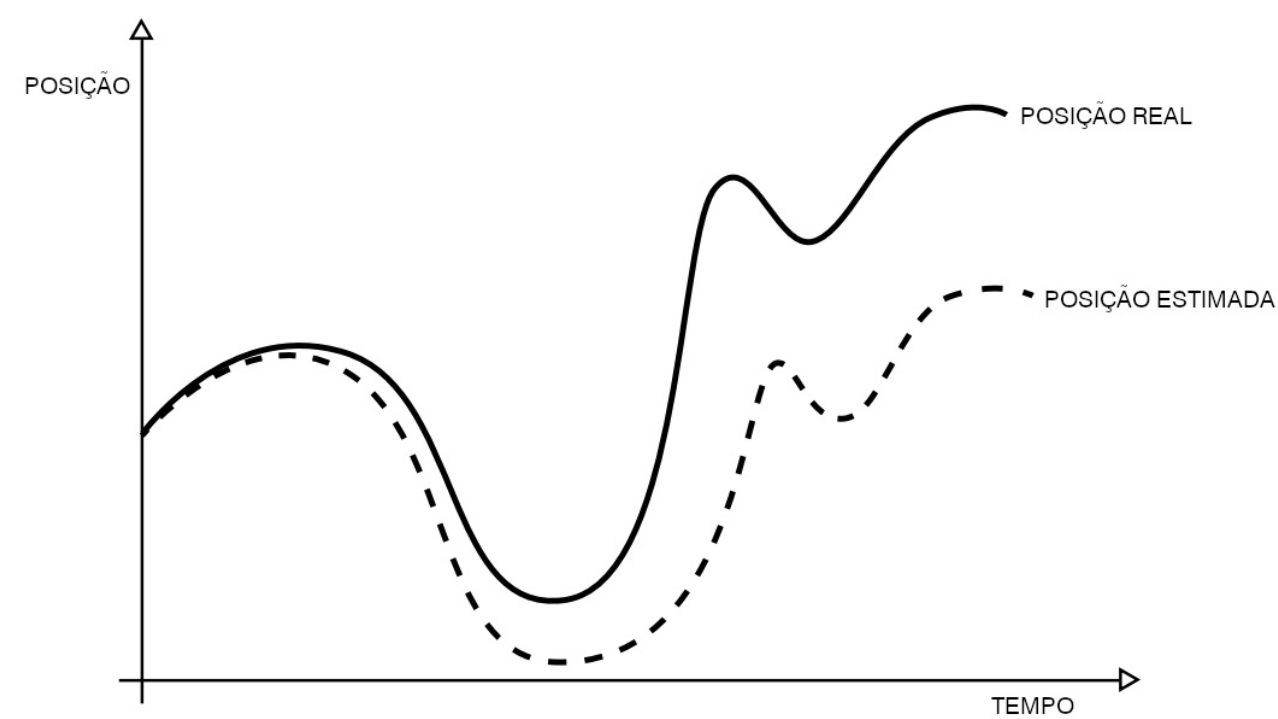


Fig. 11: Gráfico ilustrando a deriva inerente à técnica de dead reckoning baseada somente em IMUs, conforme verificado na segunda iteração do modelo de estudo dos controles

pelo dispositivo, poderíamos usar cálculo para integrar a curva de aceleração ao longo do tempo para obter as velocidades e, em seguida, integrar as velocidades para determinar o deslocamento no mundo tridimensional. Esse sistema de coordenadas poderia então ser usado como input para controlar um cursor 3D sobre uma bateria virtual. No entanto, ao colocar esse conceito em prática, o ruído nas leituras, devido à variação não linear da aceleração e da velocidade, resultou em um desvio exponencial na posição lida.

Como solução para o problema da deriva, considerou-se a ideia de aplicar outro limite, com o objetivo de descartar números pequenos que provavelmente viriam de flutuações irrelevantes do sensor. O problema é que, quando essa nova hipótese foi testada, ficou evidente que os dados relevantes provenientes das leituras estavam sendo descartados juntamente com o ruído filtrado. Isso acabou criando um tipo diferente de desvio, pois o ato de estabelecer um limite inferior impossibilita o usuário de se mover lentamente (abaixo do limite de aceleração) enquanto o sistema mantém uma matriz de posição atualizada com precisão. Ainda em relação ao problema de desvio, considerou-se que talvez essas imprecisões pudessem ser resolvidas investindo em hardware melhor, mas, ao pesquisar sobre o assunto, isso pareceu ser falso: algum nível de caos sempre é esperado em magnitudes menores,

independentemente do tipo e da qualidade do sensor. Ao realizar mais pesquisas, ficou claro que a única maneira de mitigar o desvio causado por imprecisões do sensor IMU seria por meio de técnicas de Fusão de Sensores, como Filtro de Kalman. Esse método consiste em obter leituras de sensores distintos para construir um modelo mais preciso da realidade e, com isso, filtrar com sucesso o ruído. Isso é geralmente feito combinando sensores baseados em diferentes fontes de dados, como um GPS (de um satélite) e um acelerômetro (de medições inerciais), por exemplo. Embora aprender sobre a Fusão de Sensores seria útil posteriormente, neste ponto, começou a ficar difícil alcançar um bom sistema de input através desta abordagem.

Na terceira iteração do sistema de detecção lateral de movimentos, a hipótese de usar IA pareceu ser um método viável para acionar diferentes amostras de som na bateria, já que este tipo de algoritmo permite classificar grandes quantidades de dados de maneira eficiente. Ao delegar o problema de categorização para o algoritmo de IA em vez de tentar extrair sentido dos dados do sensor, teoricamente seria possível obter um controle baseado em movimentos mais eficiente e transparente. A ideia por trás dessa hipótese é que, independentemente da posição no mundo 3D, os movimentos dos punhos ao tocar bateria têm um padrão discernível que pode ser detectado pelo dispositivo. Esse padrão emerge das leituras contínuas do

sensor IMU, enviando dados de aceleração, campo eletromagnético, e orientação nos eixos X, Y e Z. Esses dados, agora analisados em relação a si mesmos ao invés de serem analisados em relação ao espaço tridimensional, possuem uma espécie de "assinatura numérica" que se traduz em um gesto reconhecível. Para alcançar isso, é necessário um passo precursor de calibração, obtendo as medidas inerciais dos movimentos desejados e usando-as como dados de treinamento para gerar um modelo de previsão capaz de distinguir as ações do usuário.

Nesta iteração, um modelo sequencial de três camadas foi projetado usando o TensorFlow.js. A primeira camada recebe um tensor 3D (uma matriz) como entrada, que consiste em uma lista de várias amostras de movimento distintas, contendo uma lista de subamostras instantâneas, contendo uma lista de leituras individuais do sensor (tecnicamente falando, a entrada é chamada de "tensor 3D" porque é um vetor 3D descrito por matrizes 2D com pontos de dados 1D, ou "uma lista de listas de listas"). A segunda camada “achata” os números, ou seja, mapeia o vetor 3D em um tensor 2D e procura por características distintivas. E, por fim, a terceira camada é a camada de saída, que realiza a categorização do movimento e retorna o rótulo correspondente. O objetivo desta subseção não é aprofundar-se em engenharia de software, mas analisar as aplicações práticas do design das tecnologias estudadas. No entanto, vale ressaltar que o

algoritmo desenvolvido em TensorFlow.js foi ajustado otimamente para esta tarefa usando ativação Sigmóide nas primeira e segunda camadas com 12 e 8 unidades, respectivamente (essas unidades são os nós ou "neurônios" do modelo de IA), ativação Softmax na camada de saída com 5 unidades (que são os cinco comandos de batida da bateria testados) e aplicando Entropia Cruzada Categórica como função de perda com uma taxa de aprendizado de 0,1 ao longo de 100 épocas. Com o modelo de IA pronto, o próximo passo foi obter dados de treinamento gravando os vários movimentos de bateria e rotulando-os adequadamente em uma etapa de calibração. Em termos de Aprendizado de Máquina, isso significa lidar com os "Xs" e "ys", ou seja, criar um banco de dados de todos os tipos de movimentos de entrada e sua respectiva saída desejada, por exemplo, "quando eu faço movimentos de percussão próximos ao centro, quero tocar a caixa". Após coletar os dados de treinamento, o modelo deve ser otimizado, compilado e ajustado, o que, na terminologia do TensorFlow, significa executar a sessão de treinamento, consolidar o aprendizado e deixar o modelo pronto para fazer previsões, ou seja, classificar novas entradas com base no que foi "aprendido".

Uma vez que a este ponto a tarefa não é mais rastreamento da posição das mãos em tempo real, mas reconhecimento de padrões e classificação de dados, não importa realmente como o algoritmo de Aprendizado de

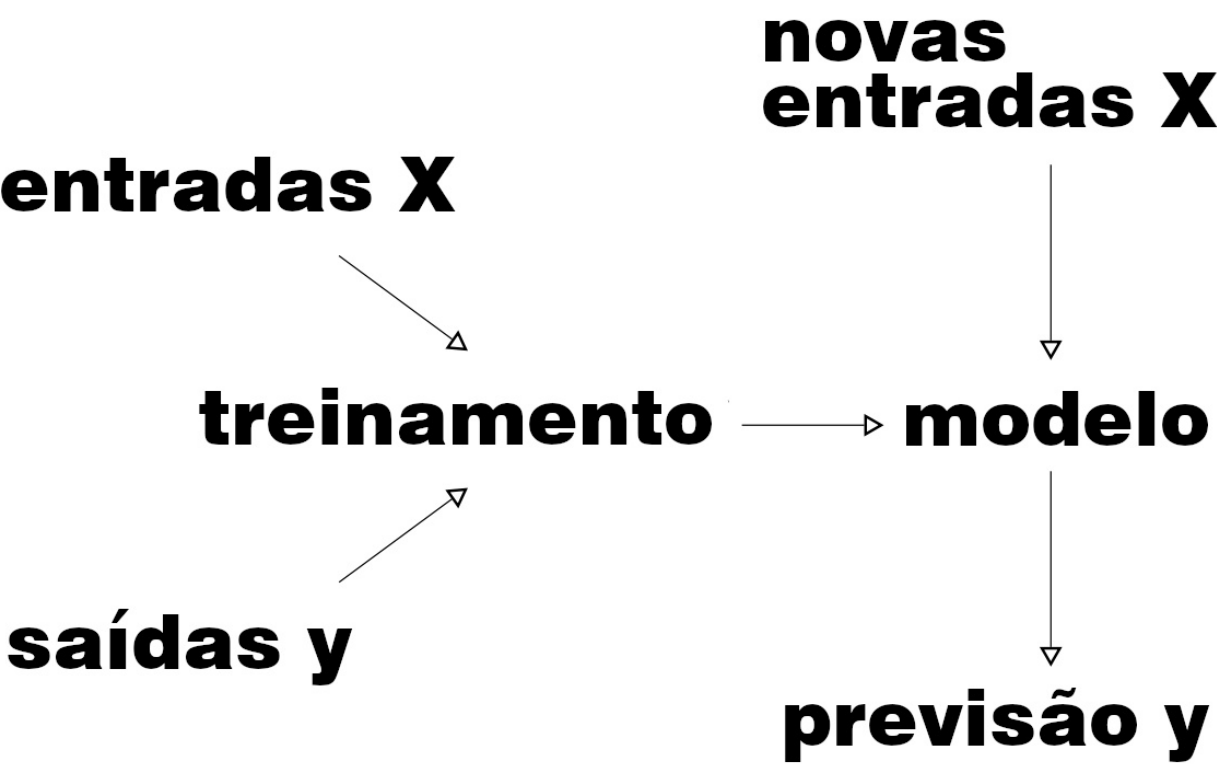


Fig. 12: Diagrama ilustrando a técnica de IA para classificação dos movimentos de percussão através do treinamento de um modelo estatístico

Máquina chega ao palpite correto. Ele simplesmente faz isso inferindo cada tipo de movimento por meio de um sistema (semi) caixa-preta. Ou seja, desde que essas 9 variáveis definidas empiricamente estejam sendo amostradas em um fluxo consistente, é possível criar um modelo de previsão útil a partir de dados de treinamento relevantes. Em outras palavras, classificar os diferentes movimentos de bateria por meio dessa técnica torna-se mais semelhante a lidar com um problema estatístico (amostrando primeiro muitos dados e depois comparando-os com novas entradas para fazer uma previsão) do que lidar com cinemática, trigonometria e cálculo (computar a posição e orientação do dispositivo). Este último requer dados idealizados que são quase impossíveis de serem obtidos, enquanto o primeiro é mais tolerante a pequenas imprecisões porque leva em conta os muitos pontos de dados diferentes em várias amostras. Isso não significa que uma abordagem estatística seja intrinsecamente melhor para esta tarefa, ou que IA seja necessariamente o caminho mais simples. Pelo contrário, as operações realizadas pelo TensorFlow.js são extremamente complexas. Essa complexidade, no entanto, está convenientemente encapsulada por uma camada de abstração que permite funções e comandos muito mais simples de compreender. O ponto que quero destacar aqui é que, na minha opinião, as ferramentas de IA disponíveis hoje permitem um poder de processamento nunca antes visto, que pode ajudar a resolver desafios de design de maneiras antes inimagináveis.

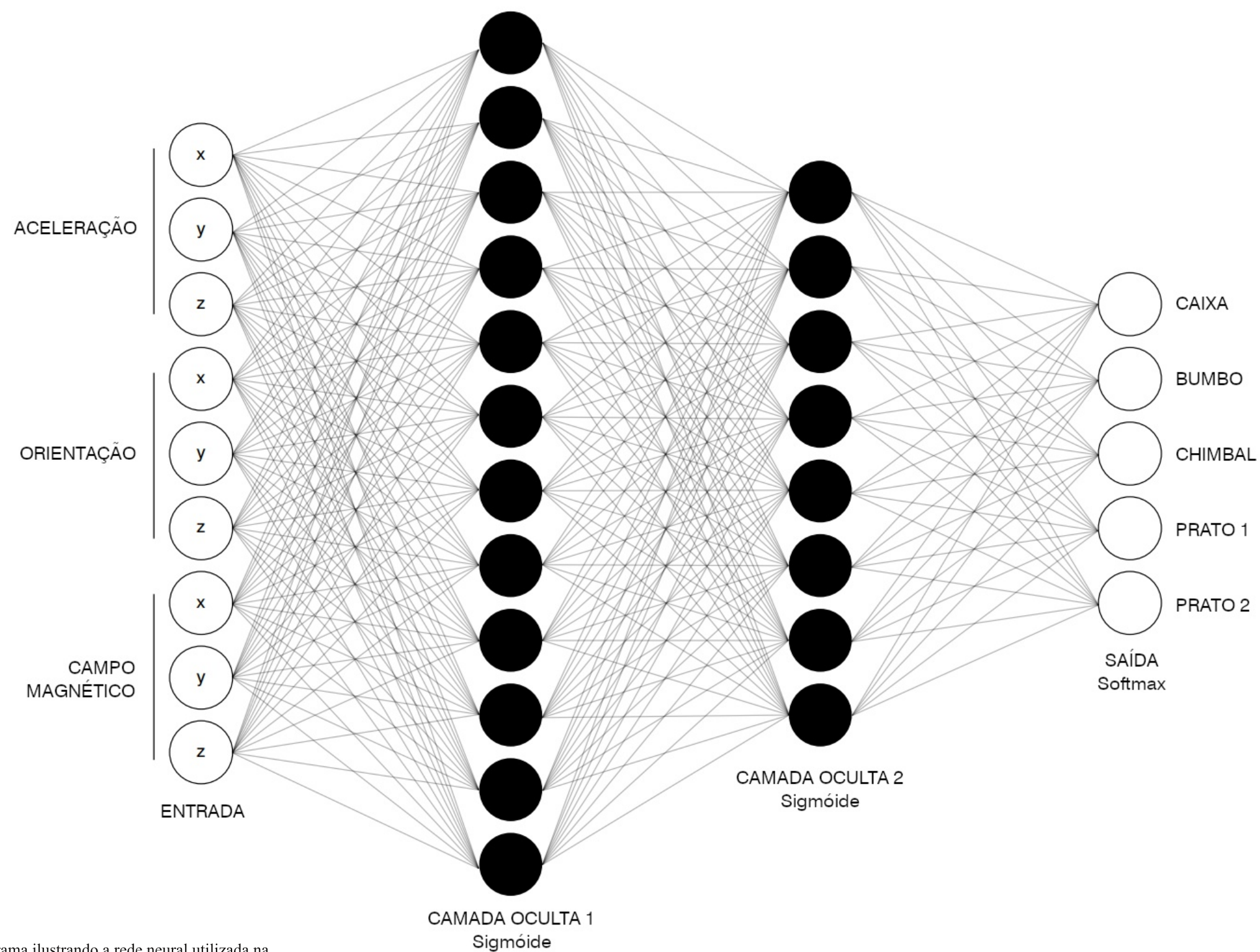


Fig. 13: Diagrama ilustrando a rede neural utilizada na terceira iteração do modelo de estudo dos controles



Fig. 14: Ataque e rebote
beatsure.com

1.2.3 O rebote: projetando um sistema de feedback tátil

A maioria dos instrumentos musicais de alguma forma proporciona aos músicos uma sensação de feedback tátil. Como em qualquer tipo de interface entre humanos e máquinas, fechar o ciclo é essencial para que a operação do equipamento seja transparente e intuitiva. É claro que o tipo de feedback mais óbvio que ocorre em instrumentos musicais é o fato de eles produzirem sons audíveis quando são tocados. No entanto, além do feedback auditivo, neste projeto, também estou interessado em investigar a resposta tátil que os músicos recebem de seus instrumentos. No estudo "A Functional Analysis of Haptic Feedback in Digital Musical Instrument Interactions", Young, Murphy e Weeter afirmam que:

Se são possíveis colocações multimodais no design de IMD (Instrumento Musical Digital), também deve ser possível simular a experiência tátil de uma performance acústica. O som pode ser criado eletronicamente com as liberdades proporcionadas pela geração de som digital e com as informações combinadas da resposta da interação sendo retroalimentadas com significado comparável a um instrumento acústico. (Young et al., 2018).

Curiosamente, em seu estudo, os sujeitos afirmaram perceber uma melhora significativa na facilidade de uso ao completar as tarefas propostas com feedback tátil em comparação com o não tátil.

Observando a terceira lei de Newton que diz que toda ação tem uma reação na direção oposta e de mesma magnitude, e dada a fisicalidade dos mecanismos de produção de som, é empiricamente claro que, quando um instrumento musical é tocado por meio de um golpe, aperto, fricção, sopro ou qualquer outra forma de ativação, os músicos naturalmente sentem as consequências mecânicas de seus movimentos. O grau em que isso é um esforço consciente de design varia. Como já mencionado, o piano, por exemplo, possui um mecanismo excepcionalmente complexo para proporcionar a sensação característica de peso em suas teclas. De maneira menos específica, os instrumentos de sopro às vezes possuem botões táteis montados com molas em mecanismos que abrem e fecham os furos em seu corpo. De forma ainda mais simples, instrumentos de cordas contam apenas com a tensão das cordas para oferecer alguma resistência à ação.

Objeto da minha pesquisa, a bateria é extremamente simples em relação ao seu mecanismo de feedback tátil: cada batida em um tambor ou prato recebe uma força de reação oposta nas baquetas. A simplicidade brutal deste sistema não significa, no entanto, que ele seja

uma característica supérflua nos instrumentos de percussão. Pelo contrário, considerando todos os casos contemplados aqui, a força de reação sentida nas baquetas é um fator de extrema relevância. Essa força de reação é chamada de "rebote" e sua importância é dupla: psicológica e técnica. A percepção psicológica do tempo é fortemente influenciada pela percepção tátil de bater nos tambores, sendo este um fator que ajuda os músicos a estabelecer o ritmo necessário de seus movimentos (Zatorre, 2018). Responsáveis por definir o pulso da música, os bateristas devem ter uma forte sensação interna de tempo e ser capazes de tocar em sincronia com o ritmo. Curiosamente, Aerodrums, uma das principais concorrentes no nicho de "air drumming", afirma em seu site que "Devido à aparente falta de rebote, os bateristas com quem conversamos frequentemente são céticos em relação a quão bom será tocar Aerodrums em comparação com uma bateria real".

Do ponto de vista da técnica de bateria, o rebote reposiciona as baquetas a cada batida, reduzindo substancialmente a quantidade de esforço físico que o músico precisa colocar na performance (Zahner, 2022). Tecnicamente falando, isso é necessário para tocar muitas notas rapidamente e de forma consistente. Alguns efeitos, como drum rolls (notas rápidas consecutivas), só são possíveis por causa da ação de rebote.

A partir da minha experiência na universidade, aprendi que é imprescindível no processo de design

experimental fisicamente conceitos com modelos de estudo.

Durante a fase de teste deste projeto, estudei muitos tipos diferentes de mecanismos de rebote, construindo modelos de estudo e executando simulações virtuais.

A intuição inicial foi completamente diferente dos resultados finais. Inicialmente, o mecanismo de rebote foi concebido como um mecanismo de movimento recíproco, com um êmbolo ferromagnético acionado por um solenóide e amortecido por ímãs permanentes nas extremidades. Cada ciclo de batida estenderia o êmbolo por ação da força centrífuga e, uma vez que atingisse a extremidade - o que deveria coincidir com a detecção da batida pelo algoritmo - o solenóide seria acionado por software, retraindo rapidamente o êmbolo e criando um deslocamento de massa que deveria ser percebido como o efeito de rebote. Essa hipótese foi testada utilizando a ferramenta MassFX no programa 3Ds Max, mas mostrou-se ineficaz em relação às forças de rebote quando comparada a um corpo sólido de mesma massa.

Recuando alguns passos, direcionei minha atenção para arranjos mecanicamente mais simples. Brincando com elásticos e molas, descobri que uma boa quantidade de força de feedback poderia ser obtida ao fixar pesos em materiais elásticos. Isso me levou ao que eventualmente

se tornaria a solução definitiva apresentada neste projeto.

Primeiro, tentei exagerar a sensação de rebote



Fig. 15 (acima): Motor de movimento recíproco baseado em um solenóide e ímãs permanentes - *Berto Aussems, YouTube*

Fig 16 (abaixo): Captura de tela de simulação de computador avaliando um mecanismo linear de feedback tátil, ou "rebote"



Fig. 17 e 18: Modelo de estudo do sistema de feedback tátil

utilizando palitos de madeira que eram muito leves e, portanto, não proporcionavam uma resposta tátil por si só. Fazendo com que o palito ficasse mais pesado na ponta, conectando a ele um parafuso grande preso com uma mola de aço, os movimentos de “air drumming” criaram uma força de reação significativa.

Melhorando essa ideia, tentei miniaturizar o mecanismo, usando uma pequena haste de plástico com várias porcas de aço como peso, e encapsulando a montagem em um recipiente de plástico. Os resultados foram ainda melhores porque, a cada batida, as porcas batiam levemente no recipiente. Embora os impactos fossem leves, o recipiente foi revestido com feltro para amortecer ainda mais o som do mecanismo.

Essa configuração foi escolhida porque foi considerada suficiente para transmitir a sensação de rebote. Mesmo não sendo exatamente a mesma resposta tátil experimentada ao tocar os tambores, os resultados foram muito mais satisfatórios do que utilizar, por exemplo, vibração como feedback ou, pior ainda, não ter nenhum feedback tátil.

Interessante notar que provavelmente esse mecanismo foi bem-sucedido porque ele imita de forma miniaturizada a ação de uma baqueta atingindo uma superfície. Essa solução é diametralmente oposta à que estava sendo investigada inicialmente, com muito menos complexidade, o que mostra que às vezes as soluções mais simples são as melhores, embora não necessariamente as mais óbvias.

PARTE 1: PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

1.3 Painéis semânticos

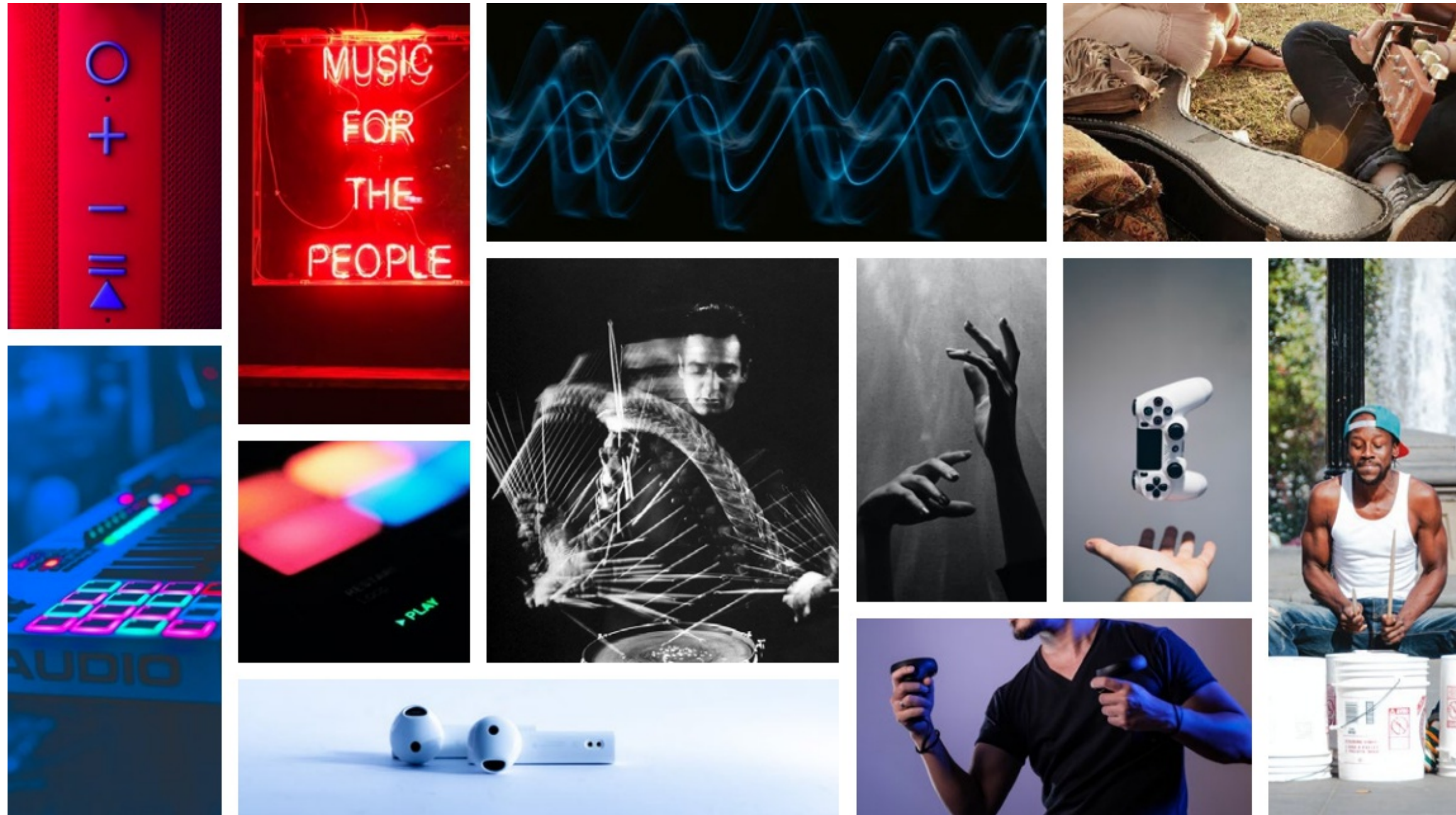


Fig. 19: Moodboard do projeto

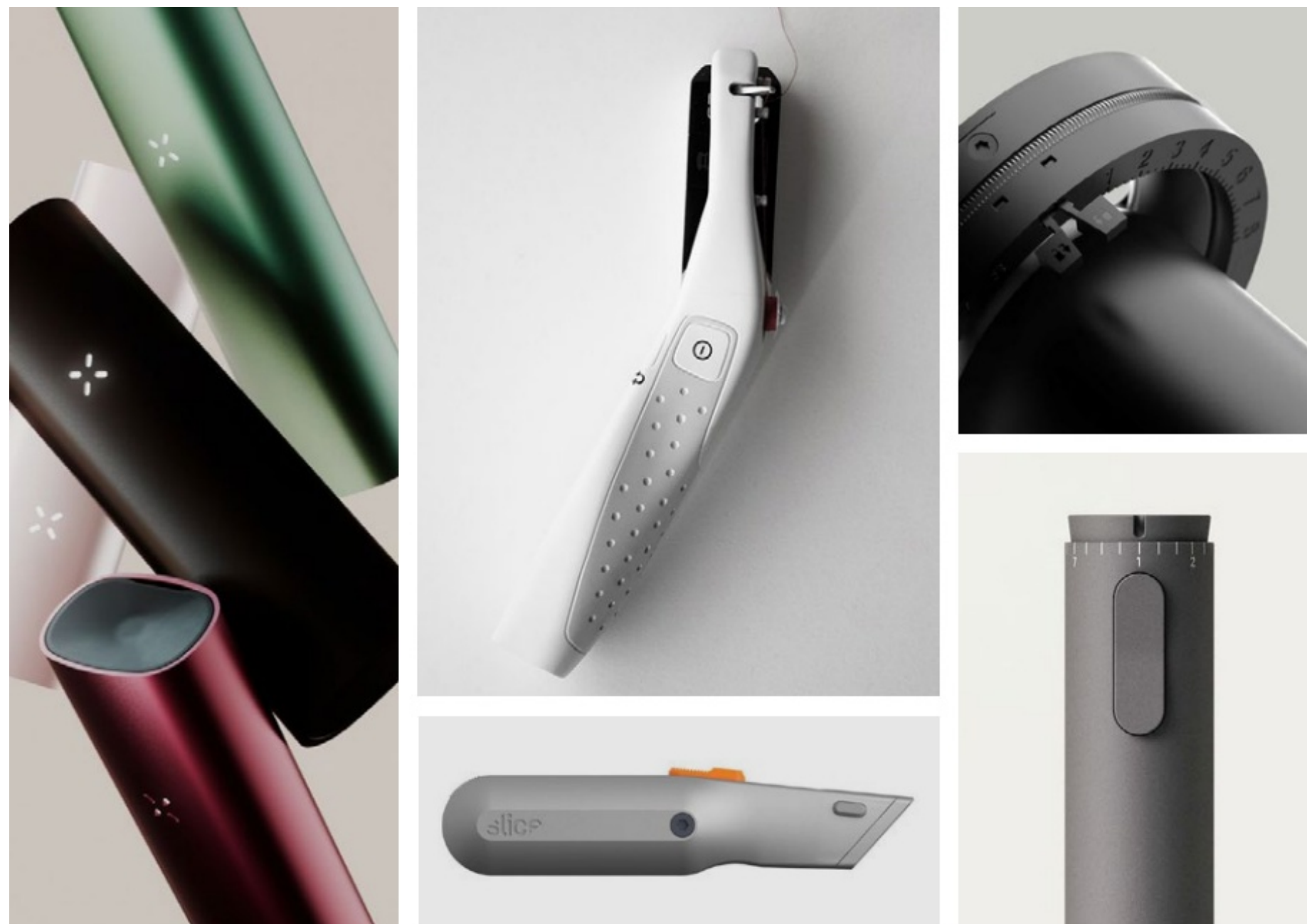


Fig. 20: Cores, materiais e acabamentos (CMF Board)

PARTE 1: PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

1.4 TruDrum

1.4.1 Controle

Considerando os painéis semânticos e os resultados da pesquisa técnica e de mercado, avancei para a criação do modelo 3D da forma física do produto. O objeto proposto é um dispositivo portátil com 3 centímetros de diâmetro e 14 centímetros de altura. Essas dimensões, decididas empiricamente, permitem acomodar a eletrônica e o mecanismo de rebatimento sem tornar o produto ser muito largo, o que seria prejudicial ergonomicamente, ou muito longo, o que afetaria a portabilidade. A forma física foi obtida a partir do gradiente geométrico entre uma circunferência na parte superior até um retângulo com cantos arredondados na parte inferior, e foi projetada para ter uma pega segura e confortável, baseado nas recomendações de Itiro Iida sobre geometrias de pega e seu impacto na ergonomia.

O controle foi projetado em plástico ABS, utilizando moldagem por injeção como técnica de fabricação. Este consiste em duas metades que são fixadas com um par de parafusos hexagonais M1.4.

O mecanismo de rebote simula o impacto em uma pele virtual de bateria por meio de uma martelo montado em uma mola. Esse sistema tem a grande vantagem de funcionar em qualquer direção, ou seja, não depende do ângulo em que os movimentos de braço ocorrem, pois possui simetria rotacional. O martelo é mais pesado na



Fig. 21: Render do do produto

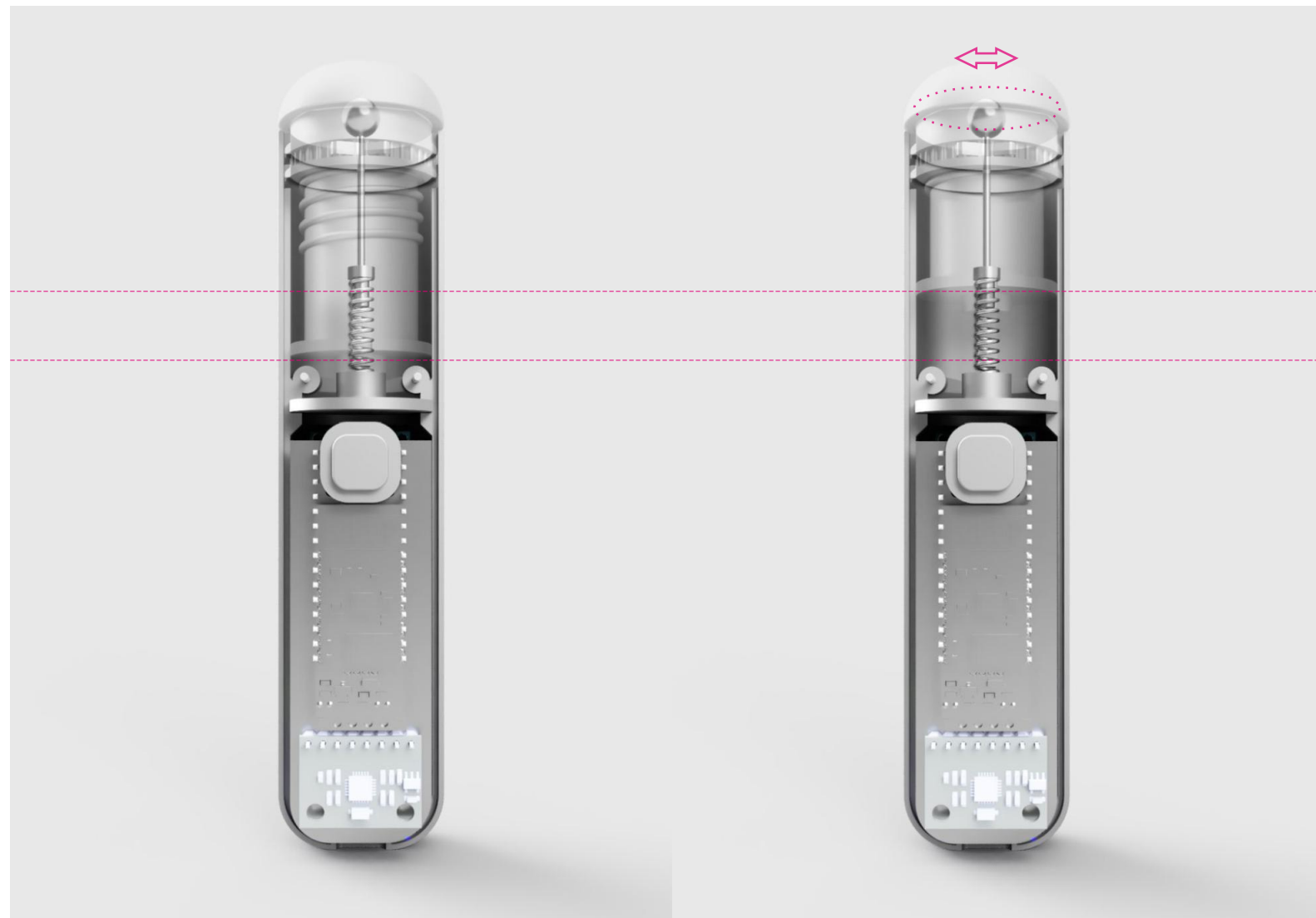


Fig. 22: Seção do produto ilustrando o ajuste do mecanismo de feedback tátil

parte superior, portanto, a cada retração do movimento, a força inercial faz com que seu peso se desloque para fora do centro. Quando o martelo é perturbado pelo movimento de percussão, a mola de aço tenta trazê-lo de volta para a posição central, criando o efeito de rebote. Quando isso acontece, o movimento é naturalmente amortecido, ou seja, o martelo ultrapassa a posição central, tensionando levemente a mola novamente, o que é repetido, cada vez com menos deformação na mola, até que ele pare. Outra vantagem desse mecanismo é que ele pode ser ajustado para se adequar melhor aos movimentos do usuário. Ao girar o knob de ajuste no sentido horário, o invólucro do mecanismo é internamente elevado em torno da base do martelo. Com isso, o comprimento disponível da mola diminui, tornando-a mais rígida e, portanto, mais difícil de ser deformada. Para o usuário, isso significa que é possível personalizar a intensidade da resposta tátil. Pessoas que preferem toques leves podem se beneficiar de uma configuração mais solta, com a mola mais aberta. Já aqueles que preferem toques mais fortes podem se beneficiar de uma configuração mais apertada, onde a força de entrada precisa ser mais forte para causar o deslocamento de massa.





1. Mola plana
2. Knob
3. Martelo
4. Mola espiral
5. Cápsula ajustável
6. Base do martelo
7. Paredes externas
8. Botão de ação
9. Componentes eletrônicos
10. Bateria
11. Parafusos M1.4 hexagonais

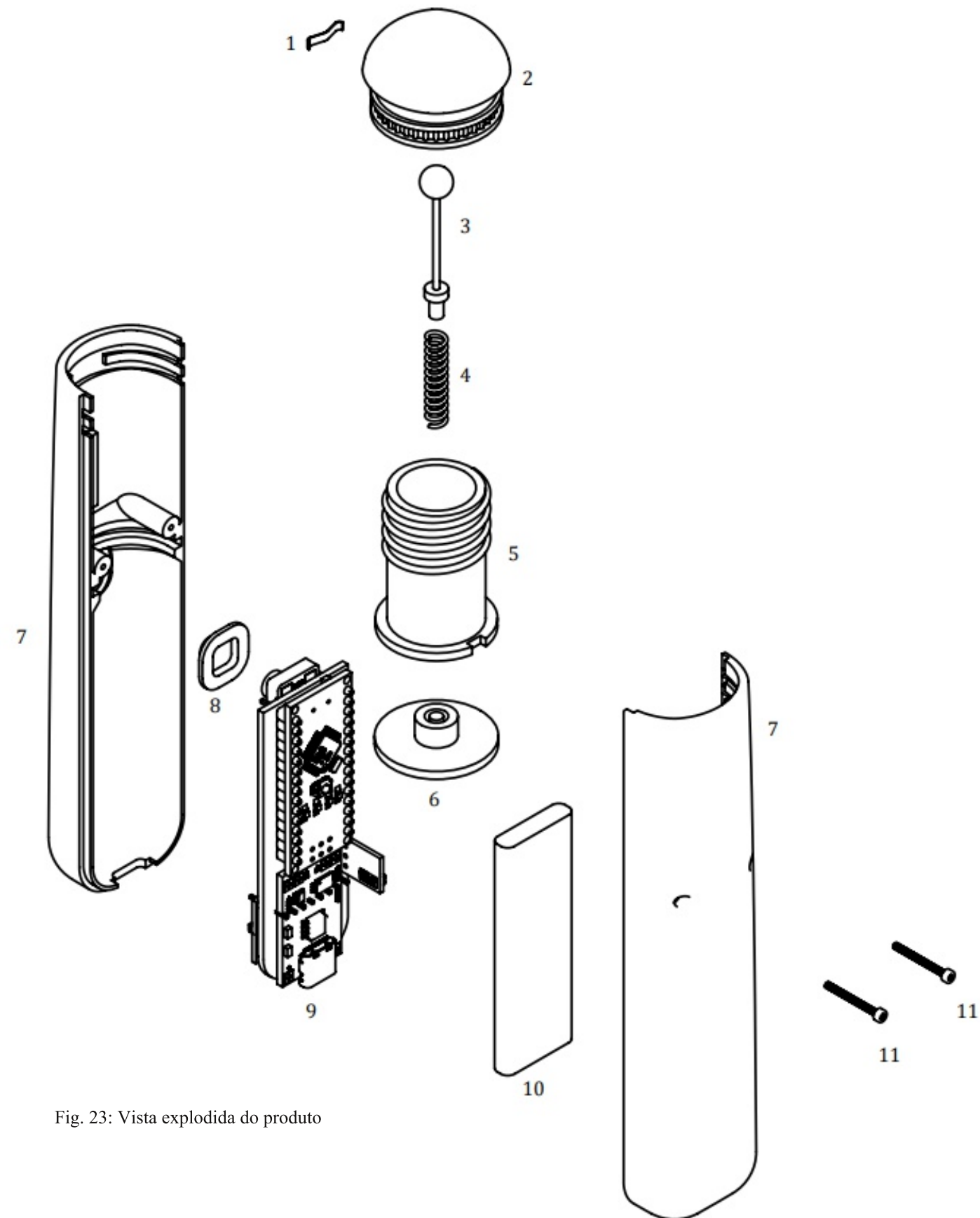


Fig. 23: Vista explodida do produto



Fig. 24: Ilustração da tela principal do App

1.4.2 App

De acordo com a pesquisa realizada, foi eleita uma abordagem descentralizada para reprodução de sons. Isso se dá devido ao fato de que, ao tocar, o usuário precisa de uma fonte de som confiável, sincronizada e pronta para ser conectada a um sistema de som externo. Durante a pesquisa, ficou claro que ter sons provenientes de cada dispositivo controlador não só era impraticável do ponto de vista de uso, mas também exigiria muito processamento, dada a escolha de usar IA para calcular os gestos musicais. A opção de embutir alto-falantes nos dispositivos controladores foi, portanto, descartada. Em vez disso, TruDrum propõe o uso de um smartphone comum como hub, emparelhando os dispositivos via Bluetooth e, em seguida, usando um aplicativo personalizado para processar os movimentos e acionar os sons.

O percurso de uso do aplicativo começa pelo processo de emparelhamento, passa para a etapa de calibração e, em seguida, exibe uma tela que mostra em tempo real qual tambor está sendo tocado. Além disso, o usuário pode usar um mixer para ajustar individualmente o volume de cada item do conjunto de bateria virtual, bem como ajustar o panning (posicionamento à esquerda/direita no espectro estéreo).

O processo de emparelhamento ocorre apenas na

primeira execução, desde que os dispositivos não sejam apagados da lista de dispositivos autorizados. A etapa de calibração deve ser feita sempre que o músico trocar de posição, pois os sensores dependem do campo magnético do ambiente, que varia de acordo com a localização geográfica e com a direção em que o músico está voltado, além de ser afetado por outras fontes de interferência magnética, como aparelhos eletrônicos e estruturas de metal. É possível, no entanto, salvar o modelo de

calibração e recarregá-lo em usos futuros, evitando a necessidade de repetir esta etapa. Por exemplo, se o músico estiver sentado no sofá, ele pode salvar esse conjunto de treinamento como, digamos, "Kit de Bateria do Sofá" e, em seguida, abri-lo sempre que estiver na mesma situação novamente.

Para registrar a posição virtual de cada item do conjunto de bateria, o usuário segue as instruções no aplicativo de maneira semelhante à forma como

dispositivos biométricos "aprendem" impressões digitais ou rostos. Em termos de Aprendizado de Máquina, isso equivale a rotular os dados de treinamento.

Na tela principal, o aplicativo reproduz sons de acordo com os movimentos detectados, com intensidade variável. A experiência de “air drumming” pode ser aproveitada pelos alto-falantes internos do smartphone, com fones de ouvido ou conectando o telefone como auxiliar em um sistema de som externo.



Fig. 25: Ilustração da primeira proposta de percurso de uso do App

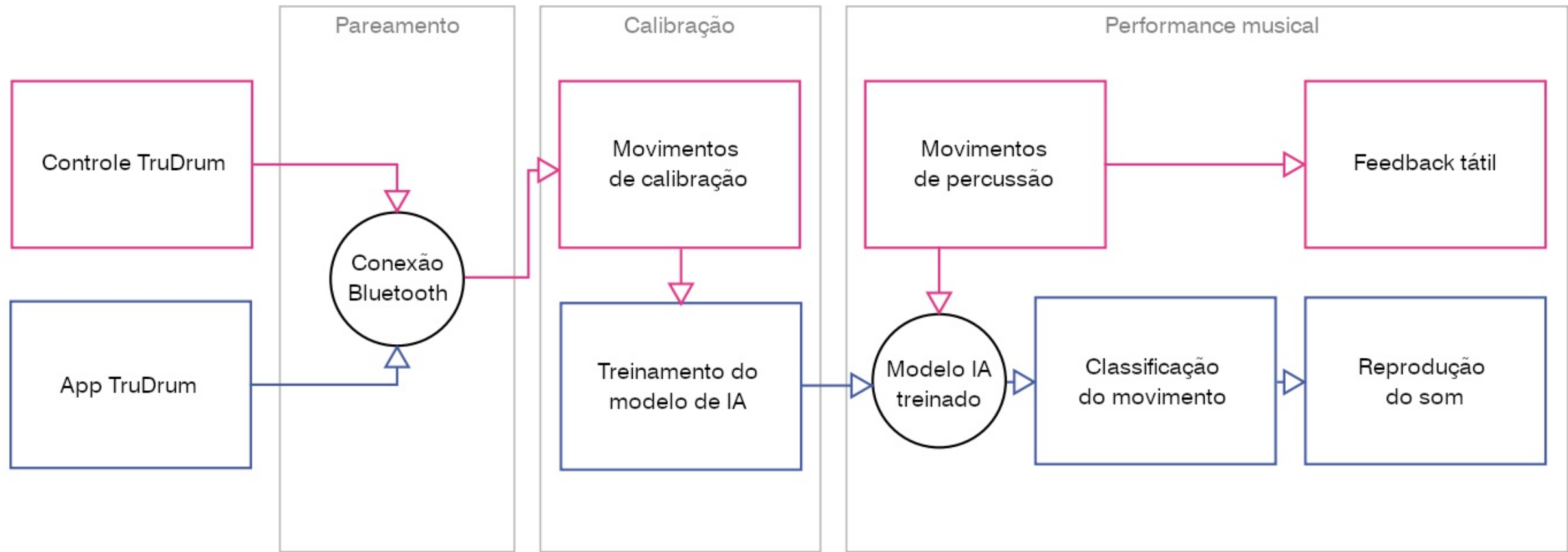


Fig. 26: Diagrama da arquitetura geral do sistema TruDrum

1.4.3 Arquitetura do sistema

Para melhor ilustrar o sistema, este gráfico mostra cada etapa da experiência de “air drumming”, desde o emparelhamento dos dispositivos, passando pela calibração, até a experiência musical. No centro do sistema, temos um modelo de Aprendizagem Profunda recebendo dados dos sensores MEMS e classificando qual item do kit está sendo tocado.

PARTE 2: TESTES COM USUÁRIOS

PARTE 2: TESTES COM USUÁRIOS

2.1 Objetivos da pesquisa com usuários

Com o intuito de validar alguns aspectos propostos na primeira etapa deste projeto, dois experimentos com usuários foram realizados. O primeiro experimento tinha como objetivo avaliar a eficácia do mecanismo de feedback tátil. O segundo buscava avaliar a experiência do usuário com o aplicativo.

Como mencionado anteriormente, este trabalho de conclusão de curso se trata da segunda iteração do projeto. Ao término da fase de pesquisa e desenvolvimento, instauraram-se dúvidas importantes com relação à aplicabilidade do produto. Especificamente, a ideia de oferecer feedback tátil e a ideia de fazer um sistema integrado que depende tanto de um produto físico quanto de um aplicativo eram questões que haviam sido, até então, prescritas apenas como resultado de análise de mercado e pesquisa tecnológica, sem a participação de usuários.

Especialmente considerando a visão de design da FAUUSP, o projeto carecia muito da co-criação com

potenciais usuários do produto, que pudessem opinar sobre a solução e apontar seus pontos fortes e fracos.

Esta parte do trabalho foi feita com o intuito de criar uma estrutura de testes escaláveis, que poderiam ser aplicados imediatamente com alguns participantes em uma espécie de piloto, mas que também pudessem ser realizados com rigor científico em uma possível próxima etapa com muitos mais participantes para atingir uma maior relevância estatística.

Nesse sentido, o número de participantes é reconhecidamente uma das principais limitações da análise aqui apresentada. Mesmo assim, o processo de projetar e aplicar os testes foi tratado com a devida diligência, tendo sido cada uma das etapas discutidas e ajustadas em atendimentos semanais com o professor orientador Dr. Ricardo Nakamura.

PARTE 2: TESTES COM USUÁRIOS

2.2 Experimento A: Precisão rítmica versus feedback tátil

Neste experimento, projetado para avaliar a eficácia do mecanismo háptico, os usuários foram solicitados a executar duas vezes uma mesma tarefa musical, sendo uma delas com feedback tátil e a outra sem. Em cada uma das rodadas, os movimentos dos participantes foram gravados e avaliados com relação à sua precisão rítmica.

A tarefa exigia que os usuários escutassem um clique de metrônomo através de fones de ouvido enquanto, simultaneamente, realizavam movimentos de percussão aéreos em fase com o ritmo, de forma mais precisa o possível. Para isso, os usuários foram instruídos a imaginar que os seus movimentos é que estavam causando as batidas. Durante a execução da tarefa, os usuários tinham em mãos um modelo do mecanismo de feedback tátil com massa e dimensões similares às do produto projetado, TruDrum.

Para avaliar os movimentos dos participantes, foi desenvolvido um programa de computador que permitia registrar a posição vertical de suas mãos através de uma câmera e vídeo. Esta informação era simultaneamente registrada de forma paralela ao toque do metrônomo, de modo que, analisando os dados obtidos, fosse possível saber precisamente o grau de sincronia dos movimentos do usuário com cada clique.



Fig. 27: Usuário realizando testes com o modelo funcional do mecanismo de feedback tátil

2.2.1 Metodologia do Experimento A

Descrição da tarefa

Os participantes eram convidados a se sentar confortavelmente em frente a um computador e então recebiam um par de fones de ouvido e um modelo do mecanismo de feedback tátil. Antes de iniciar, os participantes eram informados de que iriam escutar uma sucessão de cliques e que deveriam, tendo em mãos o modelo, se mover em sincronia com o ritmo, como se estivessem tocando um tambor invisível. Com o intuito de que eles estivessem profundamente envolvidos na tarefa rítmica, era sugerido aos participantes que tentassem imaginar que seus movimentos é que estavam causando o som que estavam escutando. Adicionalmente, os usuários eram informados que tinham o espaço de 4 ou 8 toques para se acostumar com o ritmo antes de começarem a se mover. Nenhuma informação adicional sobre o mecanismo de feedback tátil ou sobre o que estava sendo avaliado foi passada aos participantes.

Iniciando a tarefa, três cadências distintas eram reproduzidas sempre na mesma ordem, à 90, 120 e 60 BPM (beats per minute), cada ciclo tendo a duração de aproximadamente 30 segundos. Ao final da primeira rodada, os participantes então eram solicitados a refazer a tarefa, desta vez ativando o feedback tátil para aqueles que

tinham realizado o teste primeiramente com o mecanismo travado, ou o oposto para aqueles que tinham iniciado com o mecanismo já ativo.

Na conclusão da tarefa, os participantes foram convidados a resumir sua experiência, comentando sobre as diferenças na sensação tátil experimentada em cada etapa do teste e como este fator, segundo sua auto percepção, poderia ter influenciado seu desempenho na tarefa.

Participantes

Com o intuito de simular o perfil do público alvo do produto, cinco participantes com conhecimento e interesse musical variado foram selecionados para fazer o teste. Os participantes tinham entre 20 e 35 anos, com distintas formações e referências culturais. Nenhum participante era portador de necessidades especiais. Os participantes concordaram em fazer parte do teste sem nenhuma remuneração ou contrapartida.

Captura

Para registrar os movimentos dos participantes, foi utilizado um laptop equipado com uma webcam. Um programa de computador foi especialmente criado para lidar com a reprodução das cadências de metrônomo e

registrar os movimentos das mãos do usuário. Para o desenvolvimento deste programa, foi utilizado o framework de identificação de poses “PoseNet”, que é capaz de processar em tempo real a posição de pontos-chave do corpo através das imagens da câmera. Conhecendo a posição relativa das mãos dos participantes, é possível inferir o momento exato em que cada movimento de percussão é realizado.

Extração e tratamento de dados

Ao término de cada tarefa, os dados capturados foram exportados no formato CSV. Neste documento, constavam informações importantes para a análise, sendo as mais cruciais as coordenadas das mãos com relação ao frame do vídeo, a frequência analisada (BPM), o sinal do clique metrônomo e o timestamp da amostra. A taxa de amostragem foi de aproximadamente 10 samples por segundo, o que permitiu uma análise bastante precisa.

Dupla derivada com diferença finita central

Levando em conta o fato de que a ativação das notas ocorre com base na aceleração vertical das mãos, foi necessário utilizar o método de dupla derivada ou derivada de segunda ordem sobre a posição das mãos registrada pela câmera, através do qual a posição é

primeiramente convertida em velocidade e, em seguida, em aceleração. Para isso foi aplicada em cada derivada a fórmula de diferença finita central que, neste caso, melhor aproxima a tangente das curvas de posição e velocidade.

Isso significa que, considerando várias medições y ao longo de um tempo x, para calcular o valor da derivada z para um determinado instante t, utilizamos $\Delta y = y_{t+1} - y_{t-1}$ e $\Delta x = x_{t+1} - x_{t-1}$, avaliando os pontos de dados imediatamente antes e depois do ponto de interesse, resultando na fórmula:

$$Z_t = \frac{y_{t+1} - y_{t-1}}{x_{t+1} - x_{t-1}}$$

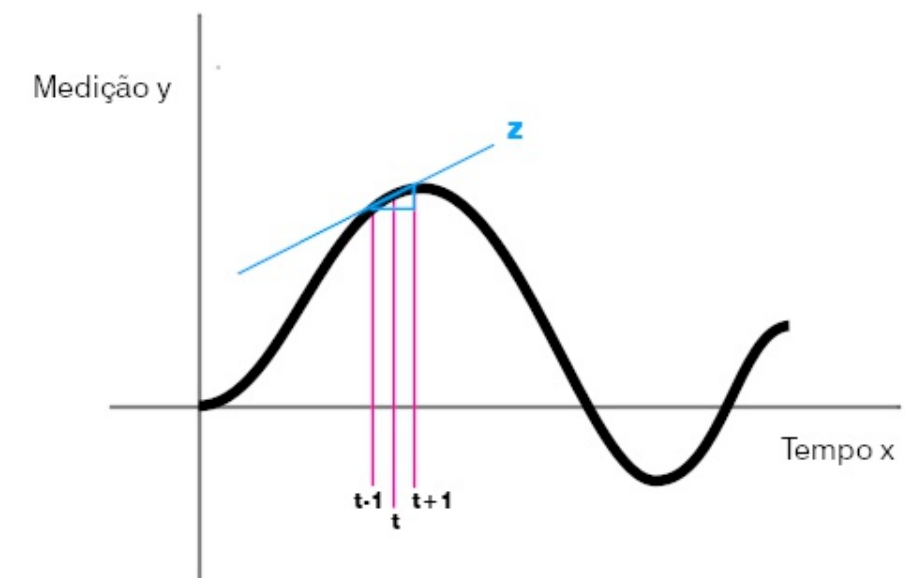


Fig. 28: Ilustração do método de diferença finita central para aproximar a tangente da curva de medições

Limiar de ativação

Tendo convertido a posição bruta das mãos em aceleração vertical, foi definido para cada caso um limiar de ativação.

Quando o participante toca uma nota, sua mão acelera rapidamente para baixo. O limiar de ativação determina quando um movimento das mãos deve ser considerado um gesto percussivo e é definido empiricamente através da análise dos dados plotados. Caso o limiar de ativação seja superado, o algoritmo de detecção de batidas monitora os valores seguintes procurando pelo valor mais baixo entre amostras adjacentes, ou seja, detectando o vale da curva de aceleração. Quando este valor é atingido, a nota é ativada,

isto é, um golpe é detectado.

O exemplo a seguir (Fig. 29) representa a análise de um ciclo, no qual um participante executou a tarefa a 60 bpm, com limiar de ativação definido em -3,5m/s².

No gráfico, a linha tracejada azul indica a aceleração das mãos, que é calculada a partir da posição bruta, representada pela linha amarela. Percebe-se que os vales da curva azul de aceleração - os quais representam a aceleração máxima durante um golpe e, no algoritmo de detecção de batidas, indicam a ativação da nota - são razoavelmente coincidentes com os cliques do metrônomo. Isso indica que os procedimentos de captura e tratamento dos dados tiveram resultados satisfatórios, indicando de forma bastante precisa as informações necessárias para a análise desta tarefa.

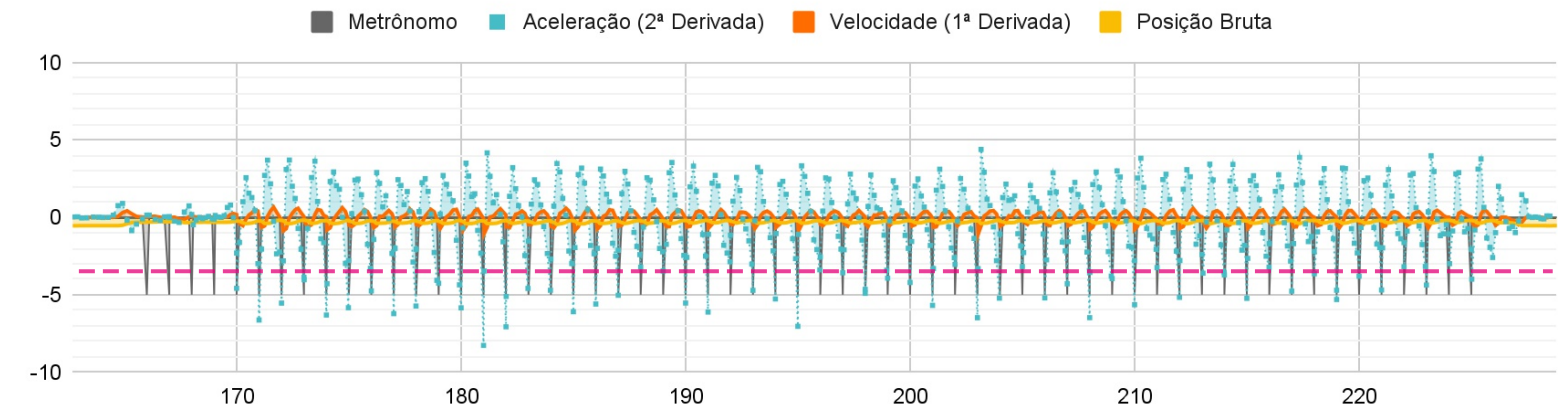


Fig. 29: Plotagem de uma rodada de experimentos, com participante tocando a 60 bpm. A linha tracejada rosa indica o limiar de ativação.

Sistema de avaliação de exatidão

Para viabilizar uma comparação entre a exatidão das performances dos participantes, foi aplicado um sistema de pontuação que levava em conta a sincronicidade dos movimentos com o clique do metrônomo. A métrica utilizada foi a seguinte: 1 ponto se a ativação coincide com o sinal do metrônomo em uma mesma amostra; 0,5 pontos se ativação está em uma amostra imediatamente anterior ou posterior ao sinal do metrônomo; 0,3 pontos se a ativação está a duas amostras de distância do sinal do metrônomo; 0,1 pontos se a ativação está a três amostras de distância do sinal do metrônomo.

$$Exatidão = \frac{pontos\ obtidos}{golpes\ detectados}$$

Esta pontuação é então dividida pelo número de golpes detectados, resultando no percentual de exatidão na tarefa, isto é, o grau de proximidade entre os valores medidos (tentativa) e o valor de referência ideal (alvo).

Interpretação	Distância entre golpe e clique (samples)	Lag médio estimado (milissegundos)	Pontuação
A ativação coincide com o clique	0	< 100	1
A ativação foi detectada imediatamente antes ou depois do clique	1	100	0,5
A ativação está a duas amostras de distância do sinal do metrônomo	2	200	0,3
A ativação está a três amostras de distância do sinal do metrônomo	3	300	0,1

Fig. 30: Tabela de pontuação utilizada para classificar a exatidão da tarefa

Se o número de golpes detectados é menor ou igual ao número de cliques tocados:

$$Precisão = \frac{\text{golpes detectados}}{\text{cliques tocados}}$$

Senão:

$$Precisão = \frac{\text{golpes detectados} - (\text{golpes detectados} - \text{cliques tocados})}{\text{cliques tocados}}$$

Sistema de avaliação de precisão

O parâmetro de precisão, ou seja, o grau de consistência e reprodutibilidade e dos resultados é calculado com base na razão entre os movimentos de percussão detectados e o número de cliques de metrônomo reproduzidos. Idealmente, o usuário deveria realizar o mesmo número de movimentos que o número de cliques de metrônomo, desconsiderando os beats introdutórios durante os quais o usuário não tocava.

A ativação de notas pelo usuário em número excessivo ao número de batidas de metrônomo também é considerada como desvio na precisão, sendo a diferença subtraída do numerador na fração golpes detectados / cliques tocados.

2.2.2 Discussão dos resultados do Experimento A

Tendo consolidado os resultados dos ciclos de teste realizados, o primeiro ponto que chamou a atenção foi o fato de que, exceto no ritmo mais rápido de 120 bpm, houve uma melhora na exatidão com o uso do mecanismo de feedback tátil, especialmente nos ciclos mais lentos, a 60 bpm.

Na média geral, o grau de exatidão do experimento foi de 76,08% considerando todas as rodadas

com e sem feedback tátil. Com o mecanismo bloqueado o resultado médio indicou 74,76% de exatidão. Já com o mecanismo ativado o resultado foi de 77,41%. Na média geral, o feedback tátil ajudou em 2,65% na sincronia entre os gestos de percussão e os beats do metrônomo.

Nos ciclos de 60 bpm, com ou sem feedback tátil, os participantes demonstraram maior dificuldade de manter o ritmo com exatidão, produzindo uma pontuação média de 70,86% (75,59% com feedback tátil e 66,13% sem). Acredito que a razão para isso não esteja ligada ao

design do experimento em si, mas a alguma característica psicomotora relacionada à ideia de um “relógio interno”. Aparentemente, segundo os resultados deste teste e segundo várias discussões em fóruns de bateria e música em geral, manter uma noção correta de tempo, isto é, ser capaz de prever a próxima ocorrência de um evento cíclico é naturalmente mais difícil em frequências mais lentas. Interessantemente, foi nesses ciclos mais lentos que o dispositivo de feedback tátil mais influenciou na exatidão, melhorando-a em 9,46%.

A 90 bpm os graus de exatidão foram virtualmente os mesmos, com ou sem feedback tátil, apresentando uma pontuação média de 75,77%, com uma diferença registrada de 0,02% a favor do feedback tátil.

Nos ciclos mais rápidos, de 120 bpm, apesar de a exatidão média ter sido 81,62%, a maior registrada, o mecanismo háptico teve as piores performances, com diferença de 1,51% a favor da ausência do feedback tátil (exatidão de 80,86% com feedback tátil e de 82,38% sem). Refletindo sobre este ponto, um motivo possível para o resultado desfavorável pode estar ligado ao fato de que, em ritmos mais acelerados, não há tempo suficiente para que o mecanismo volte para a posição inicial, o que está relacionado ao tempo do movimento de oscilação propiciado pela mola. Este resultado aponta para a importância da existência de um mecanismo de ajuste da tensão da mola, validando aspectos propostos na etapa de

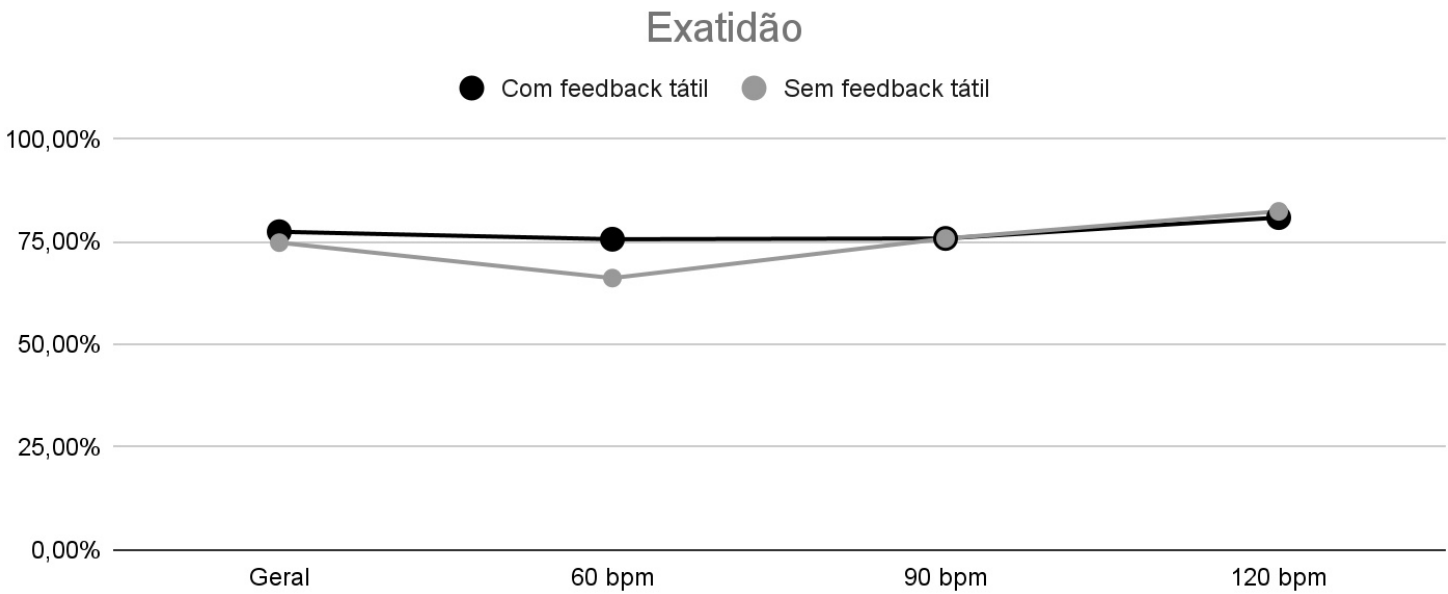


Fig. 31: Gráfico do percentual de exatidão medido nas tarefas

pesquisa e desenvolvimento.

Considerando a precisão ou reprodutibilidade dos resultados, o mecanismo háptico pareceu ligeiramente pior, ficando consistentemente um pouco abaixo das medidas realizadas sem feedback tátil. Na média, tocar com o mecanismo desativado foi 3,02% mais preciso, com diferença de 2,57% a 60 bpm, 2,63% a 90 bpm e 3,85% a 120 bpm, sempre a favor da ausência do feedback. Uma possível explicação para estes resultados é a observação de que existe uma curva de aprendizagem no uso do

produto, ou seja, pode ser que o elemento da novidade tenha causado mais erros, fazendo com que os participantes perdessem notas ou tocassem notas a mais.

Para ter uma análise mais detalhada da precisão do experimento em diferentes pulsações, podemos analisar também o gráfico de notas perdidas ou em excesso, que indica a quantidade de erros cometidos pelos participantes. Nota-se que a 90 bpm, uma velocidade nem muito rápida, nem muito lenta, ocorrem menos erros.

Apesar da sua utilidade como elemento de

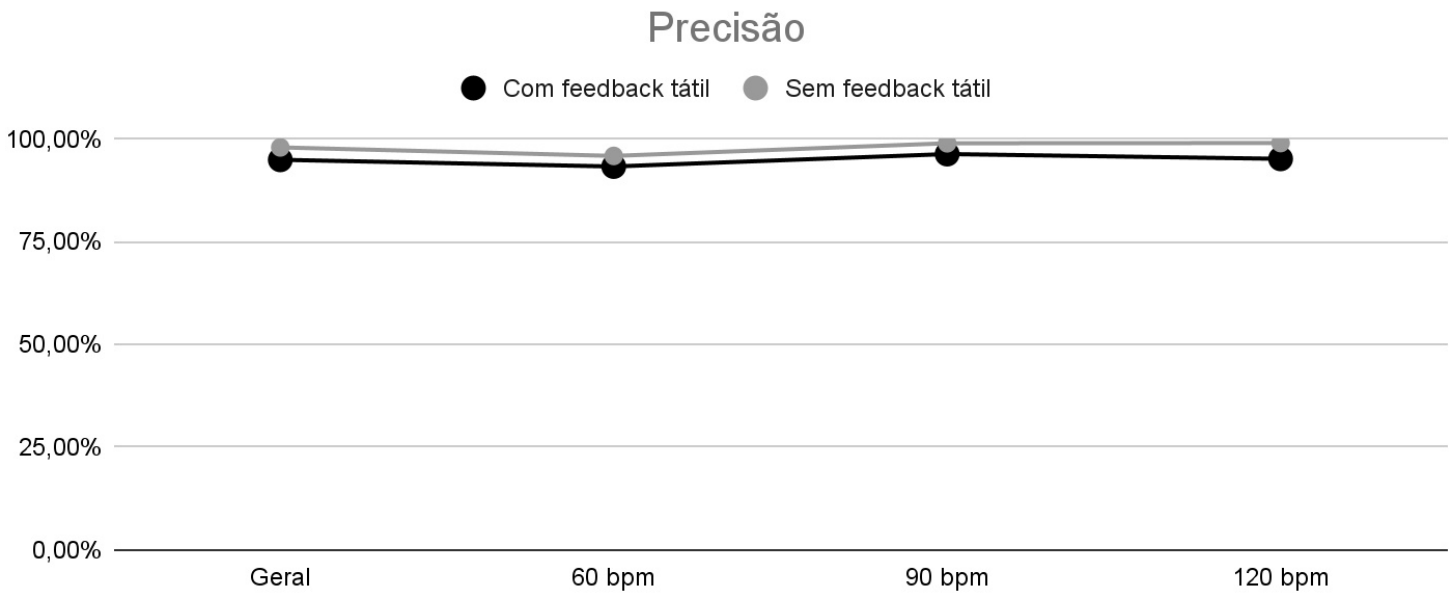


Fig. 32: Gráfico do percentual de precisão medido nas tarefas

narrativa visual, a plotagem de notas perdidas ou em excesso deve ser interpretada levando em conta que, comparada à quantidade de notas tocadas, a taxa de erros não é tão significativa, o que indica que o experimento é aceitável como ferramenta de medição para a validação ou refutamento das hipóteses. Para complementar este ponto, podemos analisar também os gráficos que indicam a quantidade de cliques do metrônomo versus golpes detectados. Apesar de se notar uma diferença mais pronunciada entre esses parâmetros quando com o mecanismo ativo, vê-se que a discrepância não é grande o suficiente para colocar em dúvida a eficácia dos testes.

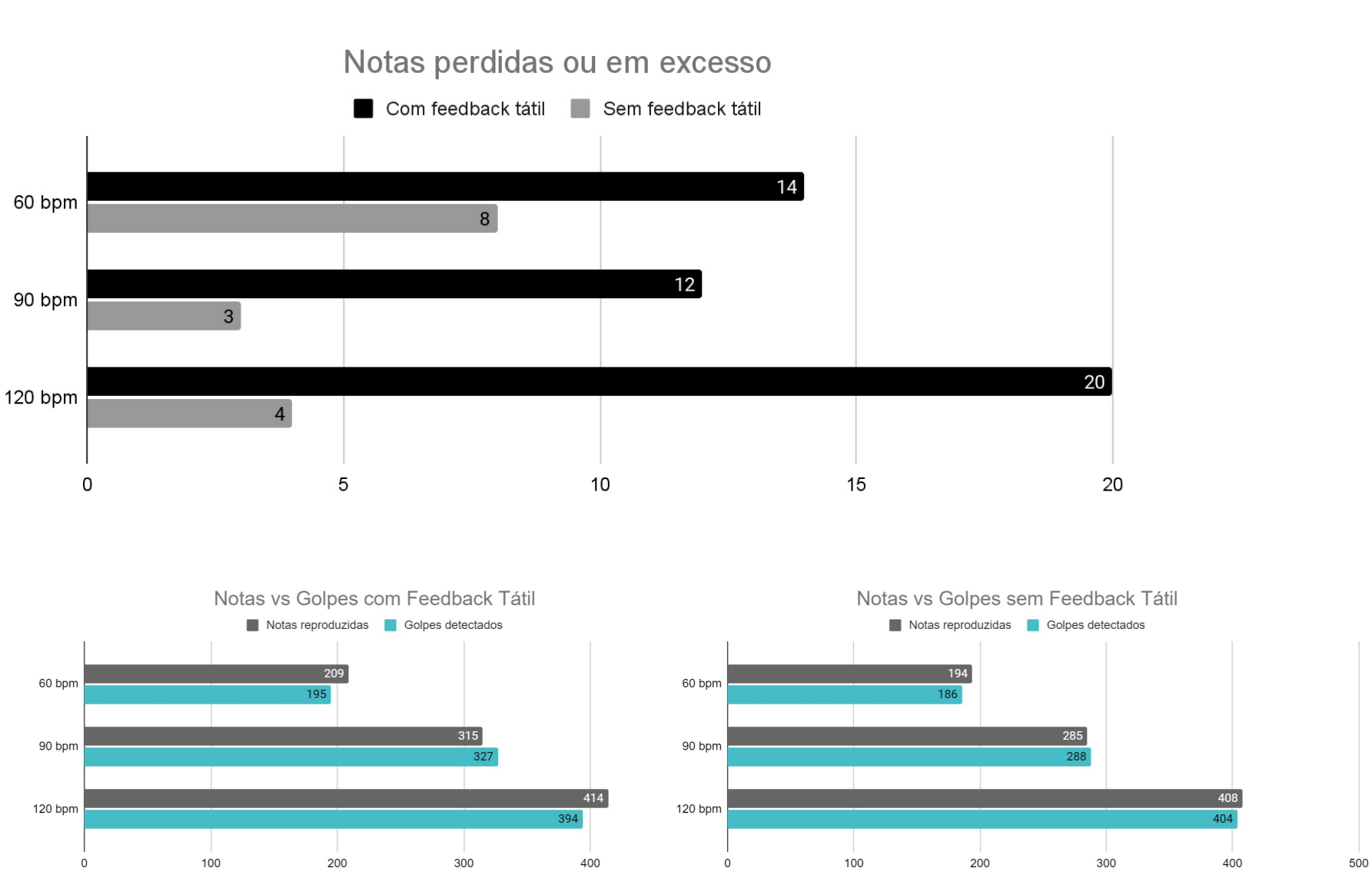


Fig. 33 (acima): Gráfico da quantidade de erros detectados nas tarefas
Fig. 34 e 35 (abaixo): Gráficos da disparidade entre notas reproduzidas e golpes detectados

Como considerações finais sobre o primeiro experimento, a opinião dos participantes proporcionou alguns insights interessantes, como o fato de que a preferência por ter ou não retorno tátil não foi unânime, além do fato de que as expectativas dos participantes com relação a sua performance (dados qualitativos) foram geralmente corroboradas pelos resultados (dados quantitativos).

Participante 1

“Comecei o experimento com o mecanismo de feedback, senti que me ajudou bastante na hora de acertar os bits, a resposta me deu consciência de que estava tocando algo "tátil" o que ajudou a entender o final do movimento. Da segunda vez foi um pouco mais difícil de compreender em que ponto parar, deixando os movimentos mais longos e portanto mais complicado de acertar o beat. Em geral, o feedback tátil foi útil para o teste.”

Participante 2

“O teste foi fácil. Daniel nos pediu para tentar manter um ritmo por um curto período de tempo. Percebi que havia algo diferente com a baqueta na segunda vez. A princípio pude sentir algum tipo de mecanismo, algum tipo de vibração, que não estava presente depois. Não sei se essa vibração/mecanismo ajudou de alguma forma a manter o ritmo, mas foi um bom feedback.”

Participante 3

“Na minha opinião, o teste foi bastante simples. Daniel me instruiu a sincronizar meus movimentos com os cliques em vários BPMs. Na segunda rodada, experimentei uma sensação de impacto, como se tivesse acertado um objeto no ar. Parecia que eu estava atingindo um alvo invisível.”

Participante 4

“Preferi tocar com o mecanismo desligado. Com ele ligado, senti uma sensação de “delay” e ficou mais difícil manter o ritmo.”

Participante 5

“Achei que fui melhor na vez em que escutava as batidas (se referindo ao mecanismo ativo), fica mais fácil saber a hora de tocar.”

PARTE 2: TESTES COM USUÁRIOS

2.3 Experimento B: Validação do percurso de uso do App

Este experimento foi desenvolvido com o objetivo de validar as hipóteses da primeira iteração de projeto com relação à experiência do usuário com o aplicativo TruDrum.

Notavelmente, o processo de configuração inicial necessário para realizar o pareamento e calibragem dos dispositivos é um momento crítico da experiência de uso pois é repleto de potenciais dúvidas, possibilidade de erro e frustração por parte do usuário.

Para testar o percurso no aplicativo, foi desenvolvido um protótipo na ferramenta Figma, no qual os usuários experimentavam estes primeiros passos e eram entrevistados sobre suas impressões com o produto.

2.3.1 Metodologia do Experimento B

Descrição da tarefa

Os participantes receberam um protótipo do aplicativo rodando em um smartphone Android e foram vagamente orientados sobre a ação a ser realizada, sublinhando a necessidade de realizar um processo de configuração inicial de um produto sem auxílio externo. O objetivo detalhado do projeto de produto foi propositalmente omitido.

Os usuários foram convidados a registrar uma opinião prévia de como eles imaginam que esse processo

deveria acontecer. Em seguida, eles realizaram a configuração inicial, fazendo o percurso da tela de boas vindas até o modo de calibragem no app.

Nos pontos em que a interação com o controle era necessária, os participantes foram orientados a simular esta ação com um modelo de aparência simplificado.

Na conclusão da tarefa, os participantes foram entrevistados e foram registrados insights sobre a tarefa executada comparando-a às suas expectativas.

Participantes

Dois participantes com perfil representativo do público-alvo realizaram o teste e deram suas opiniões sobre o percurso de uso do aplicativo.

Entrevistas

Para estimular depoimentos imparciais, deixando que os participantes guiassem os insights e, com isso, promovendo um ambiente de co-criação, apenas duas perguntas foram feitas: (1) Qual foi a sua percepção geral do processo?; E (2) Quais são os pontos fortes e fracos neste processo?

Os comentários recebidos se traduzem em três

principais insights: (a) Deve haver um número mínimo de etapas introdutórias para evitar frustração; (b) A etapa de pareamento possui um ponto crítico que pode introduzir confusão; E (c) A proposta de produto não fica completamente clara considerando o aplicativo de forma isolada.

2.3.2 Discussão dos resultados do Experimento B

Os pontos levantados pelo segundo experimento ajudaram a entender os pontos fortes e fracos do percurso de uso do aplicativo.

A primeira constatação é a de que o número mínimo de etapas introdutórias para evitar frustração do usuário. Os participantes concordaram unanimemente que aplicativos nos quais existem muitas etapas introdutórias, como tutoriais ou telas de cadastro, o nível de interesse cai drasticamente. Tentando mitigar este problema, nesta segunda iteração o aplicativo sofreu algumas mudanças, abdicando da abordagem inicial de apresentar telas introdutórias de configuração, as quais adiavam a chegada a tela principal, em favor de um sistema de assistente que indica, através da sobreposição de balões de fala, quais são os passos necessários para a configuração do produto.

Outra constatação importante foi a de que, como a operação do sistema exige o pareamento entre o aplicativo

e o controle, e como existirão dois ou mais controles conectados simultaneamente, o diálogo apresentado na tela do app pode ser um ponto de confusão. Isso ocorre porque, considerando a possibilidade de o usuário poder parear apenas um dispositivo por vez, o botão de conclusão fica disponível assim que pelo menos um controle tenha sido encontrado. Neste ponto, um participante relatou que, segundo sua percepção, o botão aparece “antes da hora”, já que ainda havia mais coisas a serem feitas nesta etapa. Este será um ponto a ser avaliado e melhorado nas próximas iterações de projeto.

Finalmente, uma outra constatação interessante foi a de que, considerando apenas o aplicativo e o seu processo de configuração inicial, a finalidade do produto não é clara. Um tipo de comentário que surgiu em mais de uma ocasião é que o produto se trata de um tipo jogo, ou aplicativo para treinar ritmos, e não especificamente um produto de bateria eletrônica, ou um instrumento musical digital. Este fator, apesar de alarmante, não indica necessariamente o fracasso do projeto pois, em um cenário de uso real, a descoberta do produto seria provavelmente primeiro através do conhecimento do produto físico e, só após a sua aquisição, o usuário entraria em contato com o aplicativo.

CONCLUSÃO

CONCLUSÃO

3.1 Objetivos alcançados e limitações do projeto

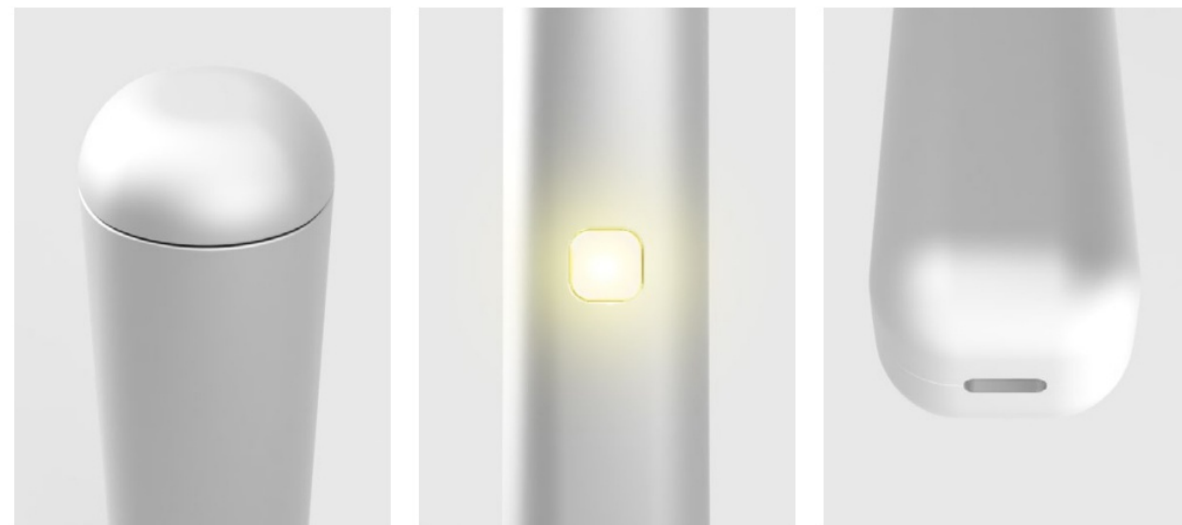


Fig. 36, 37 e 38: Ilustração das características e funções do produto

A música alcança sua forma mais concreta durante sua execução ou reprodução. Para tocar um instrumento, um músico precisa realizar uma série de gestos musicais ensaiados. A importância desses gestos foi o ponto de partida desta tese. Foi analisado como os instrumentos são projetados para permitir tais interações e como um novo instrumento eletrônico poderia ser concebido aproveitando as tecnologias atuais para usar o

movimento como entrada. Os três principais aspectos estudados foram como componentes microeletromecânicos podem ser empregados para detectar movimentos, como a aprendizagem de máquina pode processar essa entrada em gestos musicais compreensíveis e como o feedback tátil é importante para fechar o ciclo nos instrumentos musicais. Os resultados alcançados apontam para a confirmação da hipótese inicial.

Na primeira etapa, uma prova de conceito funcional foi desenvolvida na qual foi validado que a partir da detecção dos movimentos das mãos é possível tocar bateria sem um conjunto de bateria física. Essas batidas virtuais carregam informações tanto sobre qual tambor está sendo tocado quanto com que intensidade. Usando o Tensorflow.js, uma biblioteca de aprendizagem de máquina para javascript, essas informações foram traduzidas em saídas sonoras discretas com intensidade variável, o que é extremamente desejável em termos de expressividade na música.

O feedback tátil, inicialmente pensado como um sistema eletromecânico secundário, foi na verdade melhor alcançado por meio de um mecanismo passivo muito menos complexo, o que mostra que às vezes as soluções mais simples são as mais adequadas. Um martelo montado em uma mola dentro do dispositivo foi testado empiricamente para simular a ação do rebote com sucesso

CONCLUSÃO

relativo. Embora não seja exatamente o mesmo que tocar bateria de verdade, foi considerado suficiente para transmitir o feedback tátil desejado. Além disso, com esse método, a elasticidade da mola pode ser ajustada alterando seu comprimento disponível, criando uma experiência mais personalizável para o usuário.

Assim nasce o TruDrum. Sua forma foi projetada considerando o hardware prototípico necessário para realizar as tarefas musicais descritas. O produto consiste em um par de controladores de 3x14 cm, com geometria amigável ao manuseio, apresentando um botão de interação e um knob para o ajuste do rebote. Esse dispositivo portátil foi projetado para ser usado em conexão com um aplicativo externo que lida com a reprodução dos sons de forma descentralizada. Tecnicamente, os dispositivos também poderiam ser conectados a Estações de Trabalho de Áudio Digital (DAWs) para serem usados como controladores MIDI, ampliando ainda mais a aplicabilidade do produto como ferramenta musical. TruDrum torna a percussão mais acessível, facilitando performances de bateria tanto em cenários recreativos quanto profissionais.

Na segunda etapa, foram realizados dois experimentos para validar alguns aspectos do projeto. O primeiro experimento avaliou o feedback tátil, enquanto o segundo avaliou a experiência do usuário com o aplicativo. Esta segunda iteração do projeto buscou sanar

dúvidas sobre a aplicabilidade do produto, que até então havia sido baseado puramente em análises de mercado e pesquisa tecnológica, sem a participação de usuários.

Reconhecendo a importância da co-criação com potenciais usuários para obter insights sobre pontos fortes e fracos da solução, foram criados testes escaláveis, que foram aplicados com alguns participantes em uma fase piloto e que poderiam ser realizados com mais participantes para obter resultados estatisticamente mais relevantes. Apesar do fato de que número de participantes é admitidamente uma limitação deste trabalho, o processo de projeto e aplicação dos testes foi conduzido com o devido rigor científico.

Os testes da segunda etapa confirmaram a relevância do feedback tátil, com uma melhora média geral de 2,65% na sincronia entre os gestos de percussão e os beats do metrônomo, quando utilizando o feedback. O feedback tátil se mostrou particularmente relevante em ritmos mais lentos, proporcionando melhora de 9,46% na exatidão dos golpes.

Outros insights interessantes obtidos a partir da pesquisa com usuários são o fato de que deve haver um número mínimo de etapas introdutórias na configuração do aplicativo e que a etapa de pareamento entre o controle e o app se trata de um ponto crítico, que pode introduzir confusão.

3.1 Objetivos alcançados e limitações do projeto

CONCLUSÃO

3.2 Desafios para próximas iterações



Fig. 39: Pedal de bumbo tradicional
roland.com

O design de produtos prevê várias iterações para chegar à solução ideal. Nestas primeiras iterações, apenas os controladores análogos às baquetas foram projetados. Os próximos passos envolveriam investigar os controles de pedal necessários para uma experiência completa de bateria. Os principais desafios aqui estão relacionados ao fato de que, devido aos requisitos de forma, os pedais são mais complicados considerando sua portabilidade. Em um kit de bateria tradicional, eles são pesados e volumosos e possuem um mecanismo de rebote próprio relativamente complexo. Reduzir a ação do pedal e sua respectiva resposta tátil em um dispositivo portátil não é uma tarefa trivial e poderia ser objeto de uma nova tese.

Os itens de hardware propostos no presente trabalho são componentes modulares que caracterizam um protótipo. No produto final comercializável, seria

desejável projetar uma placa de circuito impresso personalizada com todos os componentes necessários embutidos. Isso poderia simplificar a implementação interna, abrindo novas possibilidades em termos de geometria e distribuição de peso.

Por fim, seria necessário revisar o design do aplicativo de smartphone proposto. Nesta primeira versão, decidiu-se que este lida apenas com o pareamento dos dispositivos para reproduzir sons por meio do alto-falante interno, fones de ouvido ou saída de linha. Versões futuras poderiam oferecer muitos outros recursos, como empregar Realidade Aumentada e/ou Realidade Virtual para fornecer feedback visual ou usar o conceito de gamificação como um catalisador na educação musical, entre outras possibilidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahamed, N.U., Krajewski, K.T., Johnson, C.C., Sterczala, A.J., Greeves, J.P., Wardle, S.L., O’Leary, T.J., Mi, Q., Flanagan, S.D., Nindl, B.C., and Connaboy, C. (2021) ‘Using Machine Learning and Wearable Inertial Sensor Data for the Classification of Fractal Gait Patterns in Women and Men During Load Carriage’, *Procedia Computer Science*, Vol. 185, pp.282-291
- Bakan, M. (2011) *World music: Traditions and transformations*, New York: McGraw-Hill.
- Banathy, B.H. (1996) *Designing Social Systems in a Changing World*, Springer US
- Berencsi, A., Gombos, F., Gervan, P., Troznai, Z., Utczas, K., Oláh, G., and Kovács, I. (2022) ‘Musical training improves fine motor function in adolescents’, *Trends in Neuroscience and Education*, Vol. 27, Article 100176
- Bongers, A.J. (1998) ‘Tactual display of sound properties in electronic musical instruments’, *Displays*, Vol. 18, Issue 3, pp.129-133
- British Design Council (2019) *Framework for Innovation: Design Council’s evolved Double Diamond*. Available at: <https://www.designcouncil.org.uk/our-work/skills-learning/tools-frameworks/framework-for-innovation-design-councils-evolved-double-diamond/> (Accessed: 01 November 2022)
- Cabibihan, J.J., Alhaddad, A.Y., Gulrez, T., and Yoon, W.J. (2022) ‘Dataset for influence of visual and haptic feedback on the detection of threshold forces in a surgical grasping task’, *Data in Brief*, Vol. 42, Article 108045
- Complete Vocal Institute (2014) *Complete Vocal Technique*. Available at: <https://completevocal.institute/complete-vocal-technique/> (Accessed: 01 November 2022)
- Coorevits, E., Maes, P.J., Six, Y., and Leman, M. (2020) ‘The influence of performing gesture type on interpersonal musical timing, and the role of visual contact and tempo’, *Acta Psychologica*, Vol. 210, Article 103166
- Dam, R.F. (2021) *The MAYA Principle: Design for the Future, but Balance it with Your Users’ Present*. Available at: <https://www.interaction-design.org/literature/article/designfor-the-future-but-balance-it-with-your-users-present> (Accessed: 01 November 2022)
- De Canio, F. and Fuentes-Blasco, M. (2021) ‘I need to touch it to buy it! How haptic information influences consumer shopping behavior across channels’, *Journal of Retailing and Consumer Services*, Vol. 61, Article 102569
- De Souza, Jonathan (2014) ‘Voice and Instrument at the Origins of Music’, *Current Musicology*, No. 97
- Del Vecchio, M., De Marco, D., Pigorini, A., Fossataro, C., Cassisi, A., and Avanzini, P. (2022) ‘Vision of haptics tunes the somatosensory threshold’, *Neuroscience Letters*, July 2022, Article 136823
- Digo, E., Gastaldi, L., Antonelli, M., Pastorelli, S., Cereatti, A., and Caruso, M. (2022) ‘Real-time estimation of upper limbs kinematics with IMUs during typical industrial gestures’, *Procedia Computer Science*, Vol. 200, pp.1041-1047
- Ellinger, J. (2012) *MUSC 101 Music Fundamentals - Spring 2012*. Available at: <https://people.carleton.edu/~jellinge/m101s12/Pages/01/01SoundBasics.html> (Accessed: 01 November 2022)
- Fang, H., Guo, J., and Wu, H. (2022) ‘Wearable triboelectric devices for haptic perception and VR/AR applications’, *Nano Energy*, Vol. 96, Article 107112
- Fersurella, G., Della Torre, A., Quaranta, F., Losito, P., D’Alessandro, L., Invitto, S., and Rinaldi, R. (2022) ‘A wearable and smart actuator for haptic stimulation’, *Micro and Nano Engineering*, July 2022, Article 100161
- Friesen, K.B., Lanovaz, J.L., Moraes, R., and Oates, A.R. (2022) ‘Don’t get tripped up: Haptic modalities alter gait characteristics during obstacle crossing’, *Human Movement Science*, Vol. 82, Article 102935
- Ganesan, Y., Gobee, S., and Durairajah, V. (2015) ‘Development of an Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Feedback from EMG and IMU Sensor’, *Procedia Computer Science*, Vol. 76, pp.53-59
- Gibbs, J.K., Gillies, M., and Pan, X. (2022) ‘A comparison of the effects of haptic and visual feedback on presence in virtual reality’, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 157, Article 102717
- Gil, G.D., Zemiti, N., Walker, J.M., Péchereau, F., and Poignet, P. (2022) ‘Enabling 4-DoF hand guidance using a portable haptic device exerting tangential force on the user’s finger pads’, *Mechatronics*, Vol. 86, Article 102868
- Hamadicharef, B. and Ifeachor E.C. (2012) ‘Intelligent and perceptual-based approach to musical instruments sound design’, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, Issue 7, pp.6476-6484
- Hartvigsen, D. (2010) ‘Optimal electronic musical instruments’, *European Journal of Operational Research*, Vol. 206, Issue 3, pp.614-622
- Hemery, E., Manitsaris, S., Moutarde, F., Volioti, C., and Manitsaris, A. (2015) ‘Towards the Design of a Natural User Interface for Performing and Learning Musical Gestures’, *Procedia*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manufacturing, Vol. 3, pp.6329-6336

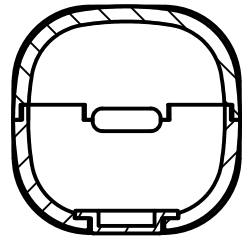
- Hu, X., Chen, J., and Wang, Y. (2021) ‘University students’ use of music for learning and well-being: A qualitative study and design implications’, Information Processing & Management, Vol. 58, Issue 1, Article 102409
- Hua, H., Chen, Y., Tao, Y., Qi, D., and Li, Y. (2022) ‘A highly transparent haptic device with an extremely low driving voltage based on piezoelectric PZT films on glass’, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 335, Article 113396
- Huang, Y., Yao, K., Li, J., Li, D., Jia, H., Liu, Y., Yiu, C.K., Park, W., and Yu, X. (2022) ‘Recent advances in multi-mode haptic feedback technologies towards wearable interfaces’, Materials Today Physics, Vol. 22, Article 100602
- Jean, F. and Albu, A.B. (2008) ‘The visual keyboard: Real-time feet tracking for the control of musical meta-instruments’, Signal Processing: Image Communication, Vol. 23, Issue 7, pp.505-515
- Jespersen, O. (1954) Language: its Nature, Development and Origin, 10th Edition, London: George Allen & Unwin LTD
- Kang, N., Sah, Y.J., and Lee, S. (2021) ‘Effects of visual and auditory cues on haptic illusions for active and passive touches in mixed reality’, International Journal of HumanComputer Studies, Vol. 150, Article 102613
- Kim, W. and Xiong, S. (2022) ‘Pseudo-haptics and self-haptics for freehand mid-air text entry in VR’, Applied Ergonomics, Vol. 104, Article 103819
- Kim, W.C. and Mauborgne, R. (2005) Blue Ocean Strategy, Harvard Business Review Press
- Kok, M., Hol, J.D. and Schön, T.B. (2017) ‘Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation’, Foundations and Trends in Signal Processing: Vol. 11: No. 1-2, pp 1-153
- Latham, S.J. (2003) ‘Newton v. Diamond: Measuring the Legitimacy of Unauthorized Compositional Sampling— A Clue Illuminated and Obscured’, Hastings Communications and Entertainment Law Journal, Vol. 26, Issue 1, Article 3
- Leverkus, A. (2022) What Is a Musical Tone?. Available at: <https://www.musicaexpert.org/what-is-a-musical-tone.htm> (Accessed: 01 November 2022)
- Li, Z., Liu, Z., and Zhao, L. (2021) ‘Improved robust Kalman filter for state model errors in GNSS-PPP/MEMS-IMU double state integrated navigation’, Advances in Space Research, Vol. 67, Issue 10, pp.3156-3168
- Logozzo, S., Valigia, M.C., and Malvezzi M. (2022) ‘Modelling the human touch: A basic study for haptic technology’, Tribology International, Vol. 166, Article 107352
- Lopes, J., Simão, M., Mendes, N., Safaea, M., Afonso, J., and Neto, P. (2017) ‘Hand/arm Gesture Segmentation by Motion Using IMU and EMG Sensing’, Procedia Manufacturing, Vol. 11, pp.107-113
- MacLean, K.E. (2022) ‘Designing affective haptic experience for wellness and social communication: where designers need affective neuroscience and psychology’, Current Opinion in Behavioral Sciences, Vol. 45, Article 101113
- Mould, S. (2019) How a quartz watch works - its heart beats 32,768 times a second. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=_2By2ane2I4 (Accessed: 01 November 2022)
- Mudd, T., Holland, S., and Mulholland, P. (2019) ‘Nonlinear dynamical processes in musical interactions: Investigating the role of nonlinear dynamics in supporting surprise and exploration in interactions with digital musical instruments’, International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 128, pp.27-40
- Ottink, L., Buimer, H., Van Raalte, B., Doeller, C.F., Van Der Geest, T.M., and Van Wezel, J.A. (2022) ‘Cognitive map formation supported by auditory, haptic, and multimodal information in persons with blindness’, Neuroscience & Biobehavioral Reviews, Vol. 140, Article 104797
- Pierce, J.R. (1999) The Psychology of Music (Second Edition) - Cognition and Perception, Academic Press, pp.1-23
- Podoprosvetov, A.V., Alisejchik, A.P., and Orlov, I.A. (2021) ‘Comparison of action recognition from video and IMUs’, Procedia Computer Science, Vol. 186, pp.242-249
- Pott, P.P. (2022) Endorobotics - Design, R&D and Future Trends, Academic Press, pp.257-274
- Ramón, L.N. and Chacón-López, H. (2021) ‘The impact of musical improvisation on children’s creative thinking’, Thinking Skills and Creativity, Vol. 40, Article 100839
- Rogers, E.M. (2003) Diffusion of Innovations, 5th Edition, Free Press
- Sarrazin, N. (2016) Music and the Child, Open SUNY Textbooks
- SAS (2022) Computer Vision: What it is and why it matters. Available at: https://www.sas.com/en_us/insights/analytics/computer-vision.html (Accessed: 01 November 2022)
- Schölkopf, L., Lorenz, M., Stamer, M., Albrecht, L., Klimant, P., Hammer, N., and Tümler, J. (2021) ‘Haptic feedback is more important than VR experience for the user experience assessment of in-car human machine interfaces’, Procedia CIRP, Vol. 100, pp.601-606

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

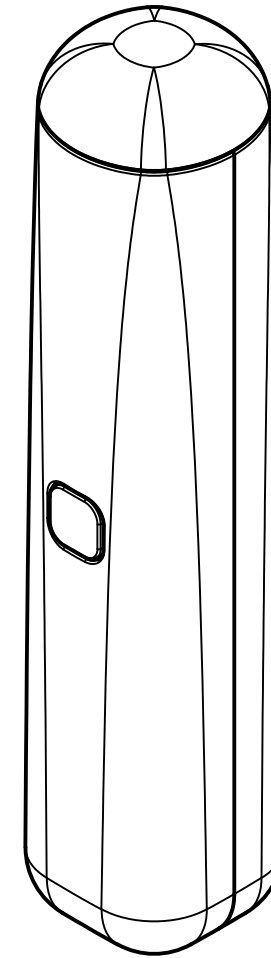
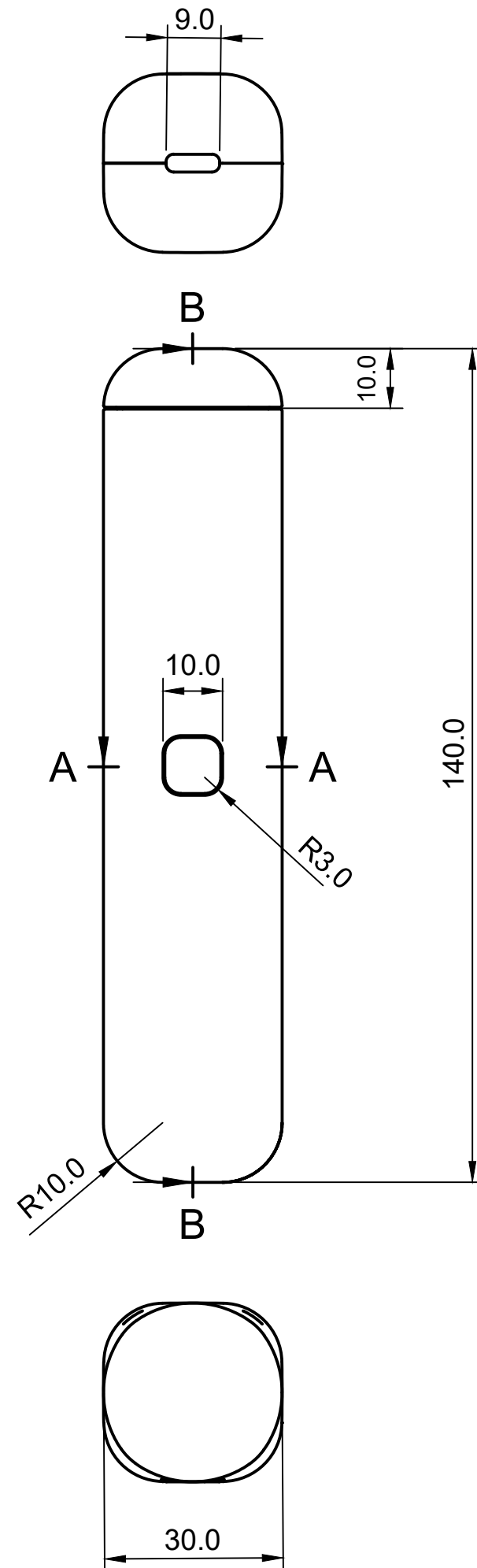
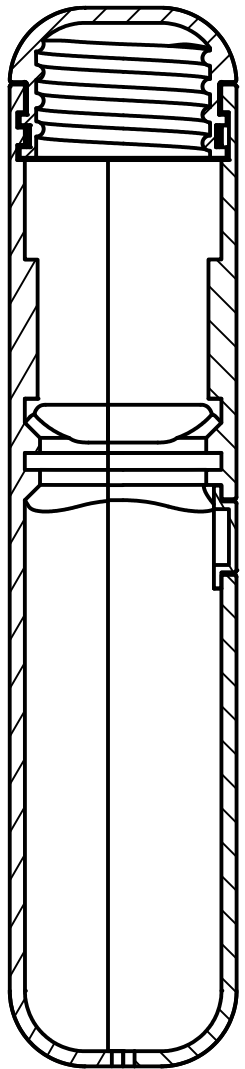
- Tanaka, K., Parker, J., Baradoy, G., Sheehan, D., Holash, J.R. and Katz, L. (2012) ‘A Comparison of Exergaming Interfaces for Use in Rehabilitation Programs and Research’, Loading... The Journal of the Canadian Game Studies Association, Vol. 6, Issue 9, pp. 69-81
- Tao, W., Lai, ZH., Leu, M.C., and Yin, Z. (2018) ‘Worker Activity Recognition in Smart Manufacturing Using IMU and sEMG Signals with Convolutional Neural Networks’, Procedia Manufacturing, Vol. 26, pp.1159-1166
- Trehub, S.E. and Hannon, E.E. (2009) ‘Conventional rhythms enhance infants’ and adults’ perception of musical patterns’, Cortex, Vol. 45, Issue 1, pp.110-118
- Turchet, L., Antoniazzi, F., Viola, F., Giunchiglia, F., and Fazekas, G. (2020) ‘The Internet of Musical Things Ontology’, Journal of Web Semantics, Vol. 60, Article 100548
- Turchet, L., Bouquet, P., Molinari, A., and Fazekas, G. (2022) ‘The Smart Musical Instruments Ontology’, Journal of Web Semantics, Vol. 72, Article 100687
- Van Dijk, M.P., Van Der Slikke, R.M.A., Rupf, R., Hoozemans, M.J.M., Berger, M.A.M., and Veeger, D.H.E.J. (2022) ‘Obtaining wheelchair kinematics with one sensor only? The trade-off between number of inertial sensors and accuracy for measuring wheelchair mobility performance in sports’, Journal of Biomechanics, Vol. 130, Article 110879
- Wei, J., Karuppiah, M., and Prathik, A. (2022) ‘College music education and teaching based on AI techniques’, Computers and Electrical Engineering, Vol. 100, Article 107851
- Wikipedia (2022) Wind instrument. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_instrument (Accessed: 01 November 2022)
- Wikipedia (2022) String instrument. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/String_instrument (Accessed: 01 November 2022)
- Wikipedia (2022) Percussion instrument. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Percussion_instrument (Accessed: 01 November 2022)
- Woody, R.H. (2021) Psychology for Musicians: Understanding and Acquiring the Skills (2nd edn), Oxford University Press
- Wu, M., Fan, M., Hu, Y., Wang, R., Wang, Y., Li, Y., Wu, S., and Xia, G. (2022) ‘A real-time tennis level evaluation and strokes classification system based on the Internet of Things’, Internet of Things, Vol. 17, Article 100494
- Wu, Y. and Bryan-Kinns, N. (2019) ‘Musicking with an interactive musical system: The effects of task motivation and user interface mode on non-musicians’ creative engagement’, International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 122, pp.61-77
- Xu, L., Zhang, K., Yang, G., and Chu, J. (2022) ‘Gesture recognition using dual-stream CNN based on fusion of sEMG energy kernel phase portrait and IMU amplitude image’, Biomedical Signal Processing and Control, Vol. 73, Article 103364
- Ye, Y., Shi, Y., Srinivasan, D., and Du, J. (2022) ‘Sensation transfer for immersive exoskeleton motor training: Implications of haptics and viewpoints’, Automation in Construction, Vol. 141, Article 104411
- Young, G.W., Murphy, D. and Weeter, J. (2018) ‘A Functional Analysis of Haptic Feedback in Digital Musical Instrument Interactions’, Musical Haptics, pp 95–122, Springer, Cham
- Zahner, K. (2022) Drum Techniques and Rudiments – A Guide to Great Hands. Available at: <https://rhythmnotes.net/drum-techniques-and-rudiments/> (Accessed: 01 November 2022)
- Zatorre, R. (2018) From Perception to Pleasure: How Music Changes the Brain. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=KVX8j5s53Os> (Accessed: 01 November 2022)
- Zhou, B., Wang, H., Hu, F., Feng, N., Xi, H., Zhang, Z., and Tang, H. (2020) ‘Accurate recognition of lower limb ambulation mode based on surface electromyography and motion data using machine learning’, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 193, Article 105486
- Zhu, Z., Xu, Z., and Liu, J. (2022) ‘Application of Lightweight Deep Learning Model in Vocal Music Education in Higher Institutions’, Computational Intelligence and Neuroscience, Vol. 2022, Article 6757341

ANEXOS

A-A (1:1)



B-B (1:1)

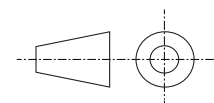


AUTHOR: DANIEL S.

PROJECT: TRUDRUM

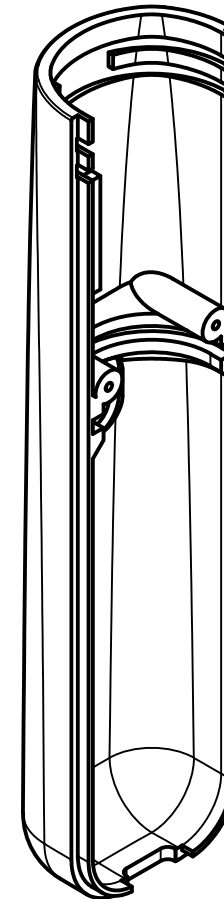
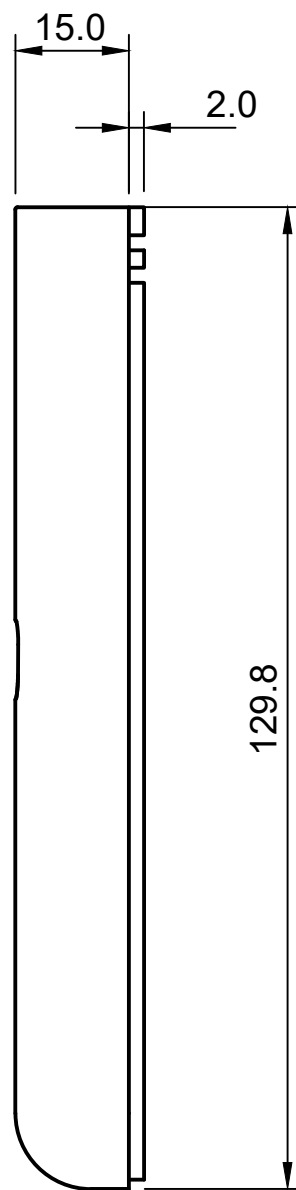
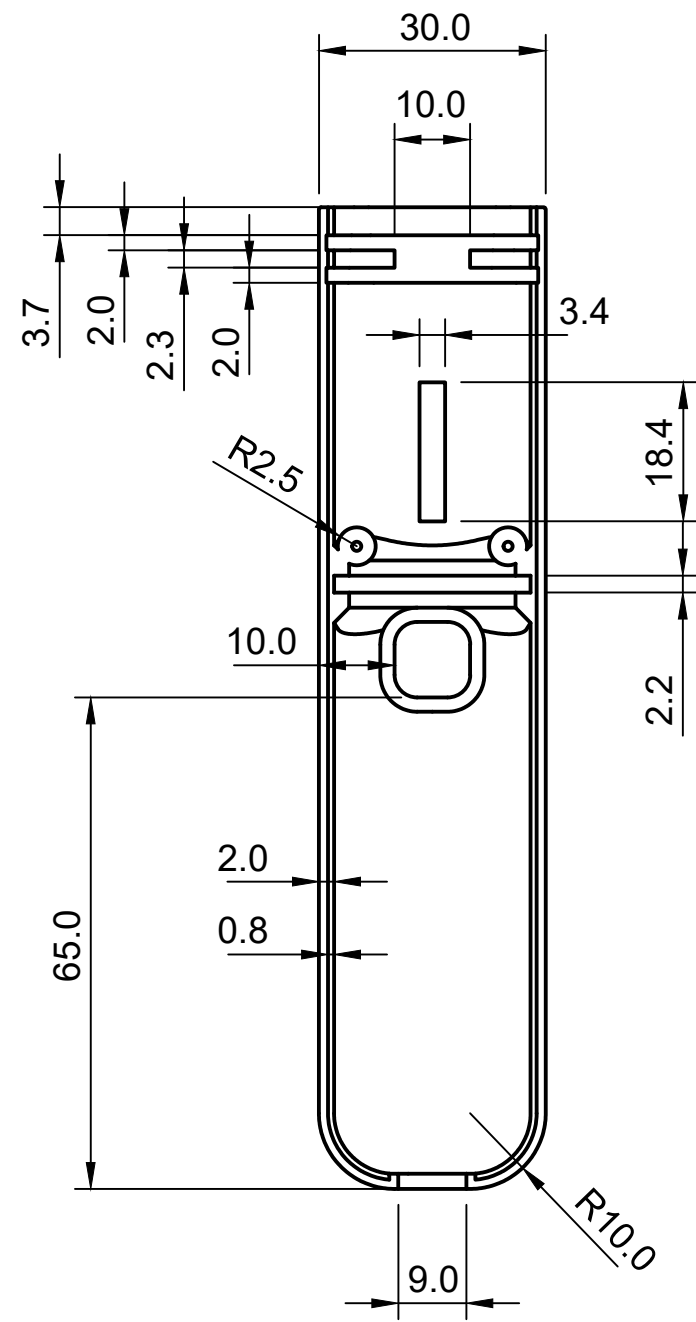
SCALE 1:1

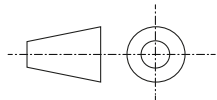
ITEM: OUTER EMBODIMENT

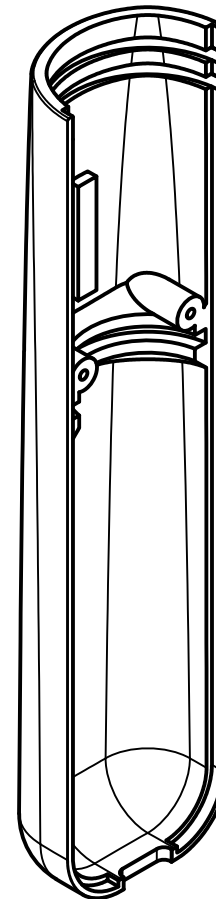
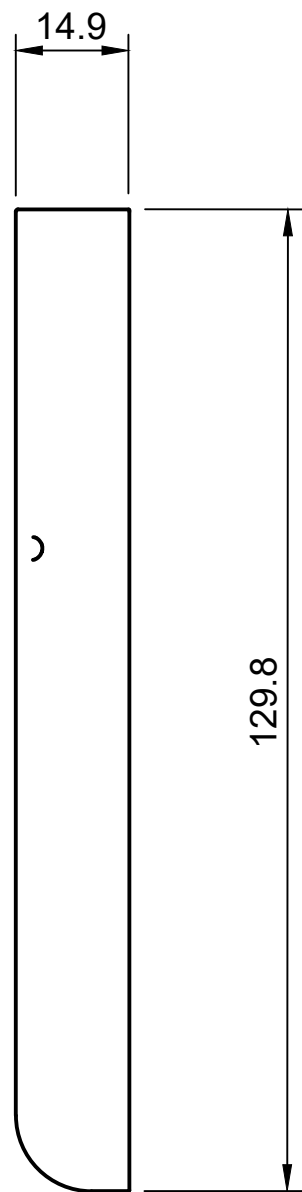
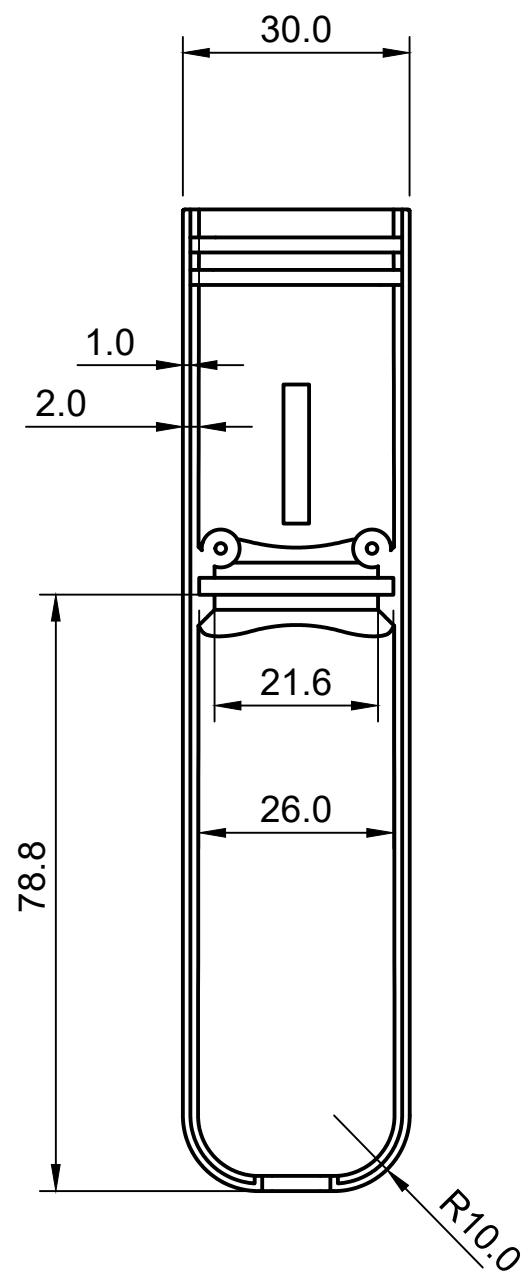


MATERIAL: ABS

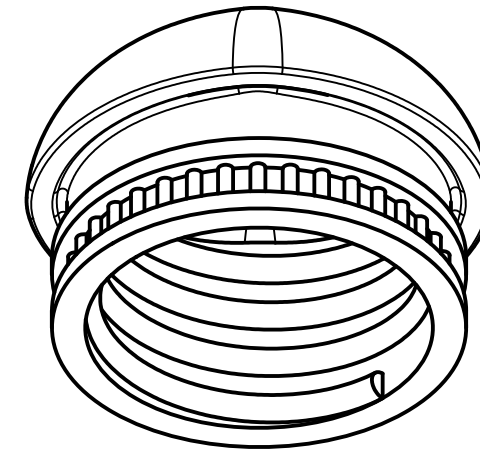
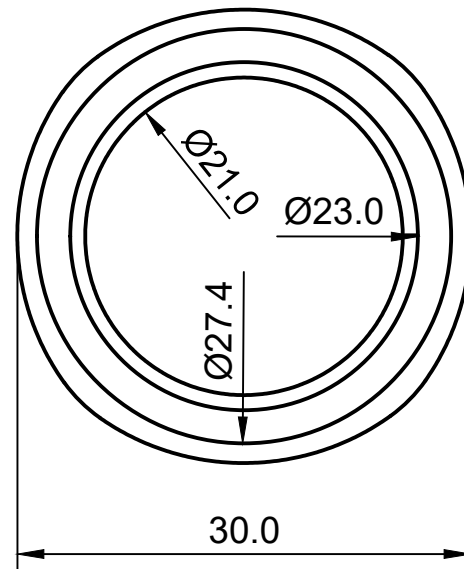
MANUFACTURING: INJECTION MOULDING



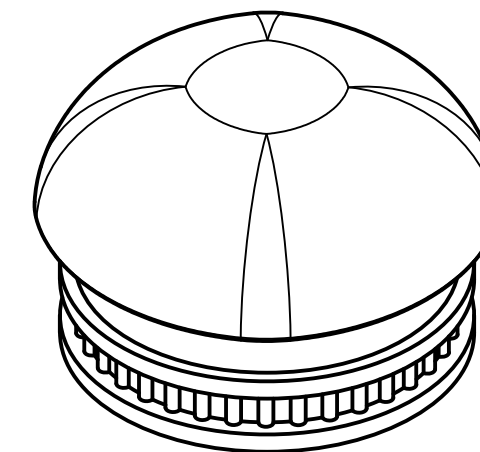
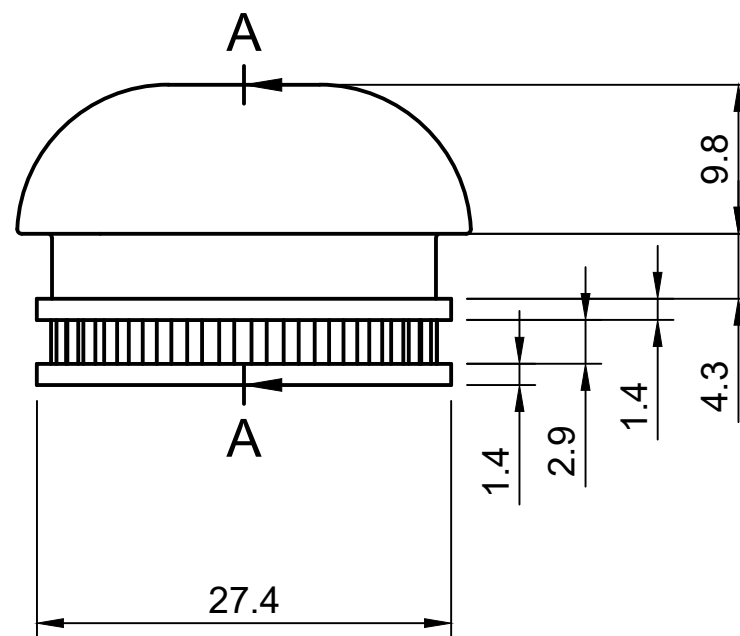
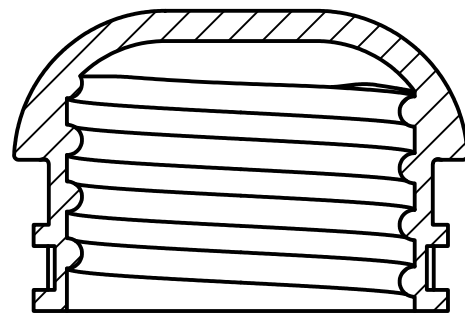
AUTHOR: DANIEL S.	PROJECT: TRUDRUM
SCALE 1:1	ITEM: FRONT SHELL
	MATERIAL: ABS
	MANUFACTURING: INJECTION MOULDING

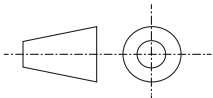


AUTHOR: DANIEL S.	PROJECT: TRUDRUM
SCALE 1:1	ITEM: BACK SHELL
	MATERIAL: ABS
	MANUFACTURING: INJECTION MOULDING

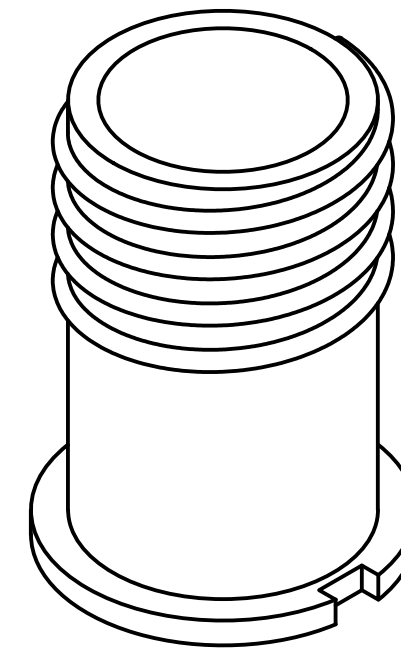
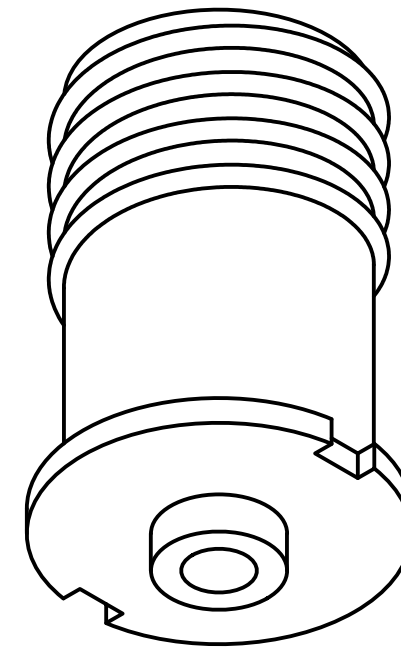
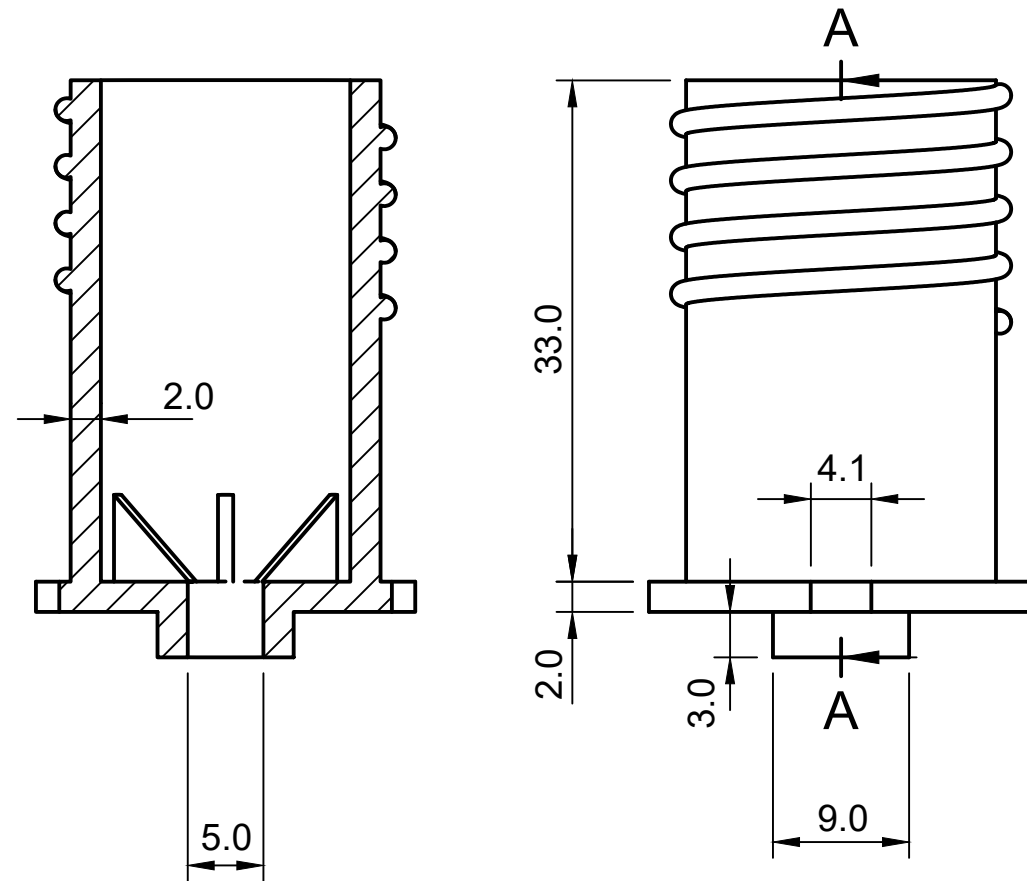


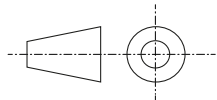
A-A (2:1)



AUTHOR: DANIEL S.	PROJECT: TRUDRUM
SCALE 2:1	ITEM: KNOB
	MATERIAL: ABS
	MANUFACTURING: INJECTION MOULDING

A-A (2:1)



AUTHOR: DANIEL S.	PROJECT: TRUDRUM
SCALE 2:1	ITEM: REBOUND MECHANISM CASING
	MATERIAL: ABS
	MANUFACTURING: INJECTION MOULDING

Tabelas de dados: Resultados do experimento A

Com Feedback Tátil		Sem Feedback Tátil	
Geral		Geral	
Ciclos analisados	15	Ciclos analisados	15
Notas reproduzidas	938	Notas reproduzidas	887
Golpes detectados	916	Golpes detectados	878
Pontuação	713,8	Pontuação	674
Exatidão (%)	77,41%	Exatidão (%)	74,76%
Precisão (%)	94,93%	Precisão (%)	97,95%
60 BPM		60 BPM	
Ciclos analisados	5	Ciclos analisados	5
Notas reproduzidas	209	Notas reproduzidas	194
Golpes detectados	195	Golpes detectados	186
Pontuação	147,4	Pontuação	123
Exatidão (%)	75,59%	Exatidão (%)	66,13%
Precisão (%)	93,30%	Precisão (%)	95,88%
90 BPM		90 BPM	
Ciclos analisados	5	Ciclos analisados	5
Notas reproduzidas	315	Notas reproduzidas	285
Golpes detectados	327	Golpes detectados	288
Pontuação	247,8	Pontuação	218,2
Exatidão (%)	75,78%	Exatidão (%)	75,76%
Precisão (%)	96,33%	Precisão (%)	98,96%
120 BPM		120 BPM	
Ciclos analisados	5	Ciclos analisados	5
Notas reproduzidas	414	Notas reproduzidas	408
Golpes detectados	394	Golpes detectados	404
Pontuação	318,6	Pontuação	332,8
Exatidão (%)	80,86%	Exatidão (%)	82,38%
Precisão (%)	95,17%	Precisão (%)	99,02%