



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO

Matheus Antonio Santos de Castro

Criando Escalas Vibrotáteis para Mapeamento de Dados

Belém

2024

Matheus Antonio Santos de Castro

Criando Escalas Vibrotáteis para Mapeamento de Dados

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação da Faculdade de Computação do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará.

Universidade Federal do Pará

Orientador: Prof. Dr. Bianchi Serique Meiguins
Coorientador: Prof. Me. Walbert Cunha Monteiro

Belém

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A635c Antonio Santos de Castro, Matheus.
 Criando Escalas Vibrotáteis para Mapeamento de Dados /
 Matheus Antonio Santos de Castro. — 2024.
 51 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Bianchi Serique Meiguins
 Coorientador(a): Prof. Me. Walbert Cunha Monteiro
 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
 Federal do Pará, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Faculdade
 de Computação, Belém, 2024.

 1. fisicalização de dados. 2. variáveis hápticas. 3. vibração.
 4. avaliação. I. Título.

CDD 658.4038011

Matheus Antonio Santos de Castro

Criando Escalas Vibrotáteis para Mapeamento de Dados

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação da Faculdade de Computação do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará.

Conceito: Excelente

Belém, 29 de fevereiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bianchi Serique Meiguins - Orientador
UFPA

Prof. Me. Walbert Cunha Monteiro - Coorientador
UFPA

Prof. Dr. Carlos Gustavo Resque dos Santos
UFPA

Prof. Me. Thiago Augusto Soares de Sousa
UFPA

*A Irene Castro, Admir Cassemiro e a todos os meus antepassados que não tiveram
oportunidade de terem dedicatórias.*

Aos brasileiros desafortunados pela COVID-19.

Agradecimentos

Gostaria de expressar meu agradecimento à minha mãe Iemanjá, deusa do Ori, que guia minha fascinante jornada na vida.

Agradeço profundamente à instituição UFPA por ter me proporcionar a oportunidade de receber educação e conhecimento gratuito e de qualidade.

Meu agradecimento e respeito a todos os professores da Faculdade de Computação pelo trabalho de ensino, e, em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Bianchi Serique Meiguins assim como ao meu coorientador Prof. Me. Walbert Cunha Monteiro pela orientação.

Quero expressar meu eterno agradecimento à minha avó, que já não está mais entre nós, mas que me ensinou o verdadeiro significado de amor, sabedoria e companheirismo. Também gostaria de agradecer às outras mulheres da minha família, como minha mãe Marilene, tia Marcilene e prima Adriene, que me apoiaram incondicionalmente nos momentos mais difíceis e alegres para que eu pudesse continuar minha jornada acadêmica.

Por fim, gostaria de agradecer aos amigos que tenho desde a infância, adolescência e aos que fiz ao longo da graduação, em especial a Scarlet Hanna, por me lembrarem do meu potencial e me acolhem em suas famílias como se fosse uma extensão da minha.

“Desses nada do dia a dia que vão consumindo a melhor parte de nós, queria te falar do fardo quando envelhecemos, do desaparecimento, dessa coisa que não existe, mas é crua, é viva: o tempo.”
(Hilda Hilst, 1982)

Resumo

Avanços nos processos de fabricação digital e na ciência dos materiais tem possibilitado representar e apresentar dados fisicamente, como representações tangíveis de dados. Esta área é denominada de fisicalização de dados, que pode ser compreendida como a área que busca projetar artefatos físicos, cuja geometria e a propriedade dos materiais codificam dados para apoiar o processo de entendimento e comunicação dos dados. Há cinco modos de representar fisicamente dados, são elas: visual, auditivas, hápticas, olfativas e gustativas. As formas mais encontradas na literatura para representar dados no mundo físico são visuais e auditivas, as olfativas e as gustativas ainda estão em sua fase inicial de como melhor explorá-las para representar dados. As codificações hápticas já fazem parte do nosso cotidiano, informando valores simples, como sim/não ou ligado/desligado, mas pouco utilizadas para codificar dados com mais de 2 valores, e suas aplicações podem ser encontradas em diversos dispositivos como *smartphones*, *smartwatches*, vídeo-games, etc. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para a identificação de limites vibrotáteis e a criação de escalas vibrotáteis para mapeamento de dados abstratos. Inicialmente, esse estudo foca na criação de escalas de valores sequências, incluindo avaliação com participantes para determinar o valor mínimo e máximo de vibração percebida sem causar desconforto, bem como o intervalo mínimo entre vibrações para propor a escala sequencial pretendida. Por fim, algumas tarefas de ordenação são propostas aos participantes do teste. Os resultados preliminares no uso das escalas sequenciais criadas com 3 e 4 valores apresentaram baixa taxa de erro e baixo tempo para realização da tarefa de ordenação.

Palavras-chave: fisicalização de dados; variáveis hápticas; vibração; avaliação.

Abstract

Advancements in digital manufacturing processes and materials science have enabled the representation and presentation of data in physical forms, such as tangible data representations. This field is known as data physicalization, which can be understood as the area that seeks to design physical artifacts whose geometry and material properties encode data to support the process of understanding and communicating data. There are various ways to physically represent data, including visual, auditory, haptic, olfactory, and gustatory modalities. The most common forms found in the literature for representing data in the physical world are visual and auditory, while olfactory and gustatory representations are still in their early stages of exploration for data representation. Haptic encodings are already part of our daily lives, informing simple values such as on/off or connected/disconnected, but they are less commonly used to encode data with more than two values, and their applications can be found in various devices such as smartphones, smartwatches, video games, etc. Thus, this work aims to investigate whether it is possible to represent a greater amount of data through vibration scales that are easily understood by an individual. Initially, this study focuses on creating sequential value scales, including participant evaluations to determine the minimum and maximum perceived vibration values without causing discomfort, as well as the minimum interval between vibrations to propose the intended sequential scale. Finally, some ordering tasks are proposed to test participants. Preliminary results using sequential scales created with 3 and 4 values showed low error rates and low completion times for the ordering task.

Keywords: data physicalization; haptic variables; vibration; evaluation.

Lista de ilustrações

Figura 1.	Modelo de <i>pipeline</i> de InfoVis proposto onde os impactos da interação do usuário são considerados	19
Figura 2.	Esquema de codificação de dados	20
Figura 3.	Tipos de marcas e variáveis visuais segundo Card	21
Figura 4.	<i>Pipeline</i> de fisicalização de dados	23
Figura 5.	Fluxograma do processo de seleção de trabalhos acadêmicos	27
Figura 6.	Mapa físico desenvolvido para codificar dados por meio da vibração e temperatura	29
Figura 7.	Artefato utilizado no trabalho de CUYA et al.	29
Figura 8.	Artefato vibratório para codificação de dados e estimulação tátil proposto no estudo	30
Figura 9.	Artefato produzido para estudo da percepção dos dados por meio da vibração	31
Figura 10.	Esquema de Fritzing do artefato	32
Figura 11.	Esquema de interação com o motor de vibração	33
Figura 12.	Principais componentes do protótipo e suas relações	34
Figura 13.	Placa de prototipagem Arduino Mega 2560	35
Figura 14.	Esquema técnico dos motores de vibração ERM e LRA	35
Figura 15.	Fluxograma da metodologia	37
Figura 16.	Ilustração da interação do participante com o artefato	39
Figura 17.	Caracterização da amostra em relação ao sexo	40
Figura 18.	Relação do tempo de execução por tarefa relativo ao usuário	40
Figura 19.	Relação do menor valor de vibração percebida por usuário obtidos através da Tarefa 1 e Tarefa 2	41
Figura 20.	Maior valor de vibração percebida por usuário, aplicando intervalos decrescente de vibração	41
Figura 21.	Relação do menor valor de vibração percebida por usuário, aplicando intervalo decrescente de vibração	42
Figura 22.	Relação de tempo por usuário para realização das tarefas de ordenação utilizando as paletas propostas	45

Lista de tabelas

Tabela 1.	Relação de trabalhos relacionados com esta pesquisa.	28
Tabela 2.	Lista de itens utilizados para construir o artefato de codificação de dados vibratórios por meio da vibração.	33

Lista de abreviaturas e siglas

InfoVis	Visualização da Informação
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
LED	Light Emitting Diode
min	minutos
ms	milissegundos
Hz	Hertz
mm	milímetros
DC	Corrente Contínua
AC	Corrente Alternada
PWM	Modulação por Largura de Pulso
I2C	Inter-Integrated Circuit
LRA	Linear Resonant Actuators
ERM	Eccentric Rotating Mass
CC BY-NC-SA 4.0	<i>Creative Commons Attribution-Non Commercial-ShareAlike 4.0 International</i>
V	Volt
A	Ampère
UARTs	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
ICSP	In-Circuit Serial Programming
KB	Kilobyte
SRAM	Static Random Access Memory
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
IDE	Integrated Development Environment

RAM	Random Access Memory
-----	----------------------

GB	Gigabytes
----	-----------

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Organização do Trabalho	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Visualização da Informação	19
2.1.1	Variáveis Visuais	20
2.1.2	Tarefas de InfoVis	21
2.2	Visualização Física de Dados	22
2.2.1	Codificação de Dados e Variáveis	22
2.2.2	Variáveis Hápticas	23
2.2.3	As Variáveis Hápticas	24
2.3	A Percepção	24
2.3.1	Percepção Háptica	25
2.3.2	As Características da Pele e Tato	25
3	TRABALHOS RELACIONADOS	27
3.1	Os Trabalhos Coletados	28
4	METODOLOGIA	31
4.1	Design do Artefato Vibratório Proposto	31
4.2	Funcionamento	32
4.3	Peças e Componentes Eletrônicos	33
4.4	Arquitetura	33
4.4.1	Placa de Prototipagem Arduino	34
4.4.2	Motor Vibração	34
5	AValiação DOS LIMITES DE VIBRAÇÃO	36
5.1	Suporte Computacional e Ambiente dos Testes	38
5.2	Ambiente dos Testes	38
5.3	Participantes	38
5.4	Procedimentos	38
5.5	Coleta de dados	39

6	RESULTADOS	40
6.1	Definição das Escalas de Vibração	43
6.1.1	Cálculo dos Valores da Escala com 3 valores	43
6.1.2	Cálculo dos Valores da Escala com 4 valores	44
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A área de Visualização da Informação (InfoVis) dentre seus objetivos propõe explorar representações visuais de dados abstratos por meio do computador, a fim de ampliar a cognição do usuário (CARD; MACKINLAY; SHNEIDERMAN, 1999). Assim, conjuntos de dados são tradicionalmente visualizados por meio de técnicas digitais. Todavia, destaca (GRIFFIN, 2001), InfoVis compreende não somente a criação de artefatos visuais, é também um ato de cognição, uma vez que as informações no mundo real são apresentadas através de múltiplos canais sensoriais, proporcionando experiências multissensoriais.

Assim, novas formas de explorar de dados são exploradas e a visualização física de dados ou simplesmente fisicalização é uma delas, a qual surge na comunidade de visualização da informação para impulsionar avanços nos processos de fabricação digital e na ciência dos materiais (RANASINGHE; DEGBELO, 2023; JANSEN et al., 2015).

Estes artefatos podem utilizar diferentes sentidos humanos para explorar as variáveis visuais e físicas, percepção ativa, percepção de profundidade ou os sentidos não visuais. Dessa forma a utilização dos artefatos permitem benefícios cognitivos acessíveis, trazendo dados para o mundo real, envolvendo as pessoas, permitindo novos processos de interação e ampliação no engajamento do usuário (VAN LOENHOUT, 2021; JANSEN et al., 2015). Apesar dos benefícios apresentados, a construção e interação com artefatos físicos não são tarefas triviais, exigem que os usuários estejam familiarizados com diferentes conceitos, ferramentas e recursos (JANSEN et al., 2015).

De acordo com Ranasinghe e Degbelo (2023) as representação de dados tangíveis, ocorrem mediante um meio representacional. Tal meio representacional pode ser representado por uma mídia física a qual possui diferentes canais de informação, propriedades para codificar, armazenar e transportar informações. Os canais de informação podem ser manipulados mediante uma ou mais variáveis, como: variáveis visuais (propriedades dos canais de informação visual), variáveis hápticas (propriedades dos canais de informação háptica), variáveis olfativas (propriedades dos canais de informação olfativa). Logo a escolha dos materiais para codificar dados, influenciam diretamente no espaço de *design* e nas possibilidades de uso de variáveis.

O número de materiais disponíveis para codificação de dados é amplo e potencialmente infinito, são exemplos: vidro, água, pão, luz, frutas, legumes, plásticos, entre outros (RANASINGHE; DEGBELO, 2023; HOGAN; HORNECKER, 2016). Ranasinghe e Degbelo afirmam a necessidade de entender as limitações, bem como promover estudos sobre o comportamento dos materiais e suas variáveis (visuais e físicas) para codificar dados. Assim, compreender esses atributos pode ser fundamental para uma codificação

eficaz das informações.

Ademais, as variáveis visuais estão bem exploradas e trabalhos tratam sobre a representação de dados eficientemente, contudo, não existem boas práticas para a representação de dados por meio de variáveis não visuais dentre elas as variáveis hápticas (PEROVICH et al., 2023; RANASINGHE; DEGBELO, 2023; MCCORMACK et al., 2018).

As variáveis hápticas referem-se a fatores táteis ou relacionados ao toque. Essas variáveis envolvem o sentido do tato e podem incluir: amplitude de vibração, frequência de vibração, intervalo da vibração, superfície de contato, entre outras (RANASINGHE; DEGBELO, 2023)

Portanto, para decodificar as informações hápticas representadas através das variáveis hápticas, é essencial empregar a percepção háptica. Esta é definida como um processo dinâmico que envolve a integração de processos sensoriais e motores, permitindo a identificação das características dos objetos (SILVA, 2019). Existem dois tipos principais de percepção háptica: tátil e cinestésica, as sensações táteis são aquelas percebidas quando a pele entra em contato com um objeto (vibração, pressão e temperatura) as sensações cinestésicas são aquelas mediadas por receptores localizados nos músculos e articulações (resistência, fricção, localização cinestésica), estimuladas por movimentos e tensões corporais. (GRIFFIN, 2001)

A partir do exposto, este trabalho desenvolveu um estudo para construção e avaliação dos limites de vibração, mínimo, máximo e intervalos, e proposição de escalas vibrotáteis para mapeamento de dados, esta abordagem foi desenvolvida e aplicada por meio de um artefato vibrotátil proposto.

A metodologia geral seguiu duas etapas principais: definir um processo para identificação dos limites mínimos, máximos e intervalos de percepção, na segunda etapa foi proposto aplicar os limites identificados para desenvolvimento de escalas. Para todas as etapas, foram propostas avaliações utilizando o artefato vibratório desenvolvido.

Em suma, nossos resultados revelam que apesar da limitada variação nos limites de intensidade da vibração percebíveis, identificamos um conjunto restrito de até oito valores aplicáveis para representar informações. Esses limites foram então aplicados em duas escalas atualmente propostas: uma com 3 valores e outra com 4 valores. A escolha dessas duas escalas foi fundamentada na análise dos resultados do nosso estudo. Compreendemos que, embora a variação seja limitada, esses valores podem ser agrupados de maneiras diferentes para representar informações de forma eficaz. Reconhecemos também que há oportunidades para explorar outras combinações de valores e criar mais escalas. Com base nesses achados, é possível conceber até oito escalas adicionais, oferecendo abordagens alternativas para a representação e interpretação dos dados táteis. Essas escalas adicionais representam uma direção promissora para futuras pesquisas, ampliando ainda mais o

espectro de possibilidades de mapeamento de dados vibrotáteis.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia para a identificação de limites vibrotáteis e criação de escalas vibrotáteis para mapeamento de dados abstratos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um protótipo/artefato físico que permita avaliar a percepção tátil do usuário por meio da vibração;
- Realizar uma revisão sistemática dos trabalhos relacionados ao mapeamento de variáveis físicas;
- Realizar testes perceptivos com usuário para compreensão do limite mínimo, máximo e intervalos de valores sensíveis;
- Avaliar as quantificações e propor escalas de dados utilizando a variável háptica tátil por meio da vibração;
- Executar um processo de avaliação das escalas propostas.

1.2 Justificativa

- Propor um método para criar escalas de vibração;
- Desenvolver um protótipo para representar vibrações;
- Avaliar as características das vibrações para propor escalas vibrotáteis.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em 7 capítulos: no capítulo 2 é apresentado conceitos e fundamentos da área de InfoVis, Fisicalização de Dados e Variáveis Hápticas; no capítulo 3 uma revisão da literatura relacionada com os objetivos desta pesquisa e categorização de elementos utilizados neste trabalho e demonstrada; no capítulo 4 os aspectos de concepção, *design* e montagem do artefato físico de codificação de dados utilizados é apresentado; no capítulo 5 a metodologia e procedimentos avaliativos são demonstrados; o capítulo 6

apresenta os resultados e análises; por fim no capítulo 7 são apresentadas as considerações finais e trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

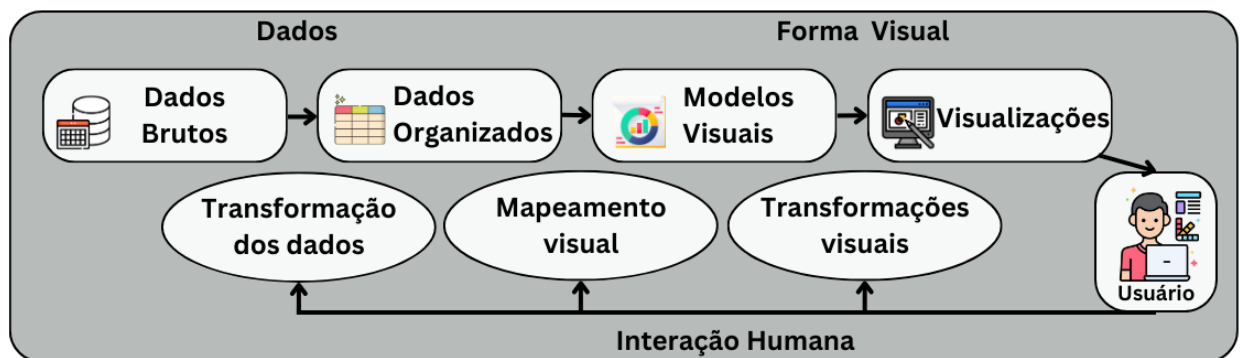
Nesta seção, são explorados os conceitos e fundamentos da área de Visualização da Informação, Fisicalização de Dados e Variáveis Hápticas, juntamente com a percepção humana. A compreensão desses elementos é crucial para a análise da percepção de motores de vibração pela pele humana.

2.1 Visualização da Informação

A Visualização da Informação, de acordo com (CARD; MACKINLAY; SHNEIDERMAN, 1999; KEIM et al., 2006), compreende o uso de representações visuais e interativas ao qual são suportadas por um computador para representar dados abstratos, objetivando ampliar a cognição. Aspectos da computação gráfica, interfaces homem-computador e mineração de dados são aplicados permitindo a apresentação de dados de forma gráfica, de modo que o usuário possa utilizar sua percepção visual para analisar e compreender as informações (NASCIMENTO; FERREIRA, 2011).

Procedimentos de transformação de dados em representações visuais, conhecido como *pipeline* de InfoVis é demonstrado por meio de um modelo de referência, proposto por Card et al. (1999), Figura 1. O *pipeline* de InfoVis apresenta uma sequência de estágios, e descrevem como as visualizações são criadas e como os usuários podem interagir com as visualizações.

Figura 1. Modelo de *pipeline* de InfoVis proposto onde os impactos da interação do usuário são considerados



Fonte: Adaptação de (CARD; MACKINLAY; SHNEIDERMAN, 1999)

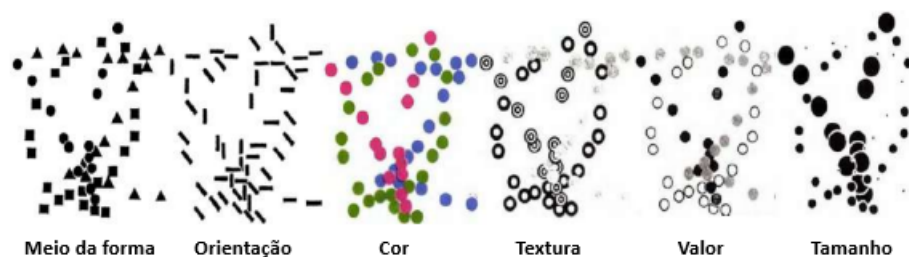
A etapa inicial do *pipeline* apresentado consiste na transformação dos dados brutos

em modelos estruturados. Este processo pode envolver a eliminação de dados redundantes, errados ou incompletos. Nesta etapa a inclusão de novas informações, tais como resultados de análises estatísticas podem ser realizadas. Posteriormente, na etapa de mapeamento visual, dados são transformados em estruturas visuais. As estruturas visuais são compostas de substrato espacial, marcas, e propriedades gráficas das marcas. Marcas visuais são símbolos gráficos utilizados para representar os itens de dados. Tipos de marcas: Pontos; Linhas; Áreas; Volumes; Figuras. A etapa de transformações visuais possibilitam modificar e estender estruturas visuais interativamente.

2.1.1 Variáveis Visuais

Variáveis visuais são atributos visuais que podem ser utilizados para codificar informações em uma visualização de dados. Elas são os elementos que permitem representar diferentes características ou variáveis dos dados cita Card (1999). A Figura 2 apresenta as variáveis disponíveis.

Figura 2. Esquema de codificação de dados

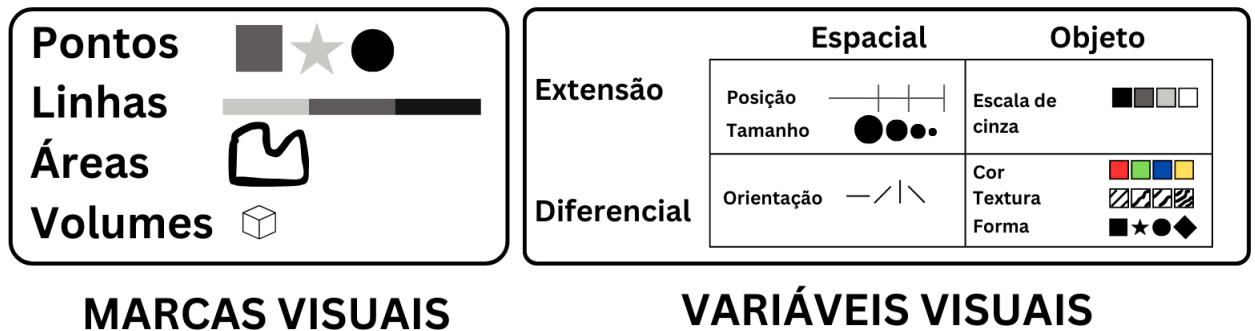


Fonte: Adaptação de (GRIFFIN; BERTIN, 1987)

- **Meio da Forma:** a configuração geométrica dos elementos visuais, como círculos, quadrados, triângulos, etc;
- **Orientação:** a direção ou ângulo de um elemento visual;
- **Cor:** a tonalidade, saturação e brilho das cores utilizadas na visualização;
- **Textura:** padrões texturizados aplicados aos elementos visuais;
- **Valor:** refere-se à magnitude numérica ou quantitativa que está sendo representada na visualização.
- **Tamanho:** a dimensão física de um elemento visual, como o tamanho de um marcador ou ponto.

Um estudo extensivo sobre variáveis visuais foi desenvolvido por Card (2002), destacando que as variáveis visuais são constituídas por marcas visuais, estes são elementos visíveis que ocorrem no espaço, elas podem ser utilizadas no mapeamento visual dos dados, a Figura 3 destaca os tipos de marcas visuais e variáveis visuais segundo Card (2002).

Figura 3. Tipos de marcas e variáveis visuais segundo Card



Fonte: Adaptação de (CARD; MACKINLAY; SHNEIDERMAN, 1999)

2.1.2 Tarefas de InfoVis

De acordo com (SAKET; ENDERT; DEMIRALP, 2018), são ações que os usuários realizam ao interagir com visualizações de dados. Essas tarefas visam extrair informações significativas dos dados apresentados. Algumas tarefas comuns em InfoVis incluem:

- **Encontrar Anomalias:** Identificar exceções em um conjunto específico de dados em relação a padrões previamente estabelecidos;
- **Encontrar Aglomerados (Clusters):** Contar o número de grupos de valores semelhantes em um conjunto de dados;
- **Encontrar Correlação:** Avaliar se há uma relação entre dois atributos de dados específicos. Utilizamos o coeficiente de correlação de Pearson para verificar a força dessa relação;
- **Calcular Valor Derivado:** Determinar um valor agregado para um conjunto de dados específico;
- **Caracterizar Distribuição:** Identificar a distribuição dos valores de um atributo em um conjunto de dados;
- **Encontrar extremidades:** Localizar pontos de dados com valores extremos em um atributo específico;

- **Filtrar:** Destacar pontos de dados que atendam a condições específicas em seus atributos;
- **Ordenar:** Classificar um conjunto de dados de acordo com uma métrica ordinal específica;
- **Determinar Faixa:** Definir uma faixa de valores de um certo ponto ou outro dentro do conjunto de dados; e
- **Recuperar Valor:** Identificar os valores dos atributos para pontos de dados específicos em um conjunto de dados.

2.2 Visualização Física de Dados

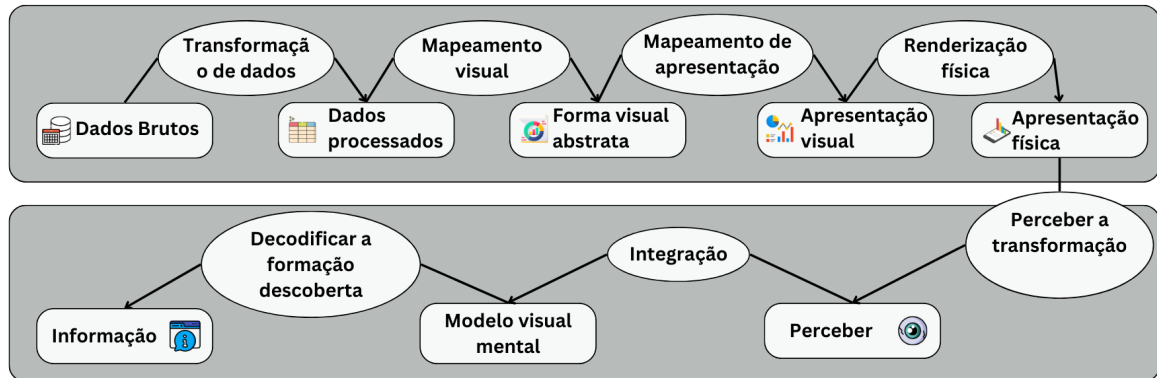
A visualização de dados físicos, também chamada de fisicalização de dados, apresenta uma abordagem inovadora na representação e interação com informações, proporcionando outra perspectiva as convencionais visualizações em tela, segundo ((RANASINGHE; DEGBELO, 2023)). Nesse contexto, os dados são transformados em representações tangíveis, palpáveis e, muitas vezes, multissensoriais, proporcionando às pessoas a oportunidade de explorar e compreender os dados por meio de experiências físicas e sensoriais.

Dessa forma, um artefato físico cuja geometria e propriedade dos materiais codificam dados (JANSEN et al., 2015). Semelhante à área da visualização da informação, a fisicalização de dados compreenderá como as representações físicas podem apoiar o processo cognitivo de compreensão e comunicação dados por meio de visualizações físicas, incluindo também a interações com esses artefatos. A Figura 4 apresenta uma extensão do *pipeline* tradicional de visualização de informações proposto por (JANSEN; DRAGICEVIC, 2013a), adicionando etapas para obter a representação física da visualização de dados.

Esse procedimento abrange diversas etapas e transformações, desde a manipulação dos dados brutos até a criação de uma representação visual final. Esse processo pode ser ajustado para abranger configurações de visualização não convencionais. Além disso, a expansão da visualização de informações para além do ambiente *desktop* apresenta novas oportunidades e desafios, demandando a formulação de modelos conceituais e teorias para guiar o *design* de sistemas de visualizações.

2.2.1 Codificação de Dados e Variáveis

De acordo com Ranasinghe e Degbelo (2023), a codificação de variáveis é um aspecto fundamental no processo de representar informações por meio de formas físicas e sensoriais, conhecido como fisicalização de dados. Para compreender esse conceito, é essencial entender tanto o significado de codificar quanto o papel das variáveis nesse contexto.

Figura 4. *Pipeline* de fisicalização de dados

Fonte: Adaptação de Yvonne Jansen e Pierre Dragicevic 2013b

No contexto da fisicalização de dados, a codificação refere-se ao ato de atribuir significado, ou seja, representar informações por meio de características físicas ou sensoriais. Isso pode envolver a tradução de dados abstratos em elementos tangíveis, como formas, texturas, cores, sons, odores e outras qualidades perceptíveis. A codificação permite que os dados sejam comunicados e compreendidos por meio de experiências sensoriais e físicas, ampliando as formas tradicionais de representação de informações (RANASINGHE; DEGBELO, 2023).

Este processo envolve a seleção criteriosa e a aplicação dessas propriedades físicas e sensoriais, atribuindo significado aos dados, consequentemente, a codificação de variáveis possibilita a criação de representações físicas que facilitam a exploração e compreensão dos dados por meio de experiências sensoriais interativas. Em resumo, é o processo de tradução de informações abstratas em elementos físicos e sensoriais, resultando em representações inovadoras e envolventes de dados (RANASINGHE; DEGBELO, 2023).

2.2.2 Variáveis Hápticas

As variáveis hápticas referem-se a propriedades físicas perceptíveis por meio do toque, existem três tipos principais de sensação háptica: derivadas do toque (tátil), derivadas da cinestesia (cinestésica) e derivadas de análogos visuais (variáveis que podem ser percebidas tanto pela visão quanto pelo tato) (GRIFFIN, 2001; RANASINGHE; DEGBELO, 2023). As sensações táteis são percebidas quando a pele entra em contato com um objeto; sensações cinestésicas são estimuladas por movimentos e tensões corporais (RANASINGHE; DEGBELO, 2023).

Essas variáveis são empregadas para expressar informações mediante características táteis, possibilitando que os usuários interajam com representações físicas de dados por meio do toque (RANASINGHE; DEGBELO, 2023; VAN LOENHOUT, 2021).

Segundo Ranasinghe e Degbelo (2023) as variáveis hápticas englobam texturas, formas, temperatura e outras qualidades táteis, enriquecendo a experiência sensorial e facilitando a compreensão tátil e cinestésica dos dados. Dessa forma, segundo (GRIFFIN, 2001), as variáveis hápticas desempenham um papel crucial na elaboração de representações físicas de dados que buscam incorporar o sentido do tato como parte integrante da interação com as informações.

2.2.3 As Variáveis Hápticas

Assim, destacam-se características das sensações hápticas segundo (RANASINGHE; DEGBELO, 2023; GRIFFIN, 2001):

- **Táteis:** referem-se às sensações percebidas pelo sentido do tato. Exemplos podem incluir texturas, vibrações, temperatura e resistência ao toque. Essas variáveis são utilizadas para transmitir informações de forma tangível e sensorial, permitindo que os usuários interajam com os dados por meio do sentido do tato;
- **Cinestéticas:** estão relacionadas às sensações de movimento e posição do corpo. Podem envolver a interação física do usuário com o artefato físico, como gestos, movimentos corporais e ações físicas que influenciam a representação dos dados. Permitem uma experiência de interação mais imersiva e envolvente para os usuários;
- **Análogas as visuais:** são aquelas que se baseiam em conceitos visuais e são traduzidas para outras modalidades sensoriais, como o tato ou o movimento. Por exemplo, uma representação visual de mudanças de cor em um gráfico pode ser traduzida em mudanças de textura ou vibração em uma fisicalização de dados. Permitem a exploração de diferentes formas de traduzir informações visuais em experiências táteis ou cinestéticas.

Essas variáveis desempenham um papel importante na concepção e implementação de fisicalizações de dados, permitindo a criação de experiências sensoriais ricas e significativas para os usuários. Elas contribuem para a diversidade de modalidades sensoriais exploradas nas fisicalizações de dados, ampliando as possibilidades de interação e compreensão dos dados apresentados.

2.3 A Percepção

O estudo da percepção humana, para esse trabalho, proporciona um entendimento generalizado das características humanas que tange a percepção. Assim a percepção, de forma geral, é um aspecto fundamental da cognição humana, visto que abrange uma das formas de interpretação e compreensão de informações sensoriais provenientes do ambiente

(BARROSO, 2013). Envolve o processamento pelo cérebro de estímulos sensoriais para atribuir-lhes significado e contexto, auxiliando na forma de moldar a compreensão do mundo por parte do indivíduo. (MATOS; JARDILINO, 2016).

É um processo complexo e dinâmico, multifacetado, que abrange várias modalidades sensoriais, incluindo percepção visual, auditiva, háptica, influenciado por diversos fatores, tais como experiências passadas, normas sociais e sugestões ambientais (BARROSO, 2013).

2.3.1 Percepção Háptica

Refere-se à interpretação de sensações táteis e cinestéticas, permitindo que os indivíduos percebam e compreendam as propriedades dos objetos por meio do toque ativo e passivo (LI et al., 2018).

Tal propriedade perceptiva é essencial para operações interativas, assim como influencia níveis de percepção do indivíduo em relação aos objetos de interação, a percepção háptica é associada a experiências emocionais, sendo o toque identificado como um canal importante para a comunicação de emoções, isso destaca a natureza multifacetada da percepção háptica, abrangendo dimensões tanto sensoriais quanto emocionais. (LI et al., 2018).

Por outro lado, a percepção tátil refere-se especificamente à interpretação de sensações táteis através da pele, permitindo que os indivíduos percebam e diferenciem vários estímulos táteis (BRESCIANI; ERNST, 2007). A percepção tátil é fundamental para o desenvolvimento social, a redução do estresse e a construção de *rapport*¹, enfatizando sua importância na interação humana e no bem-estar (BURGESS et al., 2023).

Além disso, descobriu-se que a confiabilidade dos sinais táteis modula a integração auditivo-tátil, indicando a intrincada interação entre diferentes modalidades sensoriais na formação da percepção tátil (BRESCIANI; ERNST, 2007).

2.3.2 As Características da Pele e Tato

A pele é o maior órgão do ser humano, um adulto médio tem uma área de superfície de aproximadamente $1,8\text{ m}^2$ com peso em torno de 4 kg. A pele humana é constituída por três camadas, a epiderme: camada mais externa (tecido epitelial); a derme, camada abaixo da epiderme (tecido conjuntivo); e a hipoderme, camada subcutânea, a mais profunda, rica em tecido adiposo. Além disso, destacam-se ainda dois tipos de pele: com pelos e sem pelos (glabra). Portanto, a pele é o maior órgão sensorial do corpo humano (KANDEL et al., 2000).

¹ Termo da psicologia que promove técnicas para criar relações de sintonia e empatia com outra pessoa

Ademais, de acordo com (MARZVANYAN; ALHAWAJ, 2024; KANDEL et al., 2000) as camadas da pele contêm conjuntos de receptores sensoriais responsáveis pela detecção de estímulos provenientes do ambiente, este por sua vez possuem diferentes tipos de células receptoras e estruturas capazes de detectar alterações. Com isso é possível destacar 3 tipos básicos de receptores sensoriais e os estímulos captados:

- Mecanorreceptores: que respondem a estímulos mecânicos, convertendo pressão, deformação ou vibração em sinais elétricos interpretados pelo sistema nervoso. Esses receptores desempenham um papel importante no sentido do tato e na percepção de diferentes formas de toque;
- Termorreceptores: especializados na detecção de variações de temperatura no ambiente ou no corpo; e
- Nociceptores: especializados em detectar estímulos nocivos, como dor e danos teciduais.

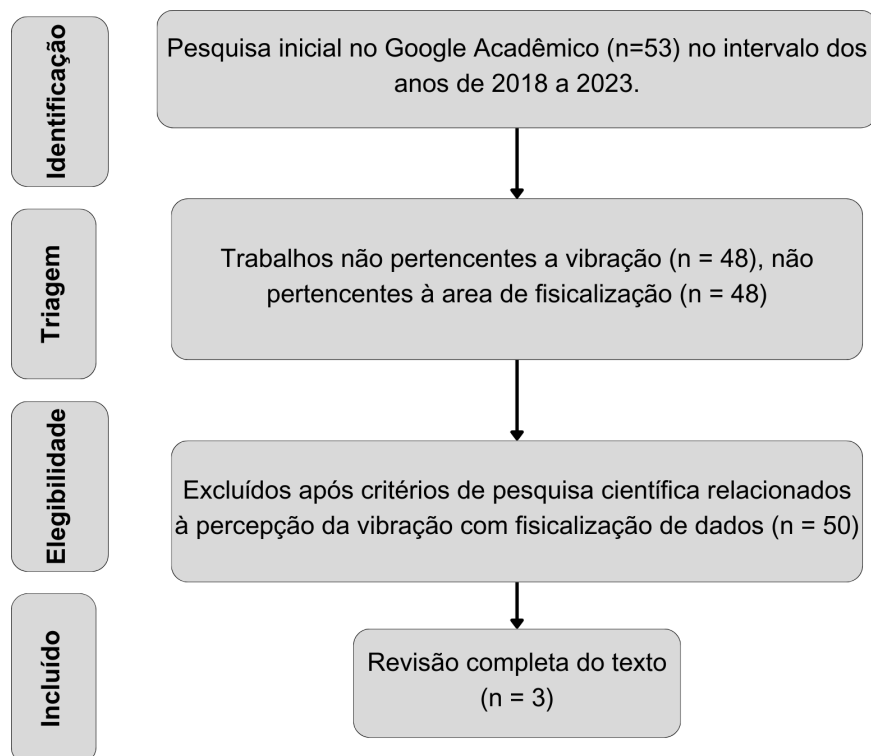
Em conclusão, a percepção tátil é mais desenvolvida nas áreas dos dedos, palma da mão, na sola dos pés e os lábios. Nas mãos, existe uma matriz com grande número de mecanorreceptores, os quais medeiam a sensação de tato e são excitados por estímulos na pele (KANDEL et al., 2000).

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Uma revisão bibliográfica foi conduzida para analisar a aplicação da codificação de dados mediante variáveis hápticas utilizando métodos vibrotáteis. Neste contexto, foram examinados parâmetros de configuração, tipos de dados, dimensões, variáveis físicas associadas, técnicas de visualização, tipos de interação e se houve ou não avaliação com usuários.

Artigos publicados no período entre janeiro de 2018 e dezembro de 2023 foram selecionados na base de dados do *Google Acadêmico*, utilizando a *string* de busca "*physicalization*" OR "*data physicalization*" AND "*vibrotactile*", resultando na identificação de 53 trabalhos primários. Um processo de triagem foi aplicado aos trabalhos identificados, com critérios de inclusão e exclusão, tais como: presença das palavras-chave nos títulos, resumos ou palavras-chave, eliminação de duplicatas, exclusão de resumos, *keynotes speeches*, cursos ou tutoriais, somente trabalhos completos em português ou inglês foram utilizados, e estudos que usam a vibração para codificar dados e apresentam no mínimo uma técnica de visualização, a Figura 5 apresenta o fluxo das atividades de triagem.

Figura 5. Fluxograma do processo de seleção de trabalhos acadêmicos



Dentre o conjunto de trabalhos, uma revisão da literatura foi identificada (RANA-SINGHE; DEGBELO, 2023), esta mapeou 44 trabalhos que codificam dados por meio da vibração. Os trabalhos foram revisados, somente 01 trabalho foi selecionado. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos durante a revisão bibliográfica.

Tabela 1. Relação de trabalhos relacionados com esta pesquisa.

Ano	Artigo	Frequência	Amplitude	Formato de Onda	Duração	Ritmo	Categorico	Contínuo	Discreto	1	2	3	4	5	6	Haptica (vib)	Haptica (temp)	Visual	Sonora	Gustativa	BarChart	ScatterPlot	Mapa	Direta	Indireta	Sim	Não
2022	VAN LOENHOUT	1					1				1					1	1	1					1	1		1	
2021	CUYA et al.	1	1	1			1				1					1			1					1		1	
2017	HOGAN; HORNECKER	1					1				1					1		1	1					1		1	
TOTAL		3	1	1	0	0	3	0	0	0	3	1	0	0	0	3	1	3	1	0	0	0	1	3	0	3	0

Parâmetros

Dados

Dimensões

Variáveis Associadas

Técnica

Interação

Avaliação do Usuário

A partir dos trabalhos selecionados que compõe a Tabela 1, identificou-se que todos os trabalhos usam a frequência como característica principal da vibração para codificação de dados, dentre eles o trabalho de CUYA et al. destaca-se ao utilizar a amplitude e formato da onda. Todos os trabalhos codificam somente dados categóricos. Além disso, todos os trabalhos codificam até duas dimensões de dados assim como todos codificam dados usando mais de uma variável. Por fim, em todos os trabalhos a técnica de mapa, técnicas de interação com artefatos foram aplicadas e avaliações com participantes foram realizadas.

3.1 Os Trabalhos Coletados

O estudo de Van Loenhout (2021), aborda a criação de uma físicação usando vibração e temperatura para representar dados, a Figura 6 apresenta a técnica proposta. Os dados aplicados ao trabalho foram baseados na Agenda 2030 da ONU, o trabalho avalia a eficácia e eficiência por meio do *feedback* tátil.

Os resultados indicam que a vibração mais eficiente quando relacionado a temperatura, recomendações incluem melhoras no processo de mapeamento de dados utilizando adição de outras modalidade e canais de informação objetivando aumentar a dimensionalidade dos dados e ampliar a compreensão dos usuários.

O trabalho de CUYA et al. (2021) propôs uma interação visual-háptica para aprimorar a visualização de dados gráficos com *feedback* vibrotátil. Os usuários exploram gráficos em dispositivos não convencionais, recebendo *feedback* por meio de uma luva com cinco atuadores.

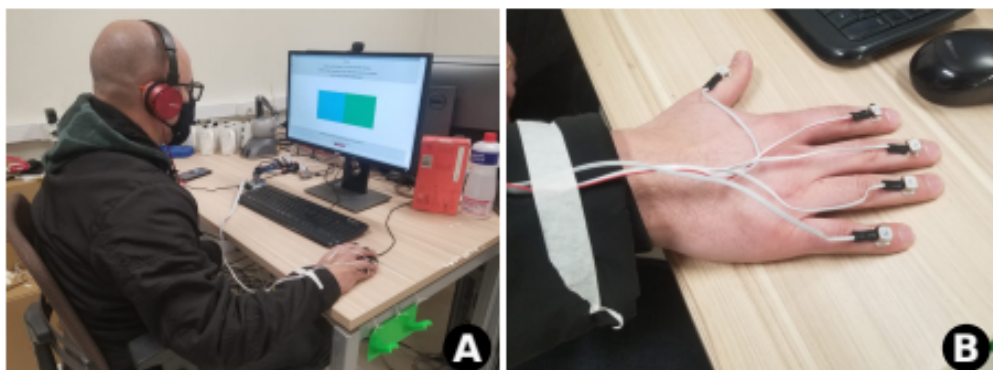
Figura 6. Mapa físico desenvolvido para codificar dados por meio da vibração e temperatura



Fonte: (VAN LOENHOUT, 2021)

O método utiliza uma imagem háptica de baixa resolução para codificar a intensidade da vibração com base na posição do mouse no gráfico. Um estudo com 25 participantes avaliou a percepção háptica e diferentes intensidades de vibração propostas. Uma diferença significativa na precisão e no tempo de resposta sugeriu a capacidade de discriminar dados

Figura 7. Artefato utilizado no trabalho de CUYA et al.

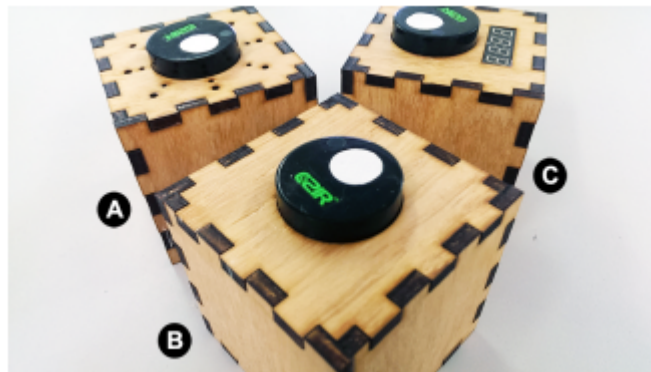


Fonte: (CUYA et al., 2021)

com rapidez conforme a diferença de intensidade aumenta, um mapa de calor revelou a preferência dos usuários e auxiliou na proposição de melhorias na compreensão dos dados.

A pesquisa de Hogan Trevor et al. (2016) explorou a influência de diferentes modalidades sensoriais na interpretação do usuário em representações de dados, comparando experiências visuais, auditivas e hápticas. Focando na representação háptica, especialmente na vibração, o estudo, realizou avaliações por meio de grupos focais e entrevistas micro-fenomenológicas, e revela que a vibração evoca memórias passadas, como sensações de telefone vibrando ou estar em um trem. Limitações na comunicação via vibrações, como em alarmes que indicam a necessidade de acordar, mas não a hora exata, são discutidas pelos participantes. Conclui-se que a representação háptica gera interpretações pessoais e emocionais, destacando sua crescente importância e oferecendo novas formas tangíveis e hápticas de interação com informações. O estudo sublinha a relevância do corpo na interpretação de dados e enfatiza a ubiquidade da vibração como uma modalidade háptica com a capacidade única de evocar experiências passadas, Figura 8.

Figura 8. Artefato vibratório para codificação de dados e estimulação tátil proposto no estudo



Fonte: (HOGAN; HORNECKER, 2016)

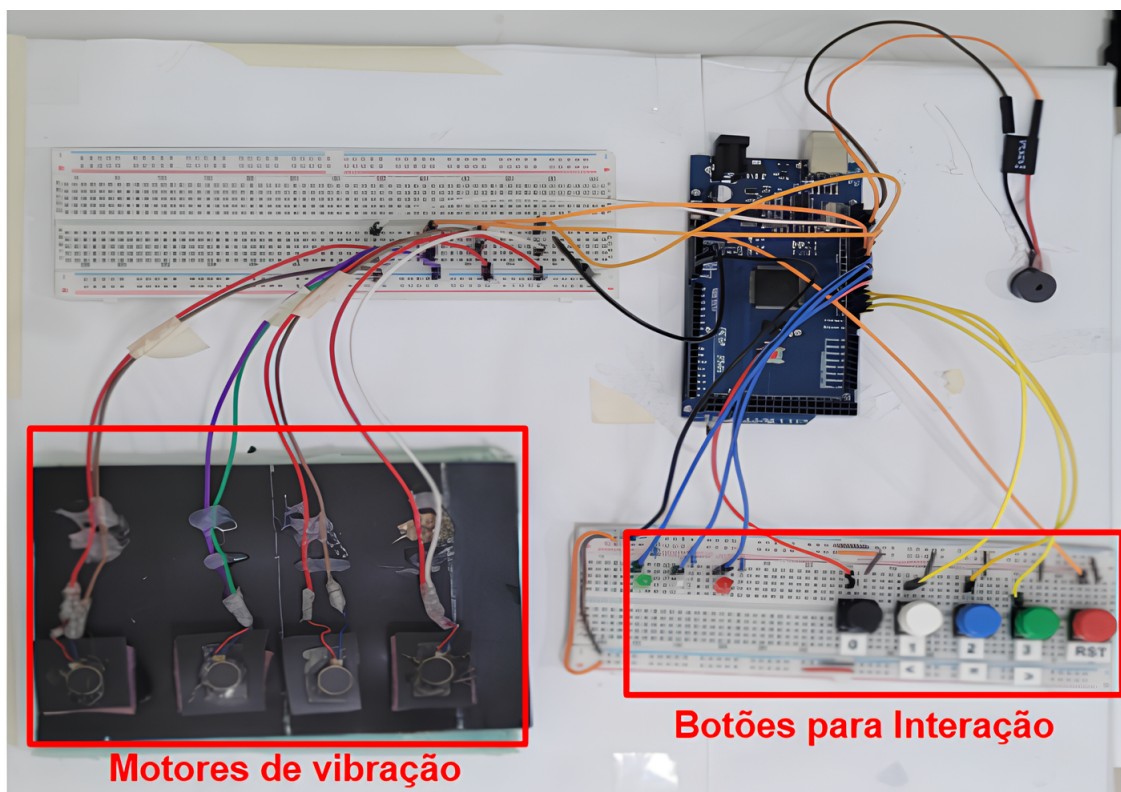
4 METODOLOGIA

As principais características do artefato físico desenvolvido para representar dados e avaliar a percepção do usuário por meio da vibração são apresentados nesta seção.

4.1 *Design do Artefato Vibratório Proposto*

O artefato é composto por uma placa de prototipação do tipo *Arduino Mega*, utiliza 4 motores vibratórios do tipo moeda distribuídos em linha por uma distância de 3 cm, os motores apresentam a dimensão de 4 mm de altura, 10 mm de diâmetro, 2,1 mm de comprimento e um peso de aproximadamente 5 g. A Figura 9 apresenta a implementação do artefato e a Figura 10 a apresenta o esquema de fritzing do artefato.

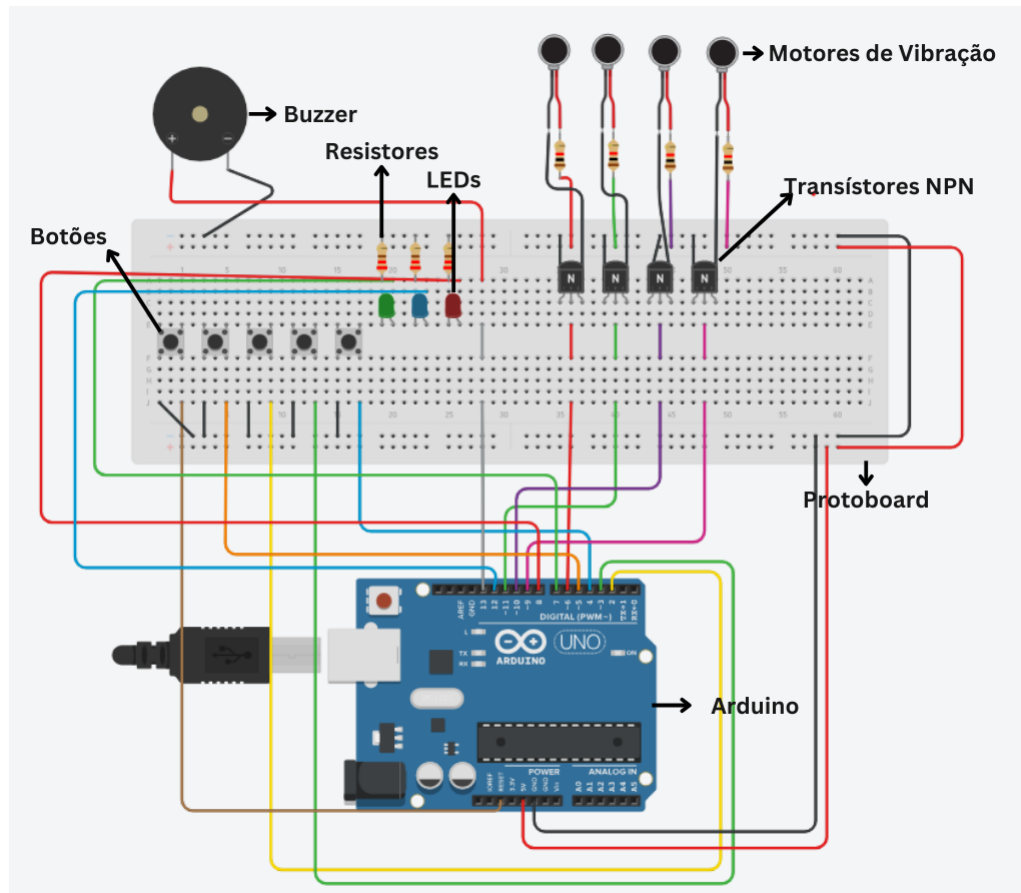
Figura 9. Artefato produzido para estudo da percepção dos dados por meio da vibração



Fonte: Autor, 2024

Os motores vibratórios, podem representar dados, por meio da configuração de parâmetros da vibração, como: frequência e duração de tempo. A configuração dos dispositivos e dados é realizada por meio da interface de códigos da placa Arduino.

Figura 10. Esquema de Fritzing do artefato



Fonte: Autor, 2024

O usuário pode interagir com o artefato por meio do toque sob os motores de vibração conforme a Figura 11. Destaca-se a utilização de camadas de esponja e borracha no suporte dos motores para minimizar a propagação da vibração para outros elementos do artefato.

4.2 Funcionamento

Ao ser ligado na energia, o artefato entra em funcionamento ativando um sinal sonoro por meio de bip e acende um LED de cor verde, informando que o dispositivo está ligado, posteriormente um LED de cor azul acende informando o início dos artefatos e o funcionamento do motor de vibração ocorre, notificando o início dos processos de *feedback* tátil.

Durante a execução dos processos, o usuário dispõe de 5 botões para: 1 botão para reiniciar o equipamento e 4 botões para aplicar respostas as tarefas de avaliação. No decorrer das tarefas os motores são ativados e ao final dos testes um led vermelho com

Figura 11. Esquema de interação com o motor de vibração



Fonte: Autor, 2024

alarme sonoro é ativado informando o fim dos processos. Todas as informações coletadas são armazenadas em um *log* para posterior processamento.

4.3 Peças e Componentes Eletrônicos

O artefato desenvolvido é composto por um *Arduino Mega*, placa de ensaio (*proto-board*), *leds*, botões, *buzzer*, resistores e motores de vibração do tipo moeda. Detalhes dos itens utilizados, quantidades e valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Lista de itens utilizados para construir o artefato de codificação de dados vibratórios por meio da vibração.

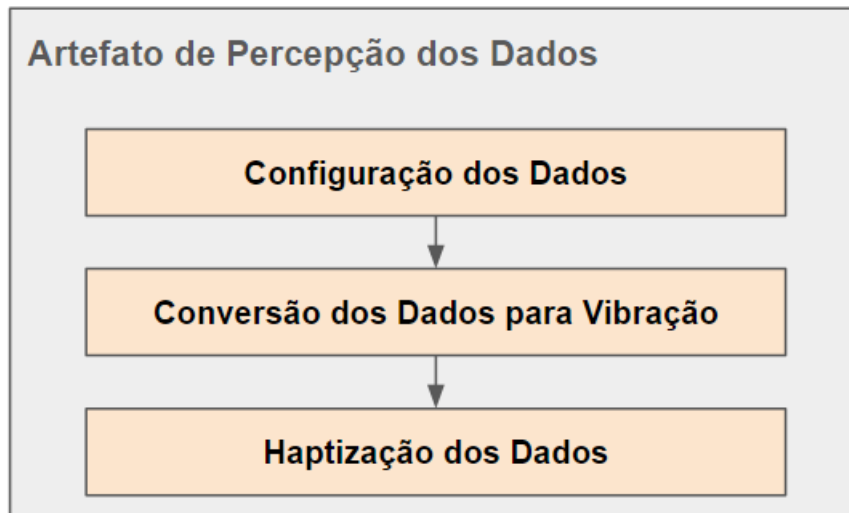
Item	Quantidade
Arduino MEGA	1 unidade
Protoboard 830 furos	2 unidades
Motor de Vibração modelo 1027	4 unidades
Transistores NPN 2n2222	4 unidades
Botões	5 unidades
LED 3mm	3 unidades
Buzzer	1 unidade
Resistores	7 unidades
Espunja 3 cm	30 cm x 10 cm
Borracha 0.3 mm	30 cm x 10 cm

4.4 Arquitetura

O artefato é composto por um módulo executando 3 estágios: a) configuração dos dados — processa e encaminha o conjunto de dados para as funções de conversão de dados

para vibração; b) conversão dos dados para vibração — promove a conversão dos dados por meio das relações de vibração previamente selecionadas (frequência ou duração de tempo); c) tornar os dados hápticos — efetiva a conversão dos dados digitais para informações de vibração usando os motores de vibração. A visão geral dos principais componentes da arquitetura do artefato proposto são apresentados na Figura 12.

Figura 12. Principais componentes do protótipo e suas relações



Fonte: Autor, 2024

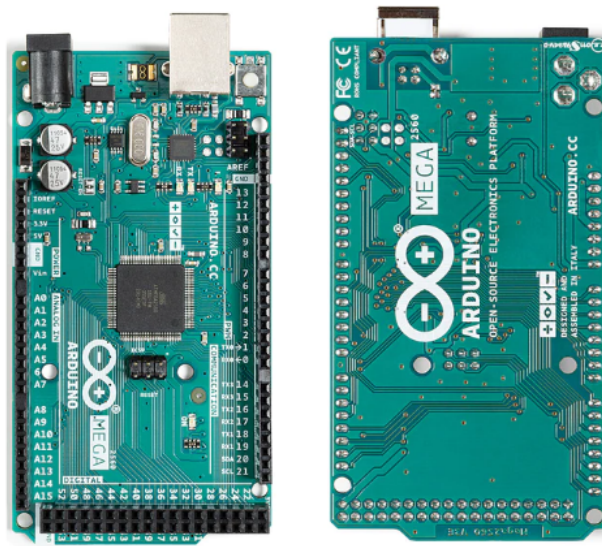
4.4.1 Placa de Prototipagem Arduino

É uma placa microcontroladora baseada no chip ATmega2560. Possui 54 pinos de entrada/saída digital, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de hardware), oscilador de cristal de 16 MHz, conexão USB, conector de alimentação, conector ICSP, botão de reinicialização, 256 KB de memória flash para armazenamento de código, 8 KB de SRAM e 4 KB de EEPROM, pode ser alimentado por conector de alimentação DC (7 - 12V) ou conector USB (5V) (ARDUINO..., 2024). A Figura 13, apresenta a parte frontal e traseira da placa.

4.4.2 Motor Vibração

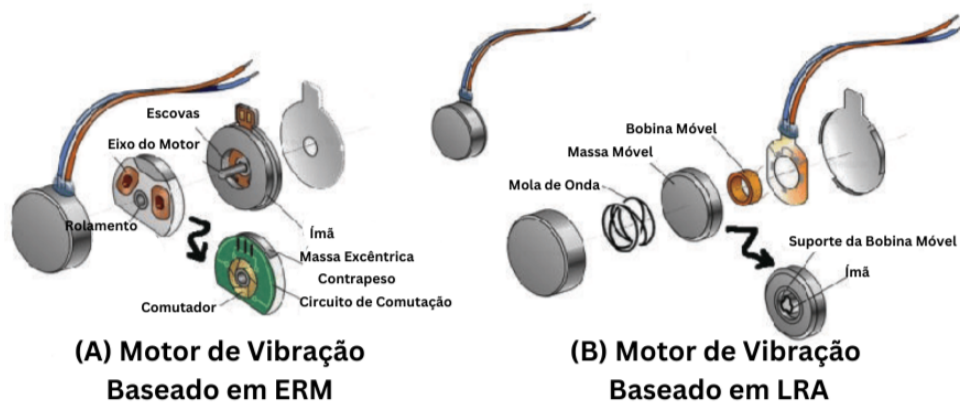
Os motores de vibração comumente variam entre dois tipos: os motores de massa rotativa excêntrica (ERM) e os atuadores ressonantes lineares (LRA). Os motores ERMs têm uma pequena massa ligada ao eixo de um motor DC, enquanto os LRAs contêm uma pequena massa interna ligada a uma mola vibrando linearmente com um sinal AC. Os ERMs vibram em dois eixos, enquanto os LRAs vibram em apenas um, a Figura 14 apresenta um esquema dos modelos citados.

Figura 13. Placa de prototipagem Arduino Mega 2560



Fonte: Adaptação de (ARDUINO..., 2024)

Figura 14. Esquema técnico dos motores de vibração ERM e LRA



Fonte: Adaptado de (ALI; LIU, 2020), imagem sob licença CC BY-NC-SA 4.0

Os motores do tipo LRA são mais comuns em *smartphones*, relógios e *trackpads* para imitar a sensação de clique. Por exemplo, os novos *MacBooks* e *iPhones* da *Apple* apresentam o *Apple Taptic Engine* que usa a tecnologia LRA. Embora os LRAs sejam mais responsivos do que os ERM (15-25ms tempos de inicialização), sua força de vibração é menor e a fiação do circuito mais complicada.

5 AVALIAÇÃO DOS LIMITES DE VIBRAÇÃO

Esta seção apresenta um estudo aplicado por meio do artefato desenvolvido com objetivo de identificar limite de frequências capazes de compor escalas vibrotáteis para mapeamento de dados, para tanto, um grupo de tarefas de InfoVis foram propostas e descritas abaixo:

1. Identificar limites específicos:

- Para identificar o limite mínimo perceptível, serão propostas duas tarefas.
 - Tarefa 1 - Um conjunto de valores crescente é utilizado. O usuário vai clicando em um botão para incrementar mais intensidade em um motor, este inicialmente tem intensidade zero, no momento que o usuário perceber a vibração ele confirma a percepção apertando em um botão.
 - Tarefa 2 - Um conjunto de valores decrescente é utilizado. O usuário vai clicando em um botão para decrementar a intensidade em um motor, este inicialmente tem intensidade alta, no momento que o usuário perceber a menor vibração, ele confirma a percepção apertando em um botão.
- Tarefa 3 - Identificar o limite máximo perceptível, até o ponto de conforto. O participante será instruído a aumentar progressivamente a intensidade do motor clicando em um botão. A ação continua até que o participante alcance um nível de vibração que seja perceptivelmente confortável. No entanto, é importante observar que o participante pode eventualmente atingir um ponto em que a vibração se torna desconfortável nos dedos, indicando também o limite máximo que o motor pode atingir.

2. Identificar grupos de limites:

- Tarefa 4 - Identificar grupos de limites com o menor intervalo de percepção. Cada "rodada" consistirá em uma série de testes nos quais o participante será exposto a diferentes níveis de vibração. Ao todo, serão realizadas 15 rodadas durante as quais os participantes experimentarão valores de vibração dentro dos limites mínimo e máximo identificados nas etapas anteriores. Os valores de vibração em cada rodada serão gerados aleatoriamente com base em uma função de números randômicos, garantindo uma distribuição variada dentro do intervalo estabelecido.

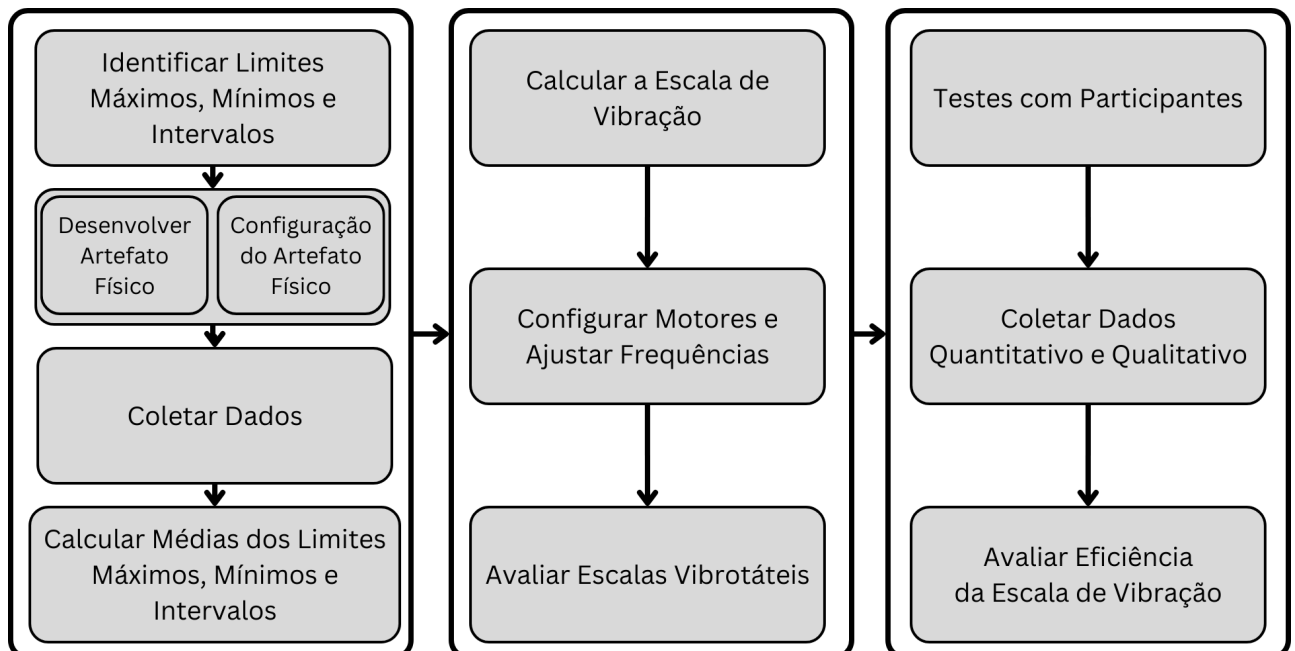
3. Comparar valores limites identificados

Para comparar os limites identificados duas escalas serão propostas com base nos valores mínimos, máximos e nas respectivas divisões para cada escala. Então uma escala com 3 valores e uma escala com 4 valores. Assim, duas tarefas de comparação serão aplicadas dessa maneira:

- Tarefa 5 - Um conjunto de 3 tipos de vibração são apresentados em motores distintos e de forma aleatória, o usuário deve identificar a intensidade e ordenar crescentemente as intensidades.
- Tarefa 6 - Um conjunto de 4 tipos de vibração são apresentados em motores distintos e de forma aleatória, o usuário deve identificar a intensidade e ordenar crescentemente as intensidades.

Todas as tarefas propostas foram realizadas utilizando o dedo indicador, toque sobre motores de vibração, tiveram o tempo de execução coletado e terminam com o pressionar de um botão. Os valores identificados neste processo avaliativo, não devem gerar qualquer desconforto ao usuário e devem estimular a intuição¹, um esquema do procedimento utilizado é apresentado na Figura 15

Figura 15. Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor, 2024

¹ faculdade ou ato de perceber, discernir ou pressentir coisas (OXFORD..., 2024)

5.1 Suporte Computacional e Ambiente dos Testes

Para realização dos testes o seguinte suporte computacional foi utilizado:

- 01 Artefato Físico desenvolvido para percepção de dados;
- 01 Mesa e Cadeiras;
- 02 Cadeiras;
- 01 *Notebook* (core i5, 8GB RAM);
- 01 Monitor;
- Arduino IDE;
- Formulários via *Google Forms* para coleta de dados qualitativos.

5.2 Ambiente dos Testes

O ambiente dos testes ocorreu em uma sala fechada, com iluminação artificial, o artefato físico avaliativo foi posicionado horizontalmente em uma mesa padrão, com superfície plana. O usuário foi posicionado em uma cadeira e interagiu com o artefato conforme a Figura 16.

5.3 Participantes

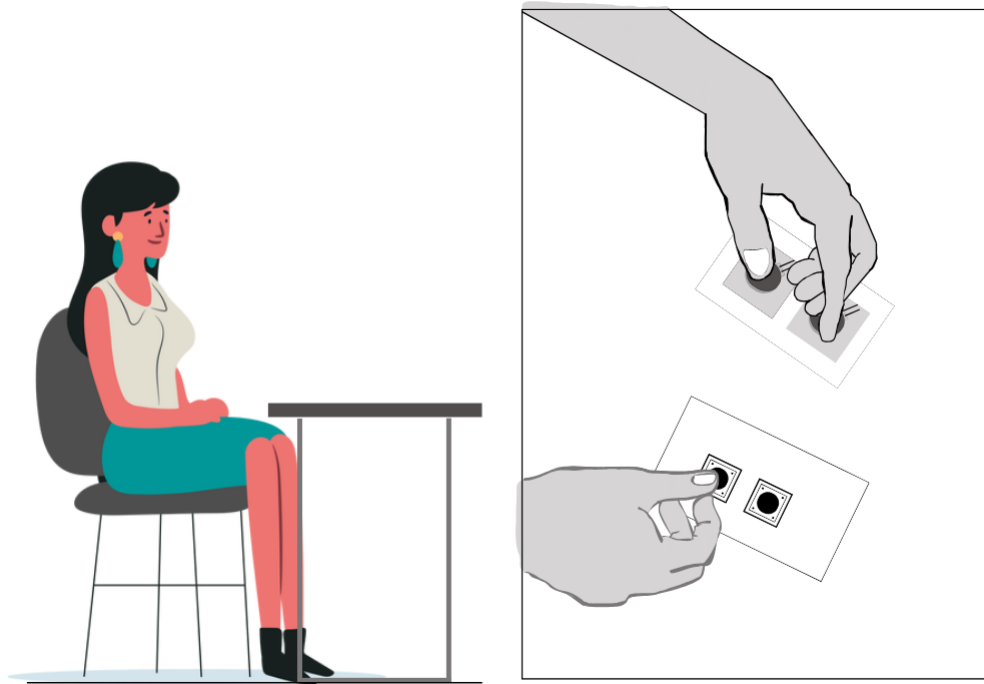
Um total de 05 participantes foram recrutados de forma aleatória pela Universidade Federal do Pará, com idade entre 18 e 65 anos, os participantes não tinham experiência na percepção de dados por meio de dispositivos táteis, segundo o relato de cada um no formulário.

5.4 Procedimentos

Para a realização do procedimento de avaliação, os participantes assinaram um Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) que detalha os objetivos e as responsabilidades do voluntário, bem como a autonomia para responder a qualquer questionamento, interromper ou suspender a coleta de dados, os riscos de distúrbios de saúde ou integridade física e psicológica, e acordos de divulgação.

Os participantes receberam orientações por meio de um vídeo instrutivo: introdução aos testes, características hápticas da vibração, informações sobre a interação com o artefato e informações sobre o preenchimento das respostas por meio de um formulário digital.

Figura 16. Ilustração da interação do participante com o artefato



Fonte: Autor, 2024

Posteriormente, um treinamento foi realizado, com um conjunto de dados aleatórios objetivando instruir e sanar dúvidas do usuário. Após o *feedback* positivo do usuário, os teste foram executados.

5.5 Coleta de dados

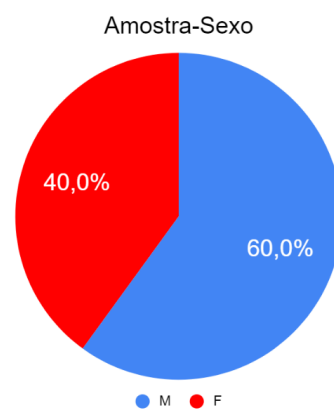
A coleta de dados ocorreu entre 15 e 20 de fevereiro de 2024. As avaliações foram realizadas conforme a disponibilidade dos participantes. A duração dos testes teve um tempo médio de 9 minutos e 18 segundos. Um avaliador sempre esteve presente durante os procedimentos.

Após a coleta dos dados, todos os registros foram organizados em planilhas eletrônicas no sistema *GOOGLE SHEET* e analisados no *software* estatístico R.

6 RESULTADOS

Este trabalho de pesquisa demonstra por meio de gráficos os resultados alcançados. Assim, os participantes da avaliação apresentam as seguintes características em relação ao sexo conforme Figura 17. Não houve registro de perdas amostrais, desistências ou dados ausentes.

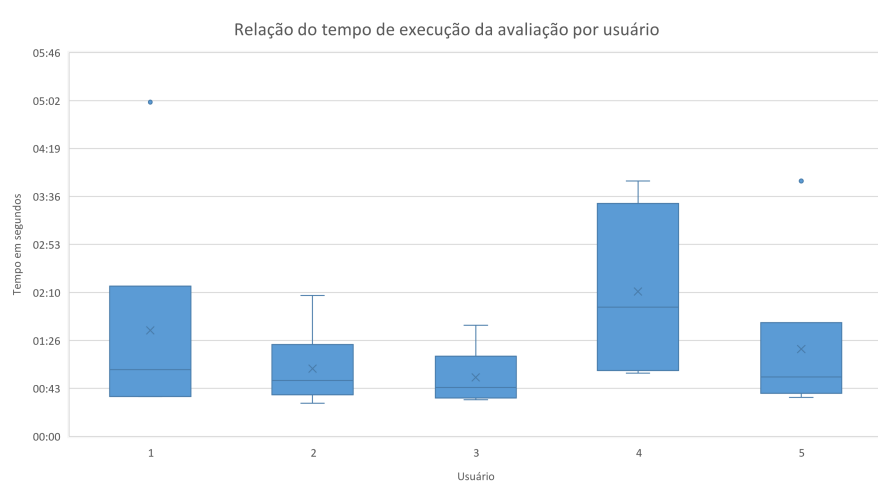
Figura 17. Caracterização da amostra em relação ao sexo



Fonte: Autor, 2024

A Figura 18 apresenta a relação de tempo médio por tarefa em relação aos usuários.

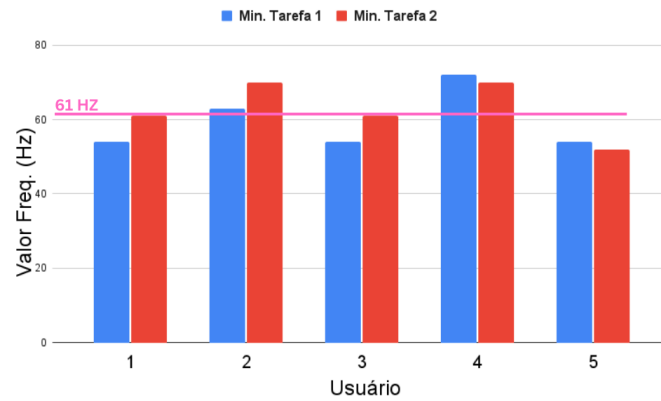
Figura 18. Relação do tempo de execução por tarefa relativo ao usuário



Fonte: Autor, 2024

A Figura 19 apresenta os valores mínimos perceptíveis que foram identificados na realização da Tarefa 1 e Tarefa 2.

Figura 19. Relação do menor valor de vibração percebida por usuário obtidos através da Tarefa 1 e Tarefa 2

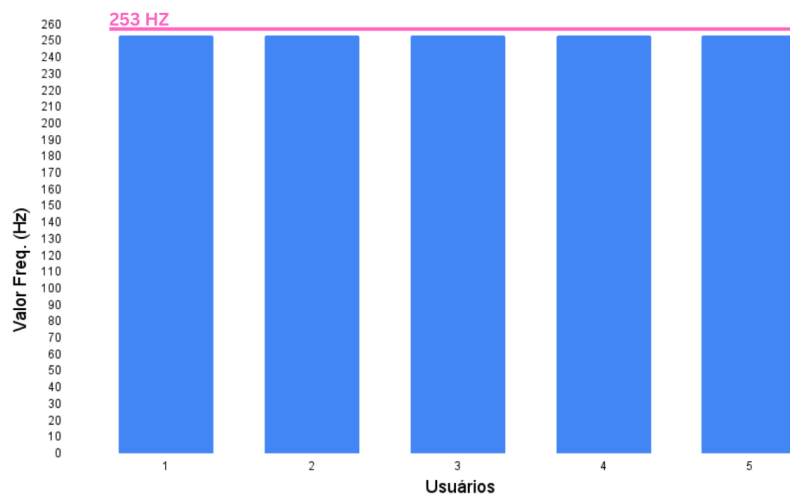


Fonte: Autor, 2024

O menor valor limite perceptível de vibração foi estimado em 61,1 Hz. A identificação deste valor foi baseada na média aritmética simples das tarefas 1 e 2.

A Figura 20 apresentam o máximo valor perceptível identificado por meio dos usuários aplicado a um conjunto de dados com valores crescente (Tarefa 3).

Figura 20. Maior valor de vibração percebida por usuário, aplicando intervalos decrescente de vibração

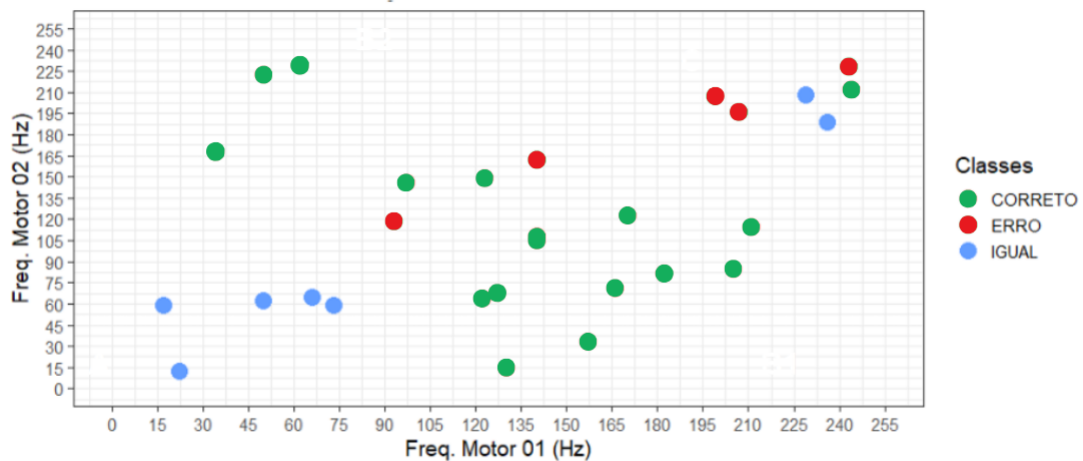


Fonte: Autor, 2024

O maior limite perceptível de vibração, sem causar desconforto ao usuário foi estimado em 253 Hz. Este valor coincide a frequência máxima gerada pelos motores utilizados no artefato de teste. A identificação deste valor foi baseada na média aritmética simples da Tarefa 3.

A Figura 21, apresenta os resultados da tarefa 4 ao qual é realizado a comparação entre a vibração de cada motor utilizado nos testes (Motor 1 e 2). Dessa forma, podemos extrair do gráfico que a sinalização da classe igual dar-se pela proximidade das frequências em baixa vibração

Figura 21. Relação do menor valor de vibração percebida por usuário, aplicando intervalo decrescente de vibração



Fonte: Autor, 2024

Ainda sobre o gráfico da Figura 21, as frequências dos dois motores, Motor 01 e Motor 02, são representadas ao longo dos eixos X e Y, respectivamente. Cada ponto no gráfico representa uma rodada da tarefa, e a cor do ponto indica o resultado da rodada: CORRETO (verde), ERRO (vermelho) ou IGUAL (azul).

A partir da distribuição dos pontos é destacada da seguinte maneira:

- Classe CORRETO (verde): A maioria dos pontos verdes está concentrada na parte superior do gráfico. Isso sugere que, para a maioria das rodadas nesta classe, a frequência do Motor 02 é alta quando a frequência do Motor 01 também é alta. Isso pode indicar que o usuário foi capaz de perceber corretamente a diferença nas frequências quando ambas eram altas.
- Classe ERRO (vermelho): Os pontos vermelhos estão espalhados por todo o gráfico, indicando que não há uma relação clara ou consistente entre as frequências dos dois

motores para as rodadas nesta classe. Isso pode sugerir que o usuário teve dificuldade em perceber corretamente a diferença nas frequências em algumas rodadas.

- Classe IGUAL (azul): Os pontos azuis estão mais concentrados na parte inferior do gráfico. Isso sugere que, para a maioria das rodadas nesta classe, as frequências dos dois motores são baixas. Isso pode indicar que o usuário percebeu as frequências como sendo iguais quando ambas eram baixas.

6.1 Definição das Escalas de Vibração

Com base nas etapas anteriores, foi possível propor duas escalas de vibração para mapeamento de dados e aplicação da tarefa 5 e tarefa 6. As escalas propostas foram: uma escala com 3 intensidades (Hz): 60, 155, 255 e uma escala com 4 intensidades (Hz): 60, 125, 185 e 250.

6.1.1 Cálculo dos Valores da Escala com 3 valores

Para construir a escala de 3 valores é necessário termos pegar os valores de 61 a 253, subtraímos o valor inicial (61) do valor final (253), o que nos dá a extensão total da escala. Em seguida, dividimos esse resultado por 2 para encontrar a metade dessa extensão. Portanto, a metade da escala é igual a essa metade calculada, que é 96. No entanto, como queremos a metade da escala real de 61 a 253, adicionamos essa metade calculada ao valor inicial (61), o que nos dá 157.

Definindo algumas variáveis:

- I como o valor inicial (neste caso, $I = 61$).
- F como o valor final (neste caso, $F = 253$).
- E como a extensão total da escala, que é a diferença entre o valor final e o valor inicial ($E = F - I$).
- M como a metade da escala, que é a soma do valor inicial com metade da extensão total ($M = I + \frac{E}{2}$).

Então, em termos matemáticos:

1. Extensão total da escala:

$$E = F - I = 253 - 61 = 192$$

2. Metade da extensão total:

$$\frac{E}{2} = \frac{192}{2} = 96$$

3. Metade da escala real:

$$M = I + \frac{E}{2} = 61 + 96 = 157$$

Portanto, podemos ver que a metade da escala real de 61 a 253 é de fato 157, conforme calculado. Essa explicação usa conceitos de subtração, divisão e adição, todos os quais são fundamentais na matemática discreta.

6.1.2 Cálculo dos Valores da Escala com 4 valores

Para criar uma escala com 4 valores entre 61 e 253, seguimos os seguintes passos:

1. Cálculo do Fator da Escala

O fator da escala é calculado como:

$$\text{Fator da Escala} = \frac{\text{Valor Final} - \text{Valor Inicial}}{3}$$

Para a escala de 61 a 253:

$$\text{Fator da Escala} = \frac{253 - 61}{3} = \frac{192}{3} = 64$$

2. Criação dos Valores da Escala

Os quatro valores da escala são criados adicionando o fator da escala ao valor inicial:

- Segundo Valor: Segundo Valor = Valor Inicial + Fator da Escala
- Terceiro Valor: Terceiro Valor = Segundo Valor + Fator da Escala
- Quarto Valor: Quarto Valor = Terceiro Valor + Fator da Escala

3. Encontrando os Valores

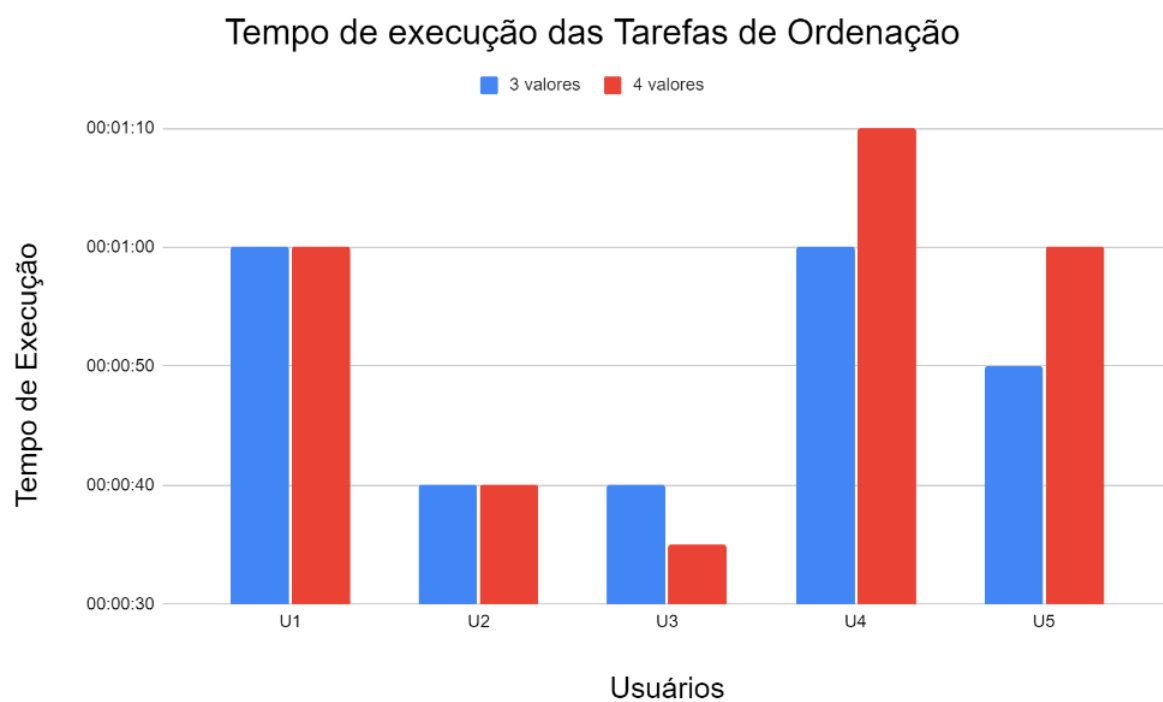
Os valores da escala são então encontrados:

- Segundo Valor: Segundo Valor = $61 + 64 = 125$
- Terceiro Valor: Terceiro Valor = $125 + 64 = 189$
- Quarto Valor: Quarto Valor = $189 + 64 = 253$

Portanto, os quatro valores da escala de 61 a 253, com um incremento de 64 entre cada valor, são 61, 125, 189 e 253.

Por fim, todos os usuários realizaram com êxito as tarefas propostas identificando e comparando valores. A Figura 22 apresenta os resultados alcançados

Figura 22. Relação de tempo por usuário para realização das tarefas de ordenação utilizando as paletas propostas



Fonte: Autor, 2024

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos a partir deste estudo proporcionaram *insights* valiosos sobre a percepção de vibração em um grupo de cinco voluntários, composto por ambos os sexos e uma ampla faixa etária. A análise detalhada dos dados revelou padrões interessantes, que podem ser úteis para diversas aplicações, especialmente no campo da InfoVis.

A identificação do menor e maior limite perceptível de vibração, estabelecidos em 61,1 Hz e 253 Hz, respectivamente, foi um marco significativo deste trabalho. Esses valores foram determinados com base na média aritmética das respostas dos participantes, evidenciando a sensibilidade humana a diferentes frequências de vibração.

A partir dos limites identificados, foi possível definir duas escalas de vibração, cada uma com suas respectivas intensidades, visando o mapeamento eficiente de dados. Essas escalas foram testadas em tarefas de ordenação, cujos resultados forneceram *insights* adicionais sobre a eficácia das paletas de vibração propostas.

Ademais, para trabalhos futuros, é importante considerar maneiras de incorporar escalas hápticas com cinco, seis ou mais valores em fisicalizações de dados. Isso pode envolver a exploração de conjuntos adicionais de motores de vibração para fins comparativos. Além disso, é fundamental explorar outros parâmetros de vibração, indo além da frequência e considerando aspectos como amplitude e duração. A validação em contextos específicos de uso também é essencial; testar as escalas de vibração propostas em cenários como aplicações de realidade virtual, jogos ou dispositivos médicos pode fornecer *insights* valiosos. Além disso, há oportunidades para propor novas abordagens de avaliação, incluindo a aplicação da escala de vibração em outras áreas do corpo, como os pulsos. Essas direções de pesquisa podem enriquecer ainda mais a compreensão da percepção tátil e sua aplicação em diversas áreas.

Em suma, a fisicalização de dados, ao transformar informações abstratas em elementos tangíveis, desempenhou um papel essencial na compreensão e análise de dados complexos. Por tanto, para esse trabalho, a fisicalização proporcionou aplicação na representação da vibração, permitindo uma interpretação sensorial dos dados. A criação de escalas vibrotáteis e o uso de um protótipo físico facilitaram a tradução de valores numéricos em experiências tangíveis, tornando os dados acessíveis e intuitivos. Esta abordagem não só enriqueceu a compreensão dos limites vibrotáteis, mas também destacou o potencial da fisicalização na criação de interfaces inclusivas e envolventes para análise de dados.

Referências

- ALI, K.; LIU, A. *Fine-grained Vibration Based Sensing Using a Smartphone*. 2020. Citado na página 35.
- ARDUINO Mega 2560 Rev3. 2024. <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- BARROSO, C. Context, informations meaning, and perception. In: *Proceedings of the 8th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology*. Milan, Italy: Atlantis Press, 2013. ISBN 978-90-78677-78-9. Citado na página 25.
- BRESCIANI, J.-P.; ERNST, M. O. Signal reliability modulates auditory–tactile integration for event counting. *NeuroReport*, v. 18, n. 11, p. 1157–1161, jul. 2007. ISSN 0959-4965. Citado na página 25.
- BURGESS, J. E.; GORTON, K. L.; LASITER, S.; PATEL, S. E. The Nurses’ Perception of Expressive Touch: An Integrative Review. *Journal of Caring Sciences*, v. 12, n. 1, p. 4–13, fev. 2023. ISSN 2251-9920. Citado na página 25.
- CARD, S. Information visualization. In: _____. *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications*. USA: L. Erlbaum Associates Inc., 2002. p. 544–582. ISBN 0805838384. Citado na página 21.
- CARD, S. K.; MACKINLAY, J.; SHNEIDERMAN, B. *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1999. Citado 4 vezes nas páginas 15, 19, 20 e 21.
- CUYA, F. G. B.; GUARESE, R. L. M.; JOHANSSON, C. G.; GIAMBASTIANI, M.; IQUIAPAZA, Y.; de Jesus Oliveira, V. A.; NEDEL, L.; MACIEL, A. Vibrotactile Data Physicalization: Exploratory Insights for Haptization of Low-resolution Images. In: *Symposium on Virtual and Augmented Reality*. Virtual Event Brazil: ACM, 2021. p. 84–91. ISBN 978-1-4503-9552-6. Citado 3 vezes nas páginas 9, 28 e 29.
- GRIFFIN, A. L. Feeling It Out: The Use of Haptic Visualization for Exploratory Geographic Analysis. *Cartographic Perspectives*, n. 39, p. 12–29, jun. 2001. ISSN 1048-9053. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 23 e 24.
- GRIFFIN, T.; BERTIN, J. *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*. Madison: The University of Wisconsin Press, 1987. v. 16. ISBN 0 299 09060 4. Citado na página 20.
- HOGAN, T.; HORNECKER, E. Towards a Design Space for Multisensory Data Representation. *Interacting with Computers*, p. iwc;iww015v1, maio 2016. ISSN 0953-5438, 1873-7951. Citado 3 vezes nas páginas 15, 28 e 30.
- JANSEN, Y.; DRAGICEVIC, P. An Interaction Model for Visualizations Beyond The Desktop. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 19, n. 12, p. 2396–2405, dez. 2013. ISSN 1077-2626. Citado na página 22.

- JANSEN, Y.; DRAGICEVIC, P. An interaction model for visualizations beyond the desktop. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 19, n. 12, p. 2396–2405, 2013. Citado na página 23.
- JANSEN, Y.; DRAGICEVIC, P.; ISENBERG, P.; ALEXANDER, J.; KARNIK, A.; KILDAL, J.; SUBRAMANIAN, S.; HORNBÆK, K. Opportunities and Challenges for Data Physicalization. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. Seoul Republic of Korea: ACM, 2015. p. 3227–3236. ISBN 978-1-4503-3145-6. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 22.
- KANDEL, E. R.; SCHWARTZ, J. H.; JESSELL, T. M.; SIEGELBAUM, S.; HUDSPETH, A. J.; MACK, S. et al. *Principles of neural science*. [S.l.]: McGraw-hill New York, 2000. v. 4. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- KEIM, D. A.; MANSMANN, F.; SCHNEIDEWIND, J.; ZIEGLER, H. Challenges in Visual Data Analysis. In: *Tenth International Conference on Information Visualisation (IV'06)*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 9–16. ISSN 2375-0138. Citado na página 19.
- LI, H.; SONG, A.; LI, B.; XU, B.; ZENG, H. Experiments and assessments of a 3-DOF haptic device for interactive operation. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, v. 2018, n. 1, p. 94, dez. 2018. ISSN 1687-5281. Citado na página 25.
- MARZVANYAN, A.; ALHAWAJ, A. F. *Physiology, Sensory Receptors*. In: StatPearls [Internet]., 2024. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539861/>. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539861/>>. Citado na página 26.
- MATOS, D. A. S.; JARDILINO, J. R. L. Os conceitos de concepção, percepção, representação e crença no campo educacional: Similaridades, diferenças e implicações para a pesquisa. *Educ. Form.*, v. 1, n. 3, p. 20–31, set. 2016. ISSN 2448-3583. Citado na página 25.
- MCCORMACK, J.; ROBERTS, J. C.; BACH, B.; FREITAS, C. D. S.; ITOH, T.; HURTER, C.; MARRIOTT, K. Multisensory Immersive Analytics. In: MARRIOTT, K.; SCHREIBER, F.; DWYER, T.; KLEIN, K.; RICHE, N. H.; ITOH, T.; STUERZLINGER, W.; THOMAS, B. H. (Ed.). *Immersive Analytics*. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 11190, p. 57–94. ISBN 978-3-030-01387-5 978-3-030-01388-2. Citado na página 16.
- NASCIMENTO, H. A. D. D.; FERREIRA, C. B. R. Uma introdução à visualização de informações. *Visualidades*, v. 9, n. 2, 2011. Citado na página 19.
- OXFORD University Press. 2024. Citado na página 37.
- PEROVICH, L. J.; ROGOWITZ, B.; CRABB, V.; VOGELSANG, J.; HARTLEBEN, S.; OFFENHUBER, D. The tactile dimension: a method for physicalizing touch behaviors. In: *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023. (CHI '23). ISBN 9781450394215. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3544548.3581137>>. Citado na página 16.
- RANASINGHE, C.; DEGBELO, A. Encoding variables, evaluation criteria, and evaluation methods for data physicalisations: A review. *Multimodal Technologies and Interaction*, v. 7,

n. 7, 2023. ISSN 2414-4088. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2414-4088/7/7/73>>. Citado 6 vezes nas páginas 15, 16, 22, 23, 24 e 28.

SAKET, B.; ENDERT, A.; DEMIRALP, Ç. Task-based effectiveness of basic visualizations. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, IEEE, v. 25, n. 7, p. 2505–2512, 2018. Citado na página 21.

SILVA, T. H. d. *Propriedades psicométricas do teste de percepção háptica da mão: alto relevo com formas geométricas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2019. Citado na página 16.

VAN LOENHOUT, R. *Creating a Physicalization That Uses Vibration and Temperature to Convey SDG Data*. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 15, 23, 28 e 29.