

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

ÁLISSON RENAN SVAIGEN

**MannaHap: um modelo de sistema háptico assistivo de  
representação de imagens digitais para deficientes visuais**

Maringá

2019

ÁLISSON RENAN SVAIGEN

**MannaHap: um modelo de sistema háptico assistivo de  
representação de imagens digitais para deficientes visuais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Departamento de Informática, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Linnyer Beatrys  
Ruiz Aylon

Maringá  
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)**

S968m Svaigen, Álisson Renan  
MannaHap : um modelo de sistema háptico assistivo de representação de imagens digitais para deficientes visuais / Álisson Renan Svaigen. -- Maringá, 2019.  
149 f. : il.

Orientador (a): Prof.a Dr.a Linnyer Beatrys Ruiz Aylon.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Informática, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2019.

1. Háptico. 2. Acessibilidade. 3. Inclusão digital. 4. DiY. I. Aylon, Linnyer Beatrys Ruiz, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Informática. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. III. Título.

CDD 21.ed. 004

MAS-CRB 9/1094

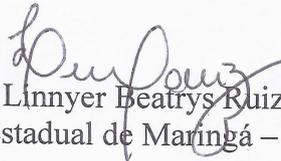
# FOLHA DE APROVAÇÃO

ÁLISSON RENAN SVAIGEN

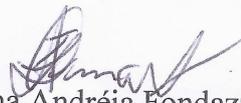
## **MannaHap: um modelo de sistema háptico assistivo de representação de imagens digitais para deficientes visuais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Departamento de Informática, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação pela Banca Examinadora composta pelos membros:

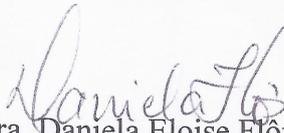
### BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Linnyer Beatrys Ruiz Aylon  
Universidade Estadual de Maringá – DIN/UEM



Prof. Dra. Luciana Andréia Fondazzi Martimiano  
Universidade Estadual de Maringá – DIN/UEM



Prof. Dra. Daniela Eloise Flôr  
Instituto Federal do Paraná – IFPR-Paranavaí

Aprovada em: 30 de maio de 2019.

Local da defesa: Sala 101, Bloco C56, *campus* da Universidade Estadual de Maringá.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, ao Criador por presentear a humanidade com o dom do livre arbítrio, meio no qual tomamos nossos próprios caminhos e atos, nos sendo permitido em muitos casos a honra do erro. É apenas pelo erro que analisamos nossos pontos falhos e elaboramos obras mais fortificadas, coesas e corretas, contribuindo de maneira nobre para o progresso da sociedade.

Agradeço também à professora doutora Linnyer Beatrys Ruiz Aylon pelas horas de orientação despendidas, sempre realizadas da maneira requerida e justa, fornecendo um ótimo suporte para que este trabalho pudesse ser concluído. Agradeço aos membros da banca examinadora, professoras doutoras Luciana Andreia Fondazzi Martimiano e Daniela Eloise Flôr, pela disponibilidade e sugestões de melhoria.

Faço imensos agradecimentos ao meu grande amigo Wuigor Ivens Siqueira Bine, que foi meu “braço direito e esquerdo” na realização deste trabalho, principalmente no desenvolvimento do protótipo. Suas ideias e projeção das peças envolvidas foram fundamentais para os resultados obtidos.

Agradeço em especial à Lailla Milainny Siqueira Bine pelo suporte, paciência, atenção e incontáveis dicas e sugestões para a realização deste trabalho. Sem dúvida alguma, sem a sua presença, o caminho seria muito mais longo, tortuoso e difícil. Merecem também meus sinceros agradecimentos os amigos de pós-graduação e os membros do Grupo Manna, pelos momentos de descontração, estudo e suporte.

Agradeço também à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo aporte financeiro durante o mestrado, por meio da bolsa de estudos. Vale ainda um agradecimento à Inês, secretária do programa de pós-graduação em Ciência da Computação, por todo o apoio, suporte e prontidão quando solicitada.

Reservo para o fim o agradecimento mais especial: aos meus pais. Todos os anos de dedicação e esforço é resultado não apenas do estudo, mas também do incentivo e monitoramento dos pais. Por eles iniciou-se minha educação e o afincado de sempre procurar o conhecimento, almejando superar todas as dificuldades impostas. Por isso, finalizo com este agradecimento especial: muito obrigado, Laercio e Marinete, por me ensinarem que não existe caminho mais digno e nobre senão o do estudo e do trabalho.

*“O mundo está cheio de coisas  
óbvias, que ninguém, em  
momento algum, observa.”*

---

*Sherlock Holmes, em “O cão dos  
Baskervilles”*

# MannaHap: um modelo de sistema háptico assistivo de representação de imagens digitais para deficientes visuais

## RESUMO

O MannaHap é um modelo de sistema háptico proposto como uma solução *Do it Yourself* e de baixo custo financeiro para auxiliar no ensino aprendizagem de deficientes visuais quando os conteúdos envolvem imagens digitais. O modelo disponibiliza uma representação tátil e auditiva das imagens. Ele é parte integrante de uma pesquisa conjunta que, além da representação de imagens digitais, tem como objetivo identificar automaticamente os objetos que compõem uma imagem. Este modelo possui quatro componentes principais que interagem e trocam informações, a saber: o usuário; dispositivo intermediário; servidor de processamento e um dispositivo tátil, construído como uma mesa de pinos com um mecanismo de eixos similar ao de uma impressora 3D. A motivação para o trabalho proposto está relacionada com os desafios impostos ao deficiente visual compreender no momento de aprender um conteúdo usando imagem digital por meio de representações alternativas, como a tátil e a auditiva. Os principais desafios estão além da interpretação em si, uma vez que as soluções disponíveis são de alto custo financeiro para aquisição. Um protótipo composto por um sistema na abordagem cliente × servidor, cujo dispositivo tátil é uma mesa de pinos, permitindo que o deficiente visual “sinta a imagem” foi desenvolvido como prova de conceito. As avaliações do protótipo consistiram na análise de custo financeira, análise temporal de operação dos pinos e experimentos com usuários deficientes visuais para avaliação de acessibilidade, usabilidade e experiência de uso. A avaliação de custo estimou um gasto de R\$ 1493,30 para o protótipo MannaHap, sendo o dispositivo com valor mais acessível em comparação com outros apresentados. Os experimentos foram realizados com deficientes visuais de baixa visão, que avaliaram o sistema como cumprindo, em sua maioria, com as diretrizes de acessibilidade, possuindo boa usabilidade e provendo uma boa experiência de uso. Com a avaliação temporal, verificou-se por meio de estimativas um tempo considerável para ativação dos pinos, o que poderia tornar impraticável a interação com o usuário, sendo a sua investigação uma área de pesquisa em aberto para trabalhos futuros. Com este trabalho, concluiu-se que o MannaHap é um indicativo de que é possível desenvolver tais sistemas hápticos com um custo financeiro acessível. Espera-se que o modelo seja um prelúdio para a popularização do uso deste tipo de tecnologia nas mais diferentes áreas de atuação dos deficientes visuais, contribuindo para um melhor entendimento das imagens digitais.

**Palavras-chave:** Háptico; Acessibilidade; Inclusão Digital; DiY.

# MannaHap: a model of haptic assistive digital images representation system for visually impaired

## *ABSTRACT*

The MannaHap is a haptic system model proposed as a low financial cost and a “Do it Yourself” solution in order to aid the visually impaired theacing/learning when the content involves digital images. The model provides a tactile and auditory representation of images. It is part of a joint research which, besides the digital image representation, aims to identify the compound objects of an image in an automatically way. This model has four main components which interact and change informations, namely: the user; an intermediary device; a processing server; and a tactile device, builded as a pin table with an axis mechanism, similar to a 3D printer. The motivation is related with de visually impaired challenges at the time to learn a content using digital images through alternatives representations, for instance tactile and auditory. The main challenges are beyond the interpretation in itself, since the available solutions have high financial cost acquisition. A prototype composed by a client x server approach, whose tactile device is a pin table, allowing the visually impaired to “feel the image” was developed as a proof of concept. The prototype evaluations consisted in financial cost analysis; pin operation temporal analysis; and experiments with visually impaireds, in order to evaluate accessibility, usability and user experience. The cost evaluation estimated that MannaHap spent R\$ 1493,30 to be build, being the most accessible device comparing to other devices presented. The experiments were accomplished with low vision people, who evaluated the system as reached, mostly, the accessibility guideliness, having good usability and providing a good user experience. With the temporal evaluation, it was verified by means of estimates, a considerable time to pins activation, which could make impractical the user interaction, being its investigation a opened research area to future works. With this work, it was concluded MannaHap is an indication that is possible to develop such haptic systems with a low financial cost. It is expected that MannaHap can be a prelude to haptic low cost accessibility devices popularization in many different areas, contributing to a better understanding of digital images.

**Keywords:** Haptic; Accessibility; Digital Inclusion; DiY.

## LISTA DE FIGURAS

Figura - 2.1	Relacionamentos entre usuário, sistema e ambiente, baseado em Hatzfeld e Kern (2016) . . . . .	22
Figura - 2.2	Imagem digital no sistema RGB e em níveis de cinza . . . . .	25
Figura - 2.3	Plataformas Arduino Uno (a) e Arduino Mega (b). Fonte: (Arduino Inc., 2018) . . . . .	27
Figura - 2.4	Concepção e representação tátil dos trabalhos relacionados à mobilidade de DVs . . . . .	36
Figura - 2.5	Sistema háptico desenvolvido por Swaminathan et al. (2016) . . .	37
Figura - 2.6	Concepção e representação tátil dos trabalhos relacionados à educação de DVs . . . . .	40
Figura - 2.7	Tangram Workstation, retirado de Bornschein et al. (2015) . . . .	41
Figura - 2.8	Mapeamento de imagem digital para o formato acústico-tátil, extraído de Silva et al. (2016) . . . . .	41
Figura - 3.1	MannaHap: conceito geral . . . . .	46
Figura - 3.2	MannaHap: arquitetura . . . . .	47
Figura - 3.3	Diagrama de atividades centrado no dispositivo intermediário . .	49
Figura - 3.4	Imagem digital de entrada e objetos reconhecidos . . . . .	52
Figura - 3.5	Diagrama de atividades centrado no servidor de processamento . .	55
Figura - 3.6	Dispositivo tátil conceitual . . . . .	60
Figura - 3.7	Pino proposto - componentes . . . . .	61
Figura - 3.8	Pino proposto - montagem e acionamento . . . . .	61
Figura - 3.9	Peças de encaixe para composição da mesa de pinos . . . . .	62
Figura - 3.10	Visualização conceitual dos eixos de movimentação . . . . .	64
Figura - 3.11	Exemplo de ativação de um pino por meio dos eixos . . . . .	65
Figura - 3.12	Exemplo de utilização de multiplexadores para os sensores <i>touch</i> .	66
Figura - 3.13	Diagrama de atividades centrado no dispositivo tátil . . . . .	68
Figura - 4.1	Projeção e concebimento da mesa de pinos desenvolvida no protótipo	72
Figura - 4.2	Peça de suporte de canto . . . . .	73
Figura - 4.3	Esquema de ligação entre suporte de canto, barras roscadas, porcas e arruelas . . . . .	74
Figura - 4.4	Primeira peça do acoplador da mesa de pinos . . . . .	75
Figura - 4.5	Segunda peça do acoplador da mesa de pinos . . . . .	75
Figura - 4.6	Terceira peça do acoplador da mesa de pinos . . . . .	76

Figura - 4.7	Esquema de acoplamento da mesa de pinos com as barras roscadas de sustentação . . . . .	76
Figura - 4.8	Concebimento das peças de sustentação da mesa de pinos e do mecanismo de eixos . . . . .	77
Figura - 4.9	Peça de sustentação do motor do <i>eixo y</i> . . . . .	79
Figura - 4.10	Peça de acoplamento da barra roscada do <i>eixo y</i> . . . . .	79
Figura - 4.11	Peça de sustentação na barra lisa para acoplamento do <i>eixo x</i> . . . . .	80
Figura - 4.12	Peça de sustentação do motor do <i>eixo x</i> . . . . .	80
Figura - 4.13	Peça de fixação da correia . . . . .	81
Figura - 4.14	Peça de sustentação nas barras lisas para acoplamento do <i>eixo z</i> . . . . .	82
Figura - 4.15	Peças de suporte do mecanismo do <i>eixo z</i> . . . . .	82
Figura - 4.16	Peças de encaixe dos rolamentos lineares . . . . .	83
Figura - 4.17	Peça de conexão entre encaixe dos rolamentos . . . . .	83
Figura - 4.18	Peça de acoplamento do servo motor . . . . .	83
Figura - 4.19	Peça de encaixe do motor de ativação dos pinos . . . . .	84
Figura - 4.20	Peça de encaixe do suporte do motor ao rolamento linear . . . . .	84
Figura - 4.21	Peça de encaixe da base do pino . . . . .	85
Figura - 4.22	Processo de montagem das peças relacionadas ao <i>eixo y</i> , na lateral da mesa . . . . .	85
Figura - 4.23	Mecanismo do <i>eixo y</i> da mesa de pinos . . . . .	86
Figura - 4.24	Processo de montagem das peças relacionadas ao <i>eixo x</i> . . . . .	87
Figura - 4.25	Mecanismo do <i>eixo x</i> da mesa de pinos . . . . .	87
Figura - 4.26	Processo de montagem das peças relacionadas ao <i>eixo z</i> e à ativação dos pinos . . . . .	88
Figura - 4.27	Mecanismo do <i>eixo z</i> e de ativação da mesa de pinos . . . . .	89
Figura - 4.28	Visão superior da base da mesa de pinos com os eixos de movimentação . . . . .	89
Figura - 4.29	Peças projetadas para os pinos e suas respectivas dimensões . . . . .	90
Figura - 4.30	Pino confeccionado e processo de fixação na mesa de pinos . . . . .	90
Figura - 4.31	Sensor <i>touch</i> TTP223 e multiplexador MM74HC4051WMX, utilizados no protótipo . . . . .	91
Figura - 4.32	Projeto e concebimento da placa de circuito impresso dos multiplexadores . . . . .	92
Figura - 4.33	Placas integradas da mesa de pinos . . . . .	94
Figura - 4.34	Versão definitiva da mesa de pinos desenvolvida . . . . .	94

Figura - 4.35	Arquitetura cliente × servidor implementada, considerando linguagens e aplicações . . . . .	95
Figura - 4.36	Diagrama de arquitetura do <i>software</i> seguindo o padrão MVC . . .	97
Figura - 4.37	Movimentação de acionamento dos pinos . . . . .	103
Figura - 5.1	Configurações adotadas para avaliação temporal da mesa de pinos	112
Figura - 5.2	Estimativa de tempo (minutos) para o caso médio, considerando diferentes dimensões de mesa de pinos . . . . .	115
Figura - 5.3	Estimativa de tempo (minutos) para o pior caso, considerando diferentes dimensões de mesa de pinos . . . . .	115
Figura - 5.4	Realização dos experimentos com usuários reais . . . . .	118
Figura - 5.5	Resultados da experiência de uso das questões Q1 e Q2, com opções de resposta “Sim” ou “Não” . . . . .	119
Figura - 5.6	Resultados da experiência de uso das questões Q3 a Q7, com 3 graus de satisfatoriedade na experiência de uso . . . . .	120
Figura - 5.7	Resultados da avaliação de acessibilidade, considerando respostas unânimes . . . . .	121
Figura - 5.8	Resultados da avaliação de usabilidade, segundo as heurísticas de Nielsen . . . . .	123
Figura - A.1	<i>View</i> login-adm.jsp . . . . .	134
Figura - A.2	<i>View</i> main-adm.jsp, sem dispositivos táteis vinculados . . . . .	134
Figura - A.3	<i>View</i> main-adm.jsp, com um dispositivo tátil vinculado . . . . .	135
Figura - A.4	<i>View</i> index.jsp, na qual não há dispositivos táteis disponíveis para o usuário . . . . .	135
Figura - A.5	<i>View</i> index.jsp, na qual há um dispositivo tátil disponível para o usuário . . . . .	136
Figura - A.6	<i>View</i> about.jsp . . . . .	136
Figura - A.7	<i>View</i> sendFile.jsp . . . . .	137
Figura - A.8	<i>View</i> waitPinTable.jsp . . . . .	137
Figura - A.9	<i>View</i> interactTable.jsp . . . . .	138
Figura - A.10	Configuração da mesa de pinos para as duas imagens digitais utilizadas nos experimentos . . . . .	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela - 2.1	Acuidade visual e tipos de auxílio, baseado em National Center for Health Statistics (2009) . . . . .	23
Tabela - 2.2	Trabalhos relacionados, em ordem cronológica . . . . .	34
Tabela - 5.1	Custo financeiro da estrutura base da mesa . . . . .	108
Tabela - 5.2	Custo financeiro dos eixos da mesa . . . . .	109
Tabela - 5.3	Custo financeiro dos pinos . . . . .	110
Tabela - 5.4	Custo financeiro das placas e demais circuitos . . . . .	110
Tabela - 5.5	Comparação financeira de dispositivos táteis com o MannaHap . .	111
Tabela - 5.6	Estimativa de tempo de ativação dos pinos para as configurações propostas . . . . .	114

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**CNC:** Computer Numeric Control  
**CSS:** Cascading Style Sheets  
**eMAG:** Modelo de Acessibilidade em Governo Eletrônico  
**DiY:** Do it Yourself  
**DV:** Deficiente Visual  
**HTML:** Hypertext Markup Language  
**IDE:** Integrated Development Environment  
**ISO:** International Organization for Standardization  
**JPA:** Java Persistence API  
**JSON:** JavaScript Object Notation  
**MVC:** Model-View-Controller  
**NDV:** Não Deficiente Visual  
**RGB:** Red-Green-Blue color system  
**SGBD:** Sistema de Gestão de Banco de Dados  
**W3C:** World Wide Web Consortium  
**WCAG:** Web Content Accessibility Guidelines  
**XML:** Extensible Language Markup  
**YAH:** You-Are-Here

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>Aspectos fundamentais para a modelagem de um sistema háptico assistivo</b>	<b>20</b>
2.1	Sistemas Hápticos . . . . .	20
2.2	Deficientes visuais, acessibilidade e tecnologias assistivas . . . . .	22
2.3	Imagem Digital . . . . .	24
2.4	Componentes eletrônicos para o desenvolvimento de um <i>display</i> de pinos . . . . .	26
2.4.1	Microcontrolador e a plataforma Arduino . . . . .	26
2.4.2	Motor de Passo . . . . .	27
2.4.3	Sensor capacitivo de toque . . . . .	28
2.4.4	Multiplexador e demultiplexador . . . . .	29
2.5	Métodos de avaliação de um sistema háptico de acessibilidade . . . . .	29
2.5.1	Diretrizes e avaliação de Acessibilidade . . . . .	30
2.5.2	Heurísticas de usabilidade de Nielsen . . . . .	31
2.6	Trabalhos Relacionados a sistemas hápticos no contexto de imagens digitais e deficientes visuais . . . . .	33
2.6.1	Trabalhos no contexto de mobilidade e localização . . . . .	35
2.6.2	Trabalhos no contexto de auxílio na educação . . . . .	38
2.6.3	Trabalhos no contexto de ambientes corporativos e mapeamento de imagens digitais . . . . .	40
2.6.4	Considerações gerais . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Solução proposta: o modelo MannaHap</b>	<b>43</b>
3.1	Conceitos, características e componentes do MannaHap . . . . .	44
3.2	Definições do componente “usuário” . . . . .	48
3.3	Definições do componente “dispositivo intermediário” . . . . .	49
3.4	Representação intermediária da imagem digital . . . . .	51
3.5	Definições do componente “servidor de processamento” . . . . .	53
3.6	Definições do componente “dispositivo tátil” . . . . .	59
3.6.1	Definições do pino . . . . .	60
3.6.2	Definições da mesa de pinos . . . . .	62
3.6.3	Definições dos eixos de movimentação . . . . .	63
3.6.4	Definições dos sensores <i>touch</i> e multiplexadores . . . . .	65
3.6.5	Definições dos processos envolvendo o microcontrolador . . . . .	67

3.7	Considerações gerais do modelo proposto . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Prova de conceito: desenvolvimento do protótipo MannaHap</b>	<b>70</b>
4.1	Escopo de desenvolvimento . . . . .	70
4.2	Materiais e métodos do desenvolvimento do <i>hardware</i> . . . . .	71
4.2.1	Desenvolvimento da mesa de pinos . . . . .	72
4.2.2	Desenvolvimento de sustentação da mesa de pinos . . . . .	73
4.2.3	Desenvolvimento do mecanismo de eixos e de acionamento do pino .	78
4.2.4	Desenvolvimento dos pinos . . . . .	89
4.2.5	Desenvolvimento do circuito da rede de multiplexadores e sensores <i>touch</i> . . . . .	91
4.2.6	Integração entre os circuitos e componentes . . . . .	93
4.3	Materiais e métodos do desenvolvimento do <i>software</i> . . . . .	95
4.3.1	Desenvolvimento dos <i>Models</i> . . . . .	97
4.3.2	Desenvolvimento das <i>Views</i> . . . . .	99
4.3.3	Desenvolvimento dos <i>Controllers</i> . . . . .	101
4.3.4	Desenvolvimento do código para o microcontrolador . . . . .	104
4.4	Considerações gerais do protótipo . . . . .	105
<b>5</b>	<b>Avaliações do estudo de caso</b>	<b>107</b>
5.1	Avaliação de custo financeiro de desenvolvimento . . . . .	107
5.2	Avaliação temporal de funcionamento da mesa de pinos . . . . .	112
5.3	Experimentos com usuários reais . . . . .	116
5.3.1	Avaliação de experiência de uso . . . . .	119
5.3.2	Avaliação de acessibilidade . . . . .	121
5.3.3	Avaliação de usabilidade . . . . .	123
5.4	Considerações gerais . . . . .	124
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>126</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>129</b>
<b>A</b>	<b>Apêndices</b>	<b>133</b>
A.1	Exemplo de representação intermediária no formato JSON da imagem digital apresentada na Figura - 3.4 . . . . .	133
A.2	Páginas <i>web</i> desenvolvidas segundo a definição das <i>Views</i> . . . . .	134
A.3	Configuração da mesa de pinos nas imagens digitais utilizadas nos experi- mentos . . . . .	139

A.4	Questionário de avaliação de experiência de uso . . . . .	140
A.5	Questionário de avaliação de usabilidade, segundo as heurísticas de Nielsen	142
<b>B</b>	<b>Anexos</b>	<b>143</b>
B.1	Parecer Consubstanciado do COPEP - UEM . . . . .	143
B.2	Formulário de avaliação de acessibilidade segundo o padrão WCAG, versão 2.0 - fornecido pela W3C . . . . .	147

---

# Introdução

---

Globalmente, estima-se que cerca de 1,3 bilhões de pessoas possuem algum grau de deficiência visual, das quais 36 milhões possuem cegueira total (Bourne et al., 2017). Considerando apenas o Brasil, 24% da população possuía algum tipo de deficiência em 2010, sendo 18,6% compostos de problemas relacionados à visão (Brasil, 2012).

Pessoas com deficiência se deparam, no cotidiano, com uma série de desafios para terem a mesma qualidade de vida das demais. Os esforços realizados para garantir a utilização e o acesso aos meios físicos e virtuais de maneira segura e autônoma às pessoas com deficiência é denominado acessibilidade (Brasil, 2015).

No dia-a-dia, deficientes visuais (DVs) utilizam-se de tecnologias assistivas para realizar suas atividades em diferentes áreas, como mobilidade, lazer e educação. Segundo Köhlmann e Lucke (2015), essas tecnologias buscam suprir a falta total ou parcial da visão por meio dos demais sentidos, em especial o tato e a audição.

No que tange à utilização do computador ou *smartphones*, uma tecnologia assistiva comumente utilizada são os leitores de tela, que têm por finalidade guiar a navegação e converter textos para uma voz sintetizada, provendo ao usuário uma representação auditiva do conteúdo.

Ao direcionar o foco para imagens digitais, há grandes desafios para representação do conteúdo. Considerando as diretrizes de acessibilidade, toda imagem digital deve possuir uma descrição textual que forneça ao DV uma representação completa da imagem. Porém, muitas imagens não possuem tal descrição, ou então, estão num nível superficial.

A tarefa de prover uma representação adequada de imagens se estende a outros âmbitos, como o educacional. De acordo com um estudo realizado por Luque et al. (2018),

professores e alunos DVs apontam que disciplinas que envolvem o uso de representações gráficas são de maior complexidade, tanto para a didática como para o aprendizado. Ainda nesse trabalho, é abordado ser de grande relevância a representação da imagem por um outro meio além da textual.

Em Luque et al. (2018), afirma-se que um meio alternativo de representação que surte bons resultados é o tátil, cujas abordagens comumente utilizadas exploram materiais texturizados ou superfícies com pontos salientes, similar à utilizada em Braille. No entanto, estas abordagens são limitadas em alguns contextos, pois não habilitam a representação de maneira dinâmica, que pode ser um item requerido de acordo com as necessidades do usuário.

Uma das maneiras de se representar imagens de maneira tátil é pela utilização de sistemas hápticos, que fundamentam-se na interação entre o usuário e o dispositivo por meio do toque, desencadeando percepções secundárias, como a auditiva (Hatzfeld e Kern, 2016). Ao longo dos anos foram desenvolvidas pesquisas que tratam da representação de imagens digitais por sistemas hápticos, como as de Braier et al. (2015), Bornschein et al. (2015), Buzzi et al. (2015) e Swaminathan et al. (2016).

Para tornar as representações dinâmicas, um dispositivo possível de utilização são os *displays* de pinos *refreshable*. Eles são constituídos por pinos acionados por motores dedicados, representando assim um determinado objeto designado por *software*. Encontram-se disponíveis para venda *displays* voltados justamente para o auxílio de deficientes visuais, como o BrailleDis, pertencente ao projeto alemão HyperBraille (Völkel et al., 2008), cujo modelo atual possui uma dimensão de  $104 \times 60$  pinos.

Embora sejam dispositivos que possam ser utilizados para a representação, o custo financeiro para adquiri-los é elevado. Um dispositivo BrailleDis, por exemplo, tem um custo de 45 mil euros para ser adquirido, considerando o território europeu (Namdev e Maes, 2015). Existem também modelos de *display* por um preço mais acessível, como é o caso do Brailliant, desenvolvido pela IrieAT<sup>TM</sup>, de dimensões  $4 \times 28$  (14 células Braille), que custa 895 dólares<sup>1</sup>. No entanto, dispositivos nesta faixa de preço possuem dimensões reduzidas, inviabilizando o seu uso para representação de imagens.

Devido ao considerável investimento financeiro para aquisição, entidades voltadas ao atendimento de DV, instituições de ensino e até mesmo o próprio indivíduo com condições financeiras limitadas podem ter dificuldades no acesso a essas tecnologias. Desta maneira, a acessibilidade digital referente à interpretação e contextualização de imagens digitais para DVs torna-se prejudicada em ambientes cujos recursos financeiros são escassos.

---

<sup>1</sup><https://irie-at.com/product/brailiant-bi14/> - acessado em 01/12/2018

Além do valor de investimento para aquisição, uma parcela das tecnologias assistivas adquiridas acabam em desuso por parte dos usuários. Os motivos para o desuso, segundo Hurst e Tobias (2011), compreendem as mudanças de necessidades e prioridades de diferentes usuários e também à especificidade de uso das ferramentas. Devido à esses fatores, houve um crescimento de ferramentas DiY (*Do it Yourself*), na qual um público de interesse elabora a própria ferramenta, de modo a atender seus interesses e necessidades.

Dadas tais considerações, a acessibilidade de imagens digitais para DVs possui três grandes desafios, a saber: i) a descrição correta e concisa dos elementos que a compõem; ii) os meios alternativos de representação de seu conteúdo; e iii) a concepção de ferramentas de baixo custo financeiro e que atendam as necessidades do usuário.

O primeiro desafio tem sua investigação na área computacional de Processamento de Imagens, sendo por si só, um vasto campo de pesquisa a ser explorado. Para esse desafio, é desenvolvida uma pesquisa integrada<sup>2</sup> à apresentada neste trabalho, de maneira a complementar o arcabouço de conhecimento obtido.

Já os dois últimos desafios permeiam na integração de diferentes áreas de conhecimento, como a acessibilidade digital, a interação humano - computador e a elaboração de sistemas hápticos.

Tendo em vista os desafios ii) e iii), o objetivo geral deste trabalho de mestrado é **conceituar um modelo de sistema háptico DiY de representação de imagens digitais para deficientes visuais, munido de um *display* de pinos *refreshable*, com um custo financeiro acessível quando comparado aos já existentes**. Almejando alcançar tal objetivo, este trabalho envolve os seguintes objetivos específicos:

1. estudar os conceitos relacionados aos sistemas hápticos e acessibilidade, bem como os trabalhos recentes que os integram à representação de imagens digitais;
2. propor um conceito de sistema háptico, a nível de *hardware* e *software*, que prime pelo custo financeiro acessível e seguindo a premissa DiY, provendo representação tátil e auditiva para o usuário;
3. realizar uma prova de conceito do sistema por meio de um protótipo;
4. avaliar o sistema nos seguintes aspectos: levantamento de custos de desenvolvimento do protótipo; análise temporal de funcionamento da mesa de pinos; realizar experimentos com DVs para avaliação da usabilidade, acessibilidade e experiência de uso do modelo concebido.

---

<sup>2</sup>A pesquisa consiste no MannAR, desenvolvida no laboratório Manna, do Departamento de Informática da Universidade Estadual de Maringá. A pesquisa estuda o reconhecimento e representação acessível de autômatos no contexto de Teoria da Computação

Este trabalho está organizado conforme segue: o tópico 2 apresenta os aspectos fundamentais para a modelagem de um sistema háptico assistivo, maneiras de avaliá-lo e os trabalhos relacionados à estes sistemas no contexto de imagens digitais e deficientes visuais; o tópico 3 trata da solução proposta nesta dissertação, que é o modelo MannaHap; O tópico 4 descreve a prova de conceito, expressa num protótipo, de modo a conceber as premissas tratadas no modelo; o tópico 5 discute as avaliações realizadas sobre o protótipo; o tópico 6 apresenta a conclusão desta pesquisa. Após a conclusão, encontram-se as referências, os apêndices e, por fim, os anexos.

---

# Aspectos fundamentais para a modelagem de um sistema háptico assistivo

---

Este tópico apresenta os principais conceitos envolvidos com a pesquisa e a modelagem de uma solução de acessibilidade dedicada aos DVs. O texto está organizado considerando, primeiramente, o referencial teórico para os tópicos a saber: sistemas hápticos; deficientes visuais, acessibilidade e tecnologias assistivas; imagem digital; e componentes eletrônicos relacionados ao desenvolvimento de um *display* de pinos.

Um outro aspecto para um sistema háptico assistivo é a sua avaliação, de modo a mensurar a sua efetividade de uso. Assim, são apresentadas neste tópico duas abordagens de avaliação: diretrizes de desenvolvimento e avaliação de ferramentas de acessibilidade; e as heurísticas de usabilidade de Nielsen, que podem ser aplicadas à acessibilidade.

Ao final deste tópico são apresentados os trabalhos desenvolvidos nos últimos anos relacionados à representação de imagens digitais para deficientes visuais, focando-se nos tipos de ferramenta e modos de avaliação utilizados.

## 2.1 Sistemas Hápticos

Segundo Hatzfeld e Kern (2016, p.3) o termo háptico significa “o senso do toque e movimento e as interações (mecânicas) envolvidas”. Os mesmos autores afirmam que, considerando dispositivos e técnicas desenvolvidas, tal termo fundamenta-se na interação

entre o usuário e o dispositivo realizada por meio do toque, que acomete uma percepção. As percepções, no contexto háptico, são classificadas em táteis e cinestésicas.

As percepções táteis estão relacionadas diretamente aos receptores sensoriais localizados na pele humana, recebendo estímulos de um agente externo independente de sua natureza, por exemplo, mecânica, termal, elétrica ou química. Já as percepções cinestésicas são provenientes da percepção primária tátil, e refletem no “estado operacional” do corpo humano, alterando diretamente as ações por ele tomadas, como por exemplo, a intensidade de força física, a orientação corporal e o alinhamento e posição de membros e articulações.

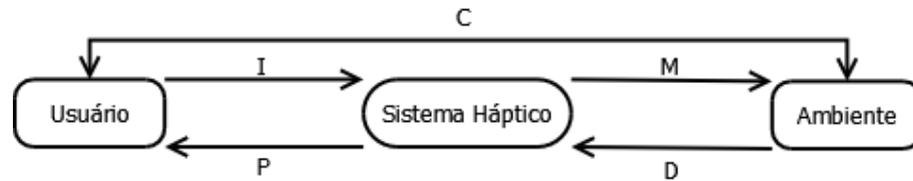
Todas as interações são classificadas em interações de percepção ou de controle de movimento. Sistemas hápticos devem ser capacitados a tratar com precisão e eficiência as referidas interações por meio da discriminação de operações. As interações de percepção incluem as seguintes operações:

- detecção: descrevem se um estímulo pode ser detectado ou não, qual sua relação com os órgãos sensoriais e se outras operações de percepção podem ser aplicadas;
- discriminação: descrevem como diferentes estímulos são tratados e quais propriedades os diferem;
- identificação: descrevem como identificar e obter conhecimento a partir de um estímulo;
- escala da informação: mensuram o nível em que os estímulos são classificados.

As interações de controle de movimento incluem as seguintes operações:

- deslocamento: descrevem a movimentação dos membros do usuário na exploração do ambiente;
- seleção: descrevem a marcação/seleção do usuário em objetos do ambiente; e
- modificação: descrevem a atuação do usuário para alterar propriedades dos objetos no ambiente.

A projeção de um sistema háptico depende da elaboração precisa de um protocolo de interação que permeie a relação entre o usuário e o seu ambiente de interesse. Esta afirmativa implica diretamente na implementação das tarefas de interação considerando os relacionamentos existentes entre usuário e o ambiente, ilustrados pela Figura - 2.1 como uma máquina de estados.



**Figura - 2.1:** Relacionamentos entre usuário, sistema e ambiente, baseado em Hatzfeld e Kern (2016)

O relacionamento entre usuário e ambiente consiste numa “via de mão dupla” baseada em diferentes co-manipulações *C*, mediados pelo sistema háptico. O usuário demonstra uma intenção *I* e interage com o sistema, que a identifica e realiza uma manipulação *M* no ambiente. É aferida uma detecção *D* no ambiente, repassando-a para o sistema háptico que gera, no usuário, uma percepção *P*.

Este ciclo permanece até que o usuário pare de se relacionar com o ambiente. Caso o sistema háptico projetado seja inconsistente nas tarefas de interação, algumas (ou todas) as relações podem se tornar imprecisas, e os propósitos do usuário com o ambiente são subvertidos.

Sistemas hápticos são desenvolvidos e aplicados em diferentes áreas do conhecimento. No que tange à acessibilidade de deficientes visuais, os sistemas hápticos auxiliam, dentre outros aspectos, na localização em ambientes (Zeng e Weber, 2016) e também no ensino (Swaminathan et al., 2016) (Braier et al., 2015).

Em outras áreas, como a medicina, tais sistemas com ênfase em telepresença e teleação são utilizados em procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos, como os desenvolvidos por Yin et al. (2016) e Spinelli et al. (2018), e também no tratamento de pacientes com doenças motoras (van der Meulen et al., 2016).

## 2.2 Deficientes visuais, acessibilidade e tecnologias assistivas

De acordo com o Censo Brasileiro realizado em 2010, 18,6% da população brasileira declarou possuir algum tipo de deficiência visual, sendo 3,6% uma deficiência severa. Este tipo de deficiência também é a mais presente em todas as faixas etárias, com maior acentuação no grupo acima de 65 anos. Quanto ao gênero, a deficiência afeta mais as mulheres (Brasil, 2012).

De maneira a categorizar os níveis de deficiência visual, a National Center for Health Statistics (2009) apresentou a classificação internacional de deficiências, incapacidades

e desvantagens, sendo que a classificação ICD-9-CM trata da acuidade visual de um indivíduo, apresentada pela Tabela - 2.1.

**Tabela 2.1:** Acuidade visual e tipos de auxílio, baseado em National Center for Health Statistics (2009)

<b>Classificação</b>	<b>Auxílios</b>
Visão normal	Lentes bifocais comuns
Próxima do normal	Lupas bifocais mais fortes; lupas de baixo poder
Baixa visão moderada	Lentes esferoprismáticas; lupas mais fortes
Baixa visão severa	Lentes esféricas; lupas de mesa de alto poder
Baixa visão profunda	Lupa montada telescópio; magnificação de vídeo; bengala; treinamento de orientação e mobilidade
Próxima à cegueira	Magnificação de vídeo; livros falados; Braille; Aparelhos de saída de voz; bengala; treinamento de orientação e mobilidade;
Cegueira total	Aparelhos de saída de voz; bengala; treinamento de orientação e mobilidade

As três últimas são consideradas as mais severas, necessitando de mais auxílios para a realização das tarefas do dia a dia. Para indivíduos com baixa visão profunda já é recomendado o uso de bengala e treinamento/orientação de mobilidade. Para os próximos à cegueira ou com cegueira total, indica-se a magnificação dos meios de leitura em Braille, além de *softwares* sintetizadores de voz.

Acessibilidade pode ser definida como a possibilidade de pessoas com algum grau de deficiência terem uma vida independente e participativa, sendo o Estado responsável por tomar medidas que a garanta, de maneira igualitária perante as demais pessoas (MacKay, 2006).

No Brasil, a acessibilidade é garantida pelo Estatuto da Pessoa com Deficiência, que é “destinada a assegurar e a promover, em condições de igualdade, o exercício dos direitos e das liberdades fundamentais por pessoa com deficiência, visando à sua inclusão social e cidadania” (Brasil, 2015, p.2).

Com o advento das tecnologias de informação, a acessibilidade passou a ser garantida também em meios digitais por intermédio das tecnologias assistivas, definidas como “produtos, equipamentos, dispositivos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivem promover a funcionalidade, relacionada à atividade e à participação da pessoa com deficiência ou com mobilidade reduzida” (Brasil, 2015, p.3).

A norma ISO 9999:2016 (ISO, 2016) estabelece a classificação e terminologia de produtos assistivos. Os produtos são divididos em 3 níveis: classes, subclasses e subdivisões de classes. Existem 12 classes distintas, por exemplo: produtos para educação e

treino de habilidades, para atividades domésticas, para comunicação e gerenciamento da informação.

O número de subclasses para cada classe varia. Para a classe de comunicação e gerenciamento da informação, por exemplo, há 14 subclasses, dentre elas, produtos assistivos para leitura, dispositivos de saída para computadores e dispositivos interativos para computadores. Já as subdivisões em cada subclasse ocorrem apenas para as que necessitam de uma maior especificação, como é o caso da subclasse de produtos assistivos para respiração, que se subdivide em equipamentos para inalação, respiradores, unidades de oxigênio, aspiradores e outros.

Com o objetivo de guiar o desenvolvimento de tecnologias assistivas, a W3C estabeleceu diretrizes de desenvolvimento no contexto de aplicações *web*, conhecidas como WCAG (*Web Content Accessibility Guidelines*) (Caldwell et al., 2008). No Brasil foi elaborado o eMAG (Modelo de Acessibilidade em Governo Eletrônico) (Brasil, 2014), que consiste numa série de recomendações para garantia de conteúdo acessível para pessoas com deficiência. Estas recomendações são inspiradas nas diretrizes WCAG.

Embora voltadas para o desenvolvimento *web*, tais diretrizes podem ser aplicadas para o desenvolvimento de sistemas hápticos de acessibilidade. Além de guiar os desenvolvedores, as diretrizes servem também como base de avaliação de ferramentas de acessibilidade, que são discutidas na subseção 2.5.1.

## 2.3 Imagem Digital

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional  $f(x, y)$  na qual  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais e a amplitude de  $f$  em cada par ordenado  $(x, y)$  é denominada “intensidade” ou “nível de cinza” da imagem no referido ponto. Quando as coordenadas espaciais e os valores de intensidade são finitos e discretos, a imagem é dita digital. O elemento mínimo de uma imagem digital, representado pelo valor de intensidade, é denominado mais comumente como *pixel*. (Gonzalez e Woods, 2007, 97)

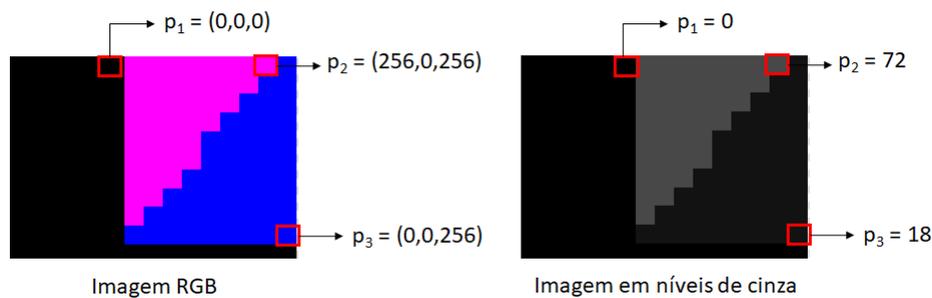
Um conjunto de pixels dispostos em coordenadas  $l \times c$ , sendo  $l$  o número de linhas e  $c$  o número de colunas, dão a dimensionalidade da imagem digital. Segundo Gonzalez e Woods (2007), a escala de valoração de um pixel, no ambiente computacional, é dependente diretamente do número de *bits* alocados para armazenamento do dado. A equação dada a seguir apresenta o valor máximo de valoração, na qual  $n$  é o valor máximo e  $b$  é o número de bits para alocação:

$$n = 2^b - 1 \tag{2.1}$$

É importante esclarecer que subtrai-se 1 devido ao fato do menor valor para um pixel ser 0. Tipicamente, essa escala varia de 0 a 255, requerendo 8 *bits* - ou 1 *byte* - de armazenamento para cada valor do pixel.

O valor do pixel varia também quanto à sua dimensionalidade, baseado no sistema de cor empregado na imagem digital. No caso da imagem digital em níveis de cinza, o pixel assume um valor unidimensional. Já para sistemas de cores que tornam a imagem digital colorida, o pixel pode assumir um valor  $n$ -dimensional, no qual  $n$  é o número de canais presentes no sistema de cor.

Um exemplo de sistema de cor com  $n$  canais é o RGB (*Red Green Blue*), que combina os valores de seus 3 canais de cores, formando uma cor de visualização resultante. Dessa maneira, considerando 8 *bits* de armazenamento para valoração do pixel e os três canais do sistema RGB, é possível gerar 16.777.216 diferentes cores. A Figura - 2.2 apresenta um fragmento de uma mesma imagem digital representada pelo sistema RGB e em níveis de cinza.



**Figura - 2.2:** Imagem digital no sistema RGB e em níveis de cinza

Pela figura, é possível observar três pixels distintos e sua valoração nos dois sistemas de cores. No RGB, o pixel é formado por três valores, no qual o primeiro corresponde ao canal R, o segundo ao canal G e o terceiro ao canal B. O pixel  $p_2$ , por exemplo, no qual é visualizado a cor rosa, tem valor  $(256,0,256)$ , sendo esta cor formada pela combinação dos valores máximos de vermelho (canal R) e azul (canal B). Já em níveis de cinza, o pixel possui um único valor, que varia de 0 a 255. O pixel  $p_2$ , nesse caso, possui valor 72.

Na Computação, a área de Processamento Digital de Imagens é a responsável por processar tais imagens, realizando diferentes tipos de operações, desde as computacionalmente mais simples, como limiarização, correção de contraste e brilho, até as mais complexas, como é o caso do reconhecimento de objetos/componentes. No âmbito das imagens digitais, este tipo de reconhecimento pode demandar grande esforço computacional e permeia por diferentes áreas da Computação, como Inteligência Artificial e Reconhecimento de Padrões, sendo um campo com muitas pesquisas em desenvolvimento.

## 2.4 Componentes eletrônicos para o desenvolvimento de um *display* de pinos

Conforme já explanado, este trabalho busca conceituar um sistema háptico cujo *hardware* consiste num *display* de pinos. Com a premissa de desenvolver um sistema de baixo custo financeiro, o referido *display* baseia-se na abordagem DiY, compreendendo assim, em sua estrutura, diferentes componentes eletrônicos.

Esta seção trata das principais características e funcionalidades de tais componentes, de modo a explanar a sua utilização no desenvolvimento do *hardware* proposto. Já a arquitetura do *display*, bem como a integração e utilização dos componentes são tratados no Tópico 3, na qual é apresentada a solução de sistema háptico deste trabalho.

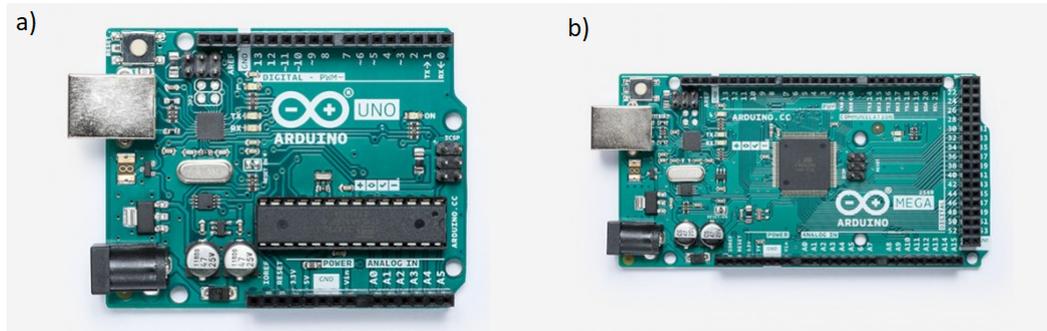
### 2.4.1 Microcontrolador e a plataforma Arduino

Um microcontrolador é, de maneira geral, um circuito que pode ser programado na qual, utilizando seus terminais de entrada e saída, executa-se internamente as funções desejadas por meio de um *software* (Penido e Trindade, 2013). Ele é composto por uma ULA (unidade lógica e aritmética), memória, periféricos de entrada e saída, além de dispositivos auxiliares, como temporizadores e comunicadores serial.

Microcontroladores são amplamente utilizados na automação de dispositivos, como em motores automobilísticos, sistemas residenciais inteligentes e sistemas de controle industriais (Penido e Trindade, 2013). As plataformas de prototipagem são dispositivos que integram os microcontroladores com demais componentes eletrônicos, como módulos de internet sem fio, sensores ultrassom e de temperatura.

O Arduino é uma plataforma eletrônica *open source* de *hardware* e *software* baseada no modelo “*easy-to-use*” (Arduino Inc., 2018). Seu *hardware* é composto por uma placa única munida de um microcontrolador com suportes para entrada e saída de sinais analógicos e digitais embutidos. O *software* é composto por uma linguagem de programação própria, baseada na linguagem da plataforma Wiring, e uma IDE baseada no *sketchbook* Processing.

A plataforma teve início na *Ivrea Interaction Design Institute* com o intuito de ser uma ferramenta para rápida prototipação destinada a estudantes sem um conhecimento aprofundado em eletrônica e programação. Sendo uma plataforma aberta, encontram-se disponíveis uma série de distribuições baseadas no Arduino, além de diferentes dispositivos eletrônicos que podem ser acoplados. A Figura - 2.3 apresenta as plataformas Arduino Uno e Arduino Mega, que são distribuições amplamente utilizadas por desenvolvedores.



**Figura - 2.3:** Plataformas Arduino Uno (a) e Arduino Mega (b). Fonte: (Arduino Inc., 2018)

Em relação às outras plataformas de prototipagem, Arduino Inc. (2018) apresenta algumas vantagens ao se utilizar Arduino, principalmente quando voltado para o uso no ensino:

- os componentes de *hardware* são baratos do ponto de vista financeiro quando comparados aos demais;
- a IDE é multiplataforma, executando nos sistemas operacionais mais populares, como Windows e Linux;
- a plataforma é regida por uma licença Creative Commons, permitindo o acesso aos projetos de *software* e *hardware* e, conseqüentemente, sua melhoria e distribuição de novas versões.

Com as considerações apresentadas, o Arduino mostra-se uma boa alternativa de plataforma para utilização na concepção do sistema háptico proposto neste trabalho, visto que há uma grande gama de dispositivos que podem ser acoplados à placa, contribuindo para a proposta DiY, e também que a sua aquisição é de baixo custo financeiro, convergindo para as premissas do sistema.

## 2.4.2 Motor de Passo

O motor de passo é um componente eletromecânico que converte pulsos elétricos em mecânicos gerando angulações discretas. São comumente utilizados em aplicações de medição e de controle, como em impressoras de jato à tinta e máquinas CNC (*Computer Numeric Control*) (Condit e Jones, 2004).

De modo geral, um motor de passo possui solenóides alinhadas que, quando energizadas, atraem o rotor e fazem o seu alinhamento com o eixo determinado, causando

uma pequena variação de ângulo, denominada passo (Yeadon e Yeadon, 2001). O número de passos de um motor é dado pelo número de alinhamento possíveis entre o rotor e as bobinas existentes.

Segundo Condit e Jones (2004) há três tipos básicos de motores de passo: de ímã permanente, de relutância variável e híbrido. O primeiro, como o nome sugere, tem um ímã permanente que gera um campo magnético que se soma ao das bobinas, dando maior torque na partida. A mecânica envolvida neste tipo de motor é mais simples e de menos custo de implementação, no entanto, possui uma menor precisão no passo.

Já o segundo, que não possui um ímã, tem o campo magnético gerado pela energização das bobinas, alinhando, assim, o eixo. Desse modo, não há um campo magnético permanente, o que faz com que a sua força de torque seja menor na partida. O terceiro tipo, híbrido, mescla a mecânica dos dois anteriores, utilizando dois grupos energizados distintamente em polo Sul e Norte, garantindo uma alternância entre os dentes e uma maior precisão dos passos.

### 2.4.3 Sensor capacitivo de toque

Um sensor capacitivo de toque é um dispositivo eletrônico que detecta um estímulo à uma determinada distância, sendo fundamentado nos princípios de um capacitor, que é composto por dois condutores elétricos separados por um isolador (Fischer, 2010). No caso do sensor, um polo de toque representa um condutor de capacitância. O segundo condutor é representado pelo ambiente do polo sensor e outro objeto condutor, como por exemplo, o dedo humano.

O sensor é conectado diretamente a um circuito de medição, que tem a sua capacitância medida periodicamente pela equação 2.2. Se um objeto condutor se aproxima ou toca o polo do sensor a capacitância medida aumentará, sendo detectada pelo circuito de medição e convertida em um sinal.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r \quad (2.3)$$

Na qual  $C$  é a capacitância,  $\epsilon$  é a permissividade,  $A$  é a área das placas do sensor,  $d$  é a distância entre as placas,  $\epsilon_0$  é a permissividade no espaço livre e  $\epsilon_r$  é a constante dielétrica do material do isolador entre as placas.

Quando comparado com componentes mecânicos, os sensores de toque apresentam a vantagem de terem maior tempo de vida por não possuírem partes móveis que se

deterioram ou quebram com maior facilidade. De acordo com Fischer (2010), com o advento da Internet das Coisas e novas tecnologias, os sensores de toque passaram a ser largamente utilizados, principalmente como elementos para controle e modulação de funcionalidades nos dispositivos, de modo a substituir as partes mecânicas presentes em teclados, botões, interruptores, entre outros.

#### 2.4.4 Multiplexador e demultiplexador

Um multiplexador é um circuito combinacional dedicado cuja função é selecionar, por meio de variáveis de seleção, uma de suas entradas, conectando-a eletronicamente ao seu único canal de saída. Com função inversa, um demultiplexador é, também, um circuito combinacional dedicado com a finalidade de selecionar, por meio de variáveis de seleção, qual das suas saídas receberá a informação presente em seu único canal de entrada (Lourenço et al., 1999).

Em um multiplexador, o número de canais de entrada é diretamente relacionado com o número de variáveis de seleção por meio da equação 2.4.

$$n = 2^m \quad (2.4)$$

Na qual  $n$  indica o número de canais de entrada e  $m$  o número de variáveis de seleção. Exemplificando, um multiplexador com duas variáveis de seleção pode ser operado eletronicamente de quatro maneiras diferentes e, assim, terá quatro canais de entrada. A mesma equação é válida para os demultiplexadores, no entanto, a variável  $n$  indica o número de canais de saída.

Estes circuitos podem operar em diferentes números de canais, sendo os mais comuns de dois, quatro, oito e dezesseis. São aplicados em diferentes áreas de circuitos digitais, como para serialização de informações de *bits* e implementação de expressões booleanas. É possível ainda associá-los em paralelo, a fim de obter a ampliação de canais simultâneos de entrada/saída, e também em série, a fim de ampliar a capacidade de canais de entrada/saída (Lourenço et al., 1999).

## 2.5 Métodos de avaliação de um sistema háptico de acessibilidade

A avaliação de um sistema é peça tão importante quanto a sua investigação, formulação e desenvolvimento. No caso de sistemas de acessibilidade, a avaliação com usuários reais é

um item fundamental para a análise da acessibilidade, da usabilidade e das experiências de uso da tecnologia desenvolvida.

Conforme será discutido na seção 2.6, os trabalhos recentes que tratam da representação acessível de imagens digitais para deficientes visuais abordam, em sua maioria, métodos de avaliação heurísticos, geralmente baseados na aplicação de questionários e/ou realização de entrevistas com usuários.

Tal abordagem é válida e, conforme os bons resultados obtidos com as tecnologias assistivas, surtem o efeito desejado. No entanto, este trabalho procura realizar também uma abordagem avaliativa numa perspectiva de métodos já existentes e bem definidos, de modo a adaptá-los (quando necessário) ao contexto de acessibilidade. Para alcançar esta perspectiva, propõem-se dois métodos de avaliação: de adequação de acessibilidade e de usabilidade.

O primeiro método baseia-se nas diretrizes existentes, como a WCAG (*Web Content Accessibility Guidelines*), e tem por objetivo avaliar se o sistema foi desenvolvido de maneira acessível. O segundo método procura verificar se o sistema desenvolvido possui todos os meios necessários para que seja usável pelo usuário.

As próximas subseções apresentam um panorama geral dos métodos de avaliação supracitados.

### 2.5.1 Diretrizes e avaliação de Acessibilidade

De acordo com Silva (2012), os desenvolvedores de tecnologias assistivas devem conhecer os recursos tecnológicos e as diretrizes de como elaborar ambientes acessíveis para que ocorra a inclusão digital. Não foram encontradas na literatura diretrizes de acessibilidade próprias para o desenvolvimento de *hardwares* que comportem-se como tecnologias assistivas, e, da mesma maneira, para sistemas hápticos.

Quando se trata de diretrizes de acessibilidade em meio digital, encontram-se diretrizes para o desenvolvimento de ferramentas *web*, sendo o maior expoente as diretrizes WCAG (já em sua segunda versão) da W3C (Caldwell et al., 2008) e eMAG (Modelo de Acessibilidade em Governo Eletrônico)(Brasil, 2014), que consistem numa série de recomendações para garantia de conteúdo acessível para as pessoas com deficiência.

No entanto, é possível aplicar tais recomendações de maneira adaptada, relacionando as necessidades de um DV em aplicações *web* com os sistemas hápticos, como as listadas a seguir.

- Diretrizes WCAG:

- *Diretriz 1.2 - Mídias com base em tempo*: fornecer alternativas para mídias baseadas em tempo, como por exemplo, a inserção de áudio-descrição;
  - *Diretriz 1.3 - Adaptável*: criar conteúdo que possa ser representado de diferentes maneiras sem perder informação ou estrutura;
  - *Diretriz 1.4 - Discernível*: facilitar a audição e a visualização de conteúdo aos usuários;
  - *Diretriz 2.4 - Navegável*: fornecer maneiras de ajudar os usuários a navegar, localizar conteúdos e determinar onde estão.
- Diretrizes eMAG:
    - *Recomendação 1.8*: dividir as áreas de informação;
    - *Recomendação 2.7*: assegurar o controle do usuário sobre as alterações temporais do conteúdo;
    - *Recomendação 3.3*: oferecer títulos descritivos e informativos;
    - *Recomendação 3.4*: informar o usuário sobre sua localização;
    - *Recomendação 4.3*: permitir redimensionamento sem perda de funcionalidade;
    - *Recomendação 5.3*: oferecer áudio-descrição.

Desenvolver sistemas seguindo as diretrizes de acessibilidade são um bom indicador de que ele será acessível para todas as categorias de usuário. Ademais, no intuito de garantir que as implementações contemplem as diretrizes, são disponibilizados *checklists* para avaliação estrutural e funcional das ferramentas.

As diretrizes WCAG fornecem, como apêndice em sua documentação, um *checklist*<sup>1</sup> para verificação do atendimento dos critérios estabelecidos. Já as diretrizes eMAG possuem um *checklist*<sup>2</sup> constituído de 27 itens de avaliação que abrangem as recomendações.

## 2.5.2 Heurísticas de usabilidade de Nielsen

Usabilidade pode ser definida como o estudo ou a aplicação de técnicas que proporcionem a facilidade de uso de um objeto (Brasil, 2015). As Heurísticas de Usabilidade de Nielsen (1994), embora elaboradas na década de 90, ainda são difundidas e utilizadas como métricas de avaliação da usabilidade de um sistema. São chamadas de “heurísticas” por serem consideradas regras gerais e não especificamente diretrizes de usabilidade. Elas estão listadas a seguir.

<sup>1</sup>Disponível em: <http://bit.do/wcagchecklist> - Acessado em 01/02/2019

<sup>2</sup>Disponível em <http://bit.do/emagchecklist> - Acessado em 01/02/2019

- Visibilidade do *status* do sistema: o usuário deve sempre ter um *feedback* adequado sobre o que está acontecendo no sistema, em um tempo hábil;
- Correspondência entre sistema e mundo real: o sistema deve possuir uma linguagem familiar ao usuário, fazendo com que as informações surjam de maneira lógica e natural;
- Controle do usuário e liberdade: o sistema deve prover meios de desfazer e refazer ações errôneas do usuário de maneira rápida;
- Consistência e padronização: o sistema deve ser conciso e padronizado no que tange à apresentação das informações, na linguagem utilizada e nas diferentes formas de interação;
- Prevenção de erros: o sistema deve realizar o máximo esforço para prevenir a ocorrência de um erro. No entanto, caso não seja possível evitá-lo, deve-se prover mensagens de erro da maneira mais clara e informativa possível;
- Reconhecer ao invés de memorizar: o sistema deve prover instruções de uso de maneira fácil e recuperável, de modo que o usuário, ao usar diferentes módulos, realize as ações pela familiaridade com a interface.
- Flexibilidade e eficiência de uso: o sistema deve ser customizável para diferentes perfis de usuários, desde os iniciantes até os mais experientes.
- *Design* minimalista: os componentes do sistema devem possuir apenas as informações necessárias para a interação. Deve-se primar pela máxima "menos é mais".
- Ajuda aos usuários para reconhecimento, diagnóstico e recuperação de erros: as mensagens de erro devem ser sempre expressas na linguagem natural do usuário (nunca por códigos técnicos), indicando precisamente o problema e fornecendo maneiras de solucioná-lo.
- Ajuda e documentação: O sistema deve possuir, quando necessário, um manual de ajuda para as interações, que possa ser obtido de maneira rápida e simples.

A garantia de que determinada tecnologia é condizente com os componentes de usabilidade é relativa as preferências e categorias de cada usuário, devendo-se respeitar e compreender as suas diferenças e seus aspectos individuais. Assim, as avaliações de usabilidade devem ser mais focadas no usuário do que nos métodos de desenvolvimento empregados (Nielsen, 2001).

Encontram-se, na literatura, trabalhos em diferentes áreas que realizam avaliações baseadas nas heurísticas de Nielsen (1994). Coomans e Lacerda (2015) propõem uma ferramenta educacional matemática e visam também destacar os critérios de desenvolvimento do *software*. Sim e Read (2016) elaboram um conjunto de heurísticas para avaliação de sistemas assistidos por computador, como por exemplo, sistemas cirúrgicos. Brown e Kim (2018) avaliam a usabilidade de aplicativos para auxílio no tratamento de Alzheimer com fim de criar diretrizes para desenvolvimento.

Embora não se encontrem trabalhos recentes que apliquem as heurísticas para avaliação de tecnologias assistivas, este trabalho visa utilizá-las para verificar a experiência de uso do usuário DV com o sistema háptico. Para tal, foi elaborado um questionário que contemple as regras gerais propostas por Nielsen.

## 2.6 Trabalhos Relacionados a sistemas hápticos no contexto de imagens digitais e deficientes visuais

A literatura apresenta um campo de pesquisas desenvolvidas relacionadas à acessibilidade para DV. Nos últimos anos, ao considerar sistemas hápticos e a descrição de imagens para DV, os trabalhos concentram-se em duas principais vertentes: o auxílio na localização em ambientes *indoor* e *outdoor*; e o auxílio no aprendizado, seja ele voltado à educação ou em atividades cotidianas/corporativas.

A Tabela - 2.2 lista oito trabalhos encontrados na literatura, em ordem cronológica, publicados nos últimos quatro anos, que têm objetivos fundamentados no auxílio a deficientes visuais. A tabela exhibe informações resumidas sobre os trabalhos, a saber: o tópico de interesse da pesquisa no contexto de acessibilidade; quais *softwares* e *hardwares* foram utilizados, bem como se esses são autorais ou de terceiros; quais os estímulos envolvidos no sistema apresentado pela pesquisa; o tipo de avaliação realizada; e o número de voluntários para os experimentos.

É importante relatar que ao se realizar a busca por trabalhos relacionados não foram encontrados um número relevante de pesquisas que utilizassem *displays* de pinos *refreshable*, considerando os últimos anos.

Dos oito trabalhos relacionados, três utilizam estes dispositivos. De todo modo, as demais pesquisas contribuem para um melhor entendimento das soluções possíveis de representação.

**Tabela 2.2:** Trabalhos relacionados, em ordem cronológica

<b>Trabalho</b>	<b>Tópico</b>	<b>Software</b>	<b>Hardware</b>	<b>Estímulos</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Voluntários</b>
Braier et al. (2015)	Aprendizado de gráficos e diagramas	3D chart modelling tool (autoral)	Mesas de madeira com tachas (autoral)	Táteis	Qualitativos de aplicabilidade e utilidade	17 DV
Kim e Yeh (2015)	Contextualização de livros infantis	OpenJSCAD (terceiros)	Figuras móveis 3D (autoral)	Táteis	Entrevistas de uso e aceitação	Especialistas, sendo 1 DV e 9 NDV
Bornschein et al. (2015)	Objetos gráficos táteis em ambiente colaborativo	Tangram Toolbar e Tangram Lector	BrailleDis 7200 (proprietário)	Táteis	Usabilidade	8 DV e 8 NDV
Buzzi et al. (2015)	Ensino de geometria	Autoral	Dispositivos móveis em geral	Táteis e auditivos	Usabilidade	1 DV
Silva et al. (2016)	Representação de informação visual	Autoral	Apple Ipad (proprietário)	Táteis e auditivos	Estudos empíricos de experiência de uso	20 NDV e 11 NDV
Zeng e Weber (2016)	Mobilidade e localização	TacYAH System (autoral)	BrailleDis (proprietário)	Táteis e auditivos	Experiência de uso	8 DV e 8 NDV
Swaminathan et al. (2016)	Informação espacial	Linespace app (autoral)	Linespace <i>display</i> (autoral)	Táteis, auditivos e de fala	Experimentos guiados de experiência de uso	6 DV
Pissaloux et al. (2017)	Mobilidade e localização	Tactile Gist System (autoral)	TactiPad (proprietário)	Táteis	Experimentos empíricos de mobilidade	5 DV e 15 NDV

Todos os trabalhos possuem, em seu escopo, o desenvolvimento e/ou utilização de sistemas hápticos compostos por *hardware* e *software*, provendo ao usuário representações alternativas de imagens, sejam elas digitais ou físicas. A seguir, os trabalhos são explanados de maneira a se conhecer as soluções propostas e como elas contribuem para esta pesquisa.

### 2.6.1 Trabalhos no contexto de mobilidade e localização

As pesquisas de Zeng e Weber (2016) e Pissaloux et al. (2017) exploram a acessibilidade voltada para a mobilidade e localização de deficientes visuais. Enquanto os primeiros autores tinham como objetivo introduzir um sistema de mapas do estilo YAH (*You-Are-Here*) com uma matriz de pinos *mobile*, os segundos autores desenvolveram um *framework* para melhor locomoção de DV e conhecimento do ambiente.

Zeng e Weber (2016) discutem que os mapas de localização acessíveis para DV, de maneira geral, focam-se na orientação auditiva de direções baseadas no interesse do usuário, por exemplo, "vire à direita em  $x$  metros". Assim, eles não provêm suporte à exploração do ambiente em que o usuário se encontra e nem à detalhes espaciais de edificações e ruas.

Considerando tais questões, foi desenvolvido o sistema TacYAH, munido com *feedback* auditivo de localização e uma matriz HyperBraille de 30 x 32 pinos, permitindo que o DV "sinta" o mapa. O sistema desenvolvido baseia-se em comandos emitidos pelo usuário para localização e utiliza um mapa conceitual de símbolos gerando dados para a representação tátil gerada na matriz de pinos e a informação por áudio de localização.

As avaliações foram conduzidas seguindo as diretrizes éticas de pesquisa educacional em dois ambientes ao ar livre para experimentação. Antes dos experimentos, houve um treinamento em laboratório com o sistema a fim de prover aos voluntários as habilidades básicas para seu uso. No experimento, cada voluntário foi submetido à realização de cinco tarefas empíricas nos ambientes.

Ao final, os voluntários responderam a um questionário com sete questões de cunho qualitativo para avaliar a experiência de uso. Foram avaliados outros aspectos do sistema utilizando variáveis do próprio experimento, como o tempo de exploração dos pontos de interesse e a distância de erro de localização dos voluntários.

Segundo os autores, os experimentos demonstraram que os usuários, ao utilizar a tecnologia, puderam se localizar e aprender sobre os arredores da localização independentemente da área ser familiar ou não. Além disso, foi possível notar que o mapa conceitual

de símbolos auxiliou os usuários a estimar distâncias e se localizarem espacialmente com relação aos pontos de interesse.

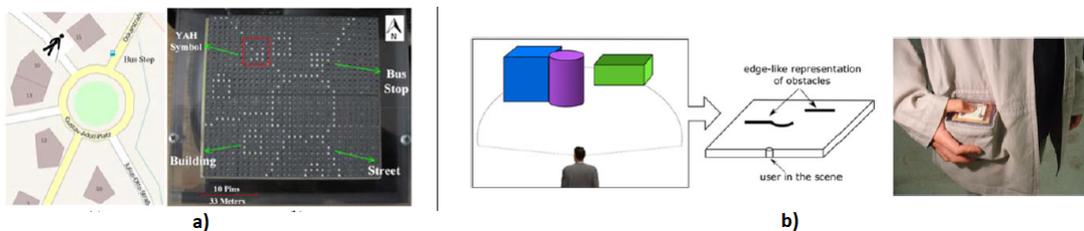
Já no trabalho de Pissaloux et al. (2017) foi desenvolvido o *framework* “Tactile Gist” visando investigar a locomoção cognitiva humana e a sua interação com tecnologias táteis. O *framework* engloba quatro elementos que, segundo os autores, são deficientes em outros modelos: mobilidade evitando obstáculos; orientação; percepção de espaço; e deslocamento físico em tempo real.

O sistema desenvolvido tem o seguinte protocolo de funcionamento: uma câmera capta o que seria a visão frontal do usuário; a imagem captada é então processada e convertida numa representação de saída tátil; um dispositivo tátil é então responsável pela interação com o usuário com o resultado do processamento da imagem captada. Neste trabalho foi utilizada a ferramenta tátil proprietária TactiPad, que consiste numa matriz de pinos 8 x 8. Nesse contexto, um pino levantado indica uma parte de um obstáculo.

Foram conduzidos três experimentos de mobilidade com um protocolo de execução empírico, no qual foi planejada uma sala com obstáculos. Foi realizado um treinamento pré-experimento para ambientação com o sistema. Os resultados dos experimentos foram obtidos baseados na observação e evolução dos voluntários e do sistema ao passo em que realizavam as tarefas.

De acordo com os autores, os resultados dos experimentos confirmaram a pertinência do *framework* como suporte para a mobilidade de DV, validando as hipóteses do trabalho. Dentre a indicação de trabalhos futuros, destacou-se a necessidade de identificar funções elementares de mobilidade e avaliá-las; o aprofundamento das variáveis envolvidas nos resultados; e a necessidade de uma matriz de pinos de maior resolução.

A Figura - 2.4 apresenta a concepção e representação tátil dos dois trabalhos. Na parte a) têm-se um mapa urbano e sua representação tátil do trabalho de Zeng e Weber (2016). Na parte b) têm-se a concepção egocêntrica dos obstáculos e a sua representação na matriz de pinos do trabalho de Pissaloux et al. (2017).

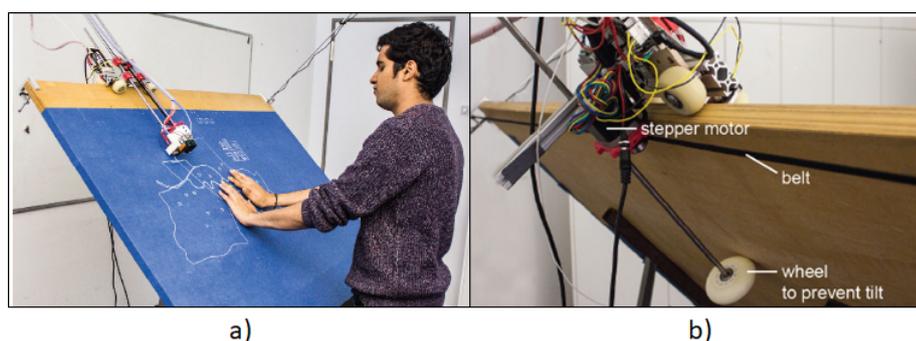


**Figura - 2.4:** Concepção e representação tátil dos trabalhos relacionados à mobilidade de DVs

Embora não esteja apenas relacionado à mobilidade, a pesquisa de Swaminathan et al. (2016) investiga e apresenta um sistema tátil para o aprendizado de informações do ambiente. O sistema baseia-se numa grande mesa, de 140 x 100 cm, que representa um *display*. Ao passo em que as informações devam surgir para o usuário, uma impressora 3D, com a parte mecânica adaptada, imprime linhas táteis na superfície da mesa.

Além da representação tátil impressa, o sistema permite também que o usuário interaja por voz, com comandos pré-determinados. O sistema procura utilizar o espaço da mesa de maneira compacta e zoneada, de modo a manter representações anteriores disponíveis a fim de contribuir para a memória espacial do usuário. Quanto o *display* está todo preenchido por conteúdo, um mecanismo “raspador” acoplado é responsável por remover as linhas impressas. Esta remoção pode também ser ativada pelo usuário via comando de voz.

A Figura - 2.5 apresenta o sistema desenvolvido por Swaminathan et al. (2016). Em a) é possível observar um DV utilizando a ferramenta e, em b), é exibida a parte traseira da mesa, detalhando-se parte do mecanismo que imprime as linhas táteis.



**Figura - 2.5:** Sistema háptico desenvolvido por Swaminathan et al. (2016)

Foram realizados experimentos guiados para avaliar o sistema desenvolvido. Inicialmente, foi realizado um treinamento da ferramenta com os voluntários. Foram então selecionadas algumas tarefas como experimentação da ferramenta. Após o uso, os voluntários foram submetidos à uma entrevista sobre o sistema e os princípios de *design* utilizados.

Os autores concluíram que a ferramenta atendeu aos objetivos para os quais foi planejada devido a boa avaliação dos voluntários. Eles salientam o baixo custo financeiro de desenvolvimento da plataforma, que foi de aproximadamente \$400,00, valor 200 vezes menor do que um dispositivo proprietário, como o HiperBraille. É destacada também uma característica do sistema a ser melhorada, que é o tempo despendido para desenhar os objetos na mesa de saída.

## 2.6.2 Trabalhos no contexto de auxílio na educação

Os trabalhos de Braier et al. (2015), Kim e Yeh (2015) e Buzzi et al. (2015) possuem um foco característico de auxílio na educação de DV. Os dois primeiros têm a particularidade do dispositivo tátil utilizado ser estático, produzido individualmente para cada objeto de aprendizado de interesse.

O objetivo da pesquisa de Braier et al. (2015) foi a inclusão de DV no processo de aprendizado de dados baseado em tabelas apresentados em formato visual de gráficos ou diagramas. Foi desenvolvida uma nova abordagem de representação háptica, denominada *relief charts*.

Nessa abordagem cada atributo dos diagramas e gráficos em questão são tratados com alturas diferenciadas, de modo a possibilitar ao DV a mesma compreensão que um SDV teria ao visualizá-lo com cores. Seis diferentes tipos de gráficos/diagramas são abordados, e, baseado neles, conceitua-se uma base de navegação própria para aprendizado nos gráficos, de acordo com as necessidades de um DV.

Foram conduzidos estudos qualitativos com o propósito de explorar sua aplicabilidade geral, analisar o alcance da abordagem na interpretação dos referidos dados e sua utilidade, e identificar as necessidades dos DV de modo a aperfeiçoar a abordagem. Para os experimentos, foram elaborados dez diferentes protótipos representando os gráficos e diagramas táteis. Para a base utilizaram-se mesas de madeira, e as informações eram representadas utilizando tachas em diferentes tamanhos. Os voluntários foram “recrutados” a partir do contato com uma organização regional de apoio à DVs.

Os experimentos consistiram na utilização dos dez protótipos, sem a realização de um treinamento prévio. Os voluntários foram submetidos à realização de duas tarefas a cada protótipo. Os dados coletados para análise consistiram nas observações empíricas dos avaliadores frente aos voluntários, sendo feita uma análise descritiva, posteriormente.

Os autores concluíram que DVs estavam aptos ao aprendizado de dados baseados em tabela utilizando a abordagem proposta, sendo o uso de maior relevância para estudantes, seja na educação básica ou na Universidade. Como trabalhos futuros, focou-se na necessidade de um maior número de DVs para melhor aporte das conclusões obtidas e que havia a necessidade de utilizar novos métodos para avaliação da abordagem, visto que a metodologia empregada apresentava, em sua maioria, dados descritivos, abrindo margem para a subjetividade das conclusões.

Kim e Yeh (2015) apresentaram um conjunto de modelos 3D imprimíveis projetados como blocos de construção para criação de figuras táteis móveis voltados para o aprendizado e interação de crianças DVs em livros infantis. Os modelos foram definidos baseado

na observação das figuras móveis para interação de um grupo de livros infantis, definindo assim primitivas de movimentação.

Para validação das primitivas e dos modelos, foram realizados estudos formativos de criação dos modelos e a elaboração de protótipos à base de madeira de algumas figuras. Estes protótipos foram apreciados por crianças DVs de pré-escolas. A avaliação dos protótipos foi realizada de maneira empírica, por meio de entrevista com as crianças ao passo em que elas utilizavam os protótipos.

Com uma boa aceitação por parte das crianças, os autores propuseram uma linguagem de marcação para criação dos modelos baseadas em XML e CSS de modo a facilitar seu uso por meio de impressões em impressoras 3D. Com a linguagem estabelecida, foram transcritos seis livros infantis, com suas respectivas figuras interativas impressas. Para avaliação, os livros foram apresentados para especialistas da área, que responderam à uma entrevista sobre a eficácia e aceitação dos modelos.

Os autores concluíram que os modelos de primitivas de movimentação quanto sua aplicação na transcrição dos livros, além da criação da linguagem de marcação, obtiveram resultados satisfatórios e devem ser divulgados e utilizados pela comunidade. Futuramente, esperava-se realizar experimentos de utilização dos livros transcritos com crianças DVs por meio de parcerias com entidades de apoio.

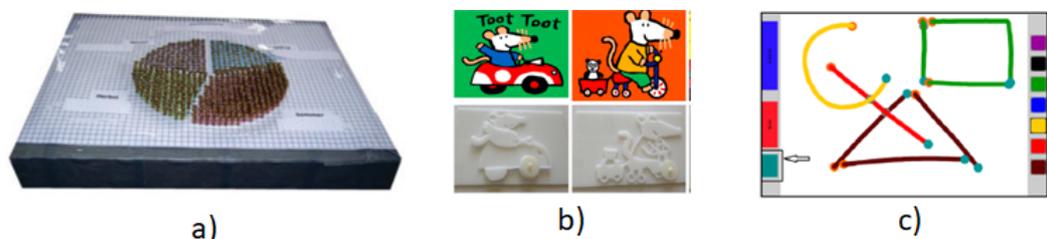
Com um sistema proposto diferente dos dois anteriores, Buzzi et al. (2015) investigaram meios para auxiliar DVs no aprendizado de geometria. Foi desenvolvido um aplicativo para dispositivos *mobile* no sistema operacional Android com o conceito “desenhe e sinta”, provendo ao usuário interações táteis e auditivas de acordo com o desenho presente na tela.

O aplicativo, totalmente desenvolvido baseado nas premissas de acessibilidade, possui duas principais funções: desenho livre e jogos para o aprendizado de formas geométricas. Todos os elementos visíveis em tela possuem *feedback* auditivo, provido por um sistema de conversão de texto em fala. Já para as formas geométricas e os desenhos criados, há uma interação tátil, de modo a fazer com que o usuário “sinta” a figura.

Foram realizadas avaliações de usabilidade tendo como voluntários um único DV. De acordo com as avaliações, o sistema apresentou algumas limitações, tanto da parte de desenvolvimento quanto da parte da tecnologia utilizada, como por exemplo, a falta de suporte para interação *multi-touch* e também uma certa dificuldade do voluntário para identificação de formas sem cantos, como círculos e elipses.

A Figura - 2.6 exhibe os sistemas hápticos elaborados nos três trabalhos supracitados. Na parte a) tem-se um dos protótipos *relief-chart* de Braier et al. (2015), na parte b) um fragmento de um dos livros transcritos por Kim e Yeh (2015), conjuntamente com seu

modelo 3D impresso, na parte c) é exibida uma captura de tela do aplicativo desenvolvido por Buzzi et al. (2015).



**Figura - 2.6:** Concepção e representação tátil dos trabalhos relacionados à educação de DVs

### 2.6.3 Trabalhos no contexto de ambientes corporativos e mapeamento de imagens digitais

Com um escopo voltado para ambiente corporativo, o trabalho de Bornschein et al. (2015) propõe o Tangram Workstation, que é um sistema colaborativo inclusivo para criação e transcrição de objetos gráficos táteis. Com o Tangram é possível a um DV revisar todo o processo de elaboração do trabalho envolvido, algo que não era possível até então, segundo os autores.

A criação dos elementos gráficos é realizada no formato vetorial apoiada pelas aplicações de desenho *open-source* Draw LibreOffice/OpenOffice. O gerenciamento do trabalho é realizado por um *software* do tipo *office suite*, denominado Tangram Toolbar. Para as interações realizadas com DVs, foi desenvolvido o Tangram Lector, que realiza uma “ponte” entre o Draw e um *display refreshable* tátil.

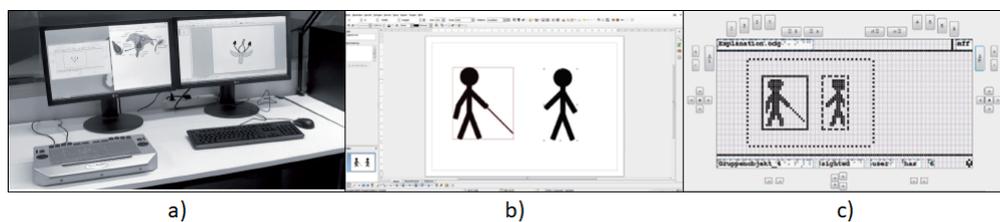
O *display refreshable* tátil utilizado foi o dispositivo proprietário BrailleDis 7200, de 120 x 60 pinos. A região de desenho do Draw é capturada e convertida para o formato do dispositivo de maneira binária, sendo que, pixels mais escuros que um determinado limiar são representados por pinos erguidos. Dependendo do elemento tocado, o usuário recebe um *feedback* auditivo de contextualização.

Para avaliação da usabilidade do Tangram Workstation foi conduzido um estudo de uso. Dos voluntários DVs participantes, quatro se consideravam especialistas na criação de elementos gráficos táteis. O experimento do estudo consistiu na transcrição de uma imagem digital para a representação tátil de maneira colaborativa. Após a tarefa, foi aplicado um questionário de uso e de satisfação da atividade.

Os resultados dos experimentos indicaram alguns problemas com relação à conversão da área do Draw para o BrailleDis, tornando-a algumas vezes disforme, devido à diferença

de resolução. Segundo os autores, uma das maneiras de suprimir o problema é adaptar as imagens de maneira a manter apenas as essenciais para sua interpretação. No restante, de acordo com os voluntários, o Tangram Workstation possuía as vantagens de individualizar as imagens táteis para cada leitor e a possibilidade de desenvolver as atividades de maneira colaborativa entre DVs e NDVs.

A Figura - 2.7 exibe o Tangram Workstation. Na parte a) tem-se um exemplo do ambiente corporativo, com os dispositivos de uso de DVs e NDVs. Em b) tem-se uma captura de tela do Draw com uma imagem sendo desenvolvida e, em c), é apresentada a representação fornecida para o DV no dispositivo tátil.



**Figura - 2.7:** Tangram Workstation, retirado de Bornschein et al. (2015)

Silva et al. (2016) propõem um sistema dinâmico interativo para transmitir informação visual por meio de áudio e toque para DVs. O sistema desenvolvido possui uma tela *touch* que permite ao usuário explorar pelo toque uma área bidimensional com objetos que compõem uma imagem, ouvindo seu *feedback* auditivo.

Nesse trabalho, conforme apresenta a Figura - 2.8, o sistema tem como premissa, a partir de uma imagem (esquerda), realizar a sua segmentação (centro) e, após, mapeá-la para um formato acústico-tátil (direita), com padrões de textura. No entanto, os autores enfatizam que as imagens utilizadas para mapeamento eram compostas por objetos com formas simples, não sendo o foco prover informações semânticas de imagens complexas, pois esta tarefa é de cunho muito abrangente, não sendo parte do escopo de pesquisa.



**Figura - 2.8:** Mapeamento de imagem digital para o formato acústico-tátil, extraído de Silva et al. (2016)

Como ferramenta tátil foi utilizado um dispositivo *mobile* proprietário, o Apple Ipad. Para avaliação do sistema, foram planejados diferentes testes empíricos de uso de modo

também a averiguar as melhores configurações para interação tátil e auditiva. Após um treinamento em cada configuração experimental, os voluntários deveriam identificar, na imagem, uma forma não conhecida.

Os autores concluíram, baseado nos experimentos realizados, que a informação auditiva conjuntamente com a representação tátil utilizando diferentes padrões forneciam boa capitulação das formas dos objetos da imagem, sendo uma tendência para representação de imagens para DVs, ao passo que os dispositivos táteis dinâmicos evoluíssem. Foram ainda apontados alguns problemas a serem sanados, como o alto tempo despendido para exploração tátil das figuras e também o fato do dispositivo tátil apresentar inconsistências quando tocava-se a tela com mais de um dedo.

#### 2.6.4 Considerações gerais

De modo geral, verifica-se que os trabalhos relacionados mostraram que os sistemas hápticos utilizados como tecnologias assistivas são uma solução satisfatória para representações alternativas de imagens. Nota-se que algumas pesquisas propõem um sistema com *hardware* dinâmico, como o de Pissaloux et al. (2017), e outros manufaturados, de cunho específico para os experimentos realizados, como o de Braier et al. (2015).

Das pesquisas que utilizaram *hardware* dinâmico, nota-se que alguns são proprietários, como matrizes de pinos BrailleDis e HyperBraille, o que torna a interação mais rápida e precisa, mas também demanda um sistema de alto investimento, do ponto de vista financeiro.

A escolha por desenvolver um *hardware* autoral pode tornar a solução mais barata, financeiramente, e também mais popular, conforme apontou Swaminathan et al. (2016), no entanto, alguns aspectos podem necessitar atenção especial e refinamentos, como o tempo despendido para representação das imagens nos dispositivos de saída.

Por fim, um outro aspecto a se notar são as estratégias adotadas para avaliação das soluções propostas. Todos os trabalhos realizaram avaliações empíricas, baseadas em suas próprias heurísticas. Não são referenciados nos trabalhos diretrizes ou até mesmo modelos que foram seguidos para experimentação e avaliação.

---

## Solução proposta: o modelo MannaHap

---

Este Tópico trata da solução proposta neste trabalho, sendo um modelo de sistema háptico assistivo para deficientes visuais, denominado MannaHap<sup>1</sup>. Inicialmente, são apresentados os conceitos e principais características do sistema, como o seu propósito, quais os elementos que o compõem e as tarefas hápticas envolvidas.

Na sequência, são explanados em detalhes cada um dos elementos do sistema, de modo a detalhá-los e aprofundar o seu entendimento. Para isso, são descritos os estados do sistema, os algoritmos e os modelos conceituais de *hardware* envolvidos em cada componente.

Neste tópico são tratados os aspectos teóricos e metodológicos do MannaHap. Espera-se que, com eles, seja possível desenvolver protótipos que apliquem os conceitos estabelecidos, por meio de *softwares* e *hardwares* que interajam com DVs, alcançando assim o objetivo desta pesquisa.

---

<sup>1</sup>A nomenclatura provém da combinação dos termos “Manna” - grupo de pesquisa de engenharia de computação invisível ao qual a pesquisa é vinculada - e “Háptico”, cerne do sistema.

## 3.1 Conceitos, características e componentes do MannaHap

O MannaHap é um sistema háptico proposto como uma solução DiY e de baixo custo financeiro para auxiliar as representações de imagens digitais para deficientes visuais, fornecendo representação tátil e auditiva.

Ele é parte integrante de uma pesquisa conjunta do grupo Manna que, além da representação de imagens digitais para deficientes visuais, busca também identificar automaticamente os objetos que compõem uma imagem digital, num contexto educacional, por meio do sistema MannAR.

O MannaHap é composto por quatro componentes principais, na qual ocorrem as interações e trocas de informações, a saber: usuário, dispositivo intermediário, servidor de processamento e dispositivo tátil. Eles são definidos a seguir.

- **Usuário:** é o componente que representa o DV, que busca obter as representações alternativas de imagens digitais. É considerado o centro de todo o sistema, sendo que as suas intenções afetam o comportamento e troca de informações dos demais componentes;
- **Dispositivo intermediário:** é o componente que representa o dispositivo de posse do usuário para seleção da imagem digital de interesse. Na prática, ele pode ser atribuído como um *notebook*, um computador de mesa, um *smartphone* ou outro dispositivo computacional que suporte uma aplicação para seleção da imagem e acompanhamento da situação do dispositivo tátil;
- **Servidor de processamento:** é o componente que abriga um *software* centralizado de gerenciamento das requisições de processamento de dados do dispositivo intermediário e do tátil;
- **Dispositivo tátil:** é o *hardware* que fornece ao usuário a representação tátil da imagem digital de interesse. É composto por uma matriz de pinos, cujo mecanismo de ativação é realizado por eixos tridimensionais de movimentação, controlado por um microcontrolador. Cada pino possui um sensor de toque que indica qual região é tocada, integrados em multiplexadores, que são lidos pelo microcontrolador.

É importante destacar que o dispositivo intermediário atua, como o próprio nome sugere, como um intermediador entre o dispositivo tátil e o usuário, habilitando o

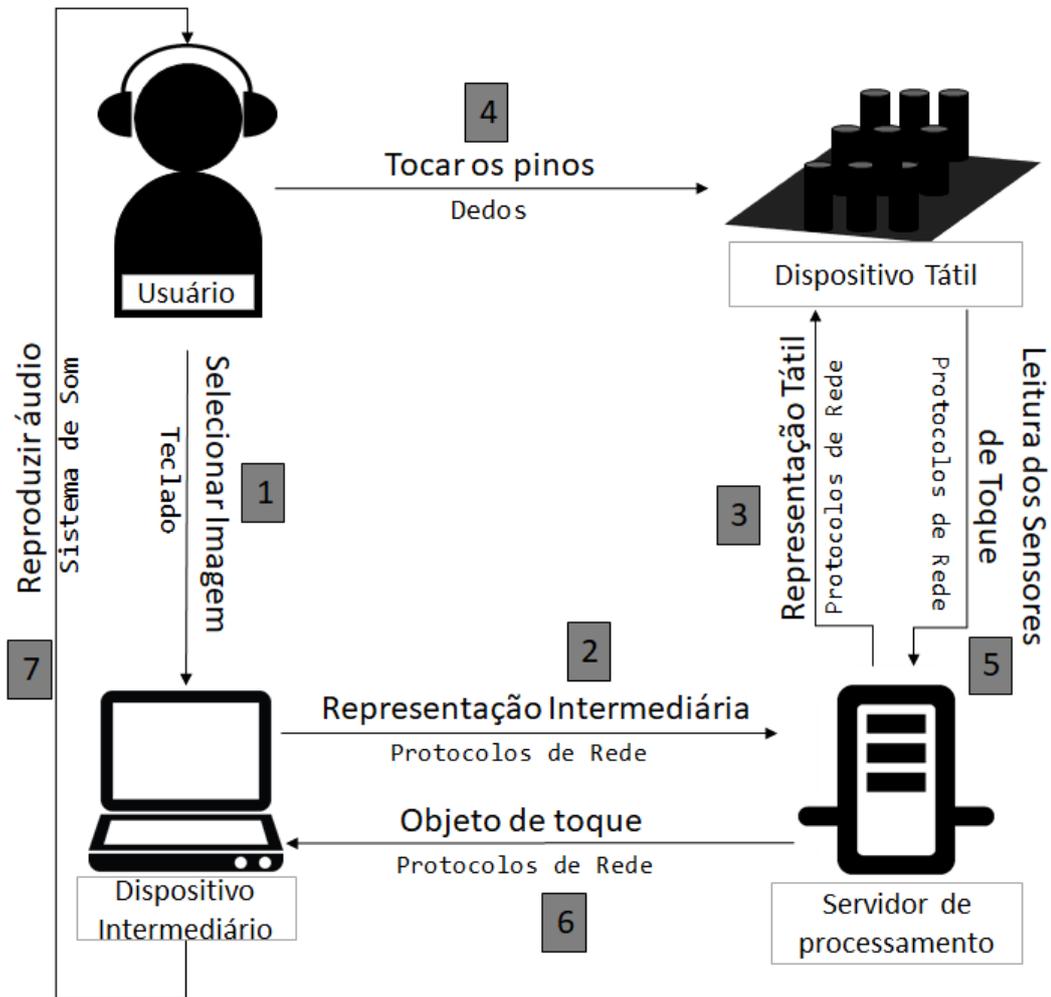
envolvimento de processos computacionais derivados de sistemas de terceiros, como é o caso do sistema MannAR, que não são abordados em detalhes neste trabalho.

Conforme apresentado na Seção 2.1, os sistemas hápticos devem ser capazes de tratar com precisão e eficiência as interações de percepção e controle de movimento por meio da definição de operações. Dessa maneira, à seguir são definidas tais operações, com exceção da operação de modificação, que não se aplica à esse sistema, devido a não haver a possibilidade do usuário alterar propriedades dos objetos da imagem.

- **detecção** : detectar o estímulo de toque entre usuário e dispositivo tátil por meio do sensor de toque do pino. Ao detectar, realizar a operação de discriminação;
- **discriminação**: O estímulo só deve ser considerado caso uma imagem digital já tenha sido selecionada via dispositivo intermediário, processada no servidor de processamento, e a sua representação já esteja concluída no dispositivo tátil;
- **identificação**: identificar se o toque do usuário foi realizado numa região com pinos elevados ou abaixados. Se foi numa região de pinos elevados, providenciar a representação da região tocada por meio das operações de escala da informação e seleção, caso contrário, não há nada a fazer;
- **escala da informação**: realizar um mapeamento da região de toque de acordo com o valor de capacitância obtido em cada um dos sensores;
- **deslocamento**: o usuário deve explorar a mesa de pinos movimentando a sua mão e tocando-a com os dedos. Não há limitação para a quantidade de dedos envolvidas na interação;
- **seleção**: baseada na operação de escala da informação, “rankear” qual objeto da imagem está sendo tocado e submeter tal informação para o servidor de processamento, a fim de processar o áudio referente ao objeto.

Em concordância com a definição dos elementos principais do sistema e das operações, a Figura - 3.1 apresenta o conceito geral do MannaHap, na qual são vistos os elementos e relacionamentos envolvidos, fundamentado na Figura - 2.1, apresentada na Seção 2.1.

Como primeira forma de relacionamento, o usuário demonstra a intenção de obter uma nova forma de representação para uma determinada imagem digital. Com esta intenção, ele utiliza seu dispositivo intermediário, selecionando uma imagem e submetendo-a no sistema.



**Figura - 3.1:** MannaHap: conceito geral

Ao selecionar a imagem, o dispositivo intermediário a processa, gerando uma representação intermediária, que é abordada na Seção 3.3. Esta representação é transmitida para o servidor de processamento via rede.

Após, o servidor de processamento a mapeia para sua representação tátil, que é transmitida para o dispositivo tátil, também via rede. Assim, por meio de seu microcontrolador, a imagem deve ser gerada, levantando os pinos que compõem os objetos da imagem. Ao fim da operação, com a representação concluída, uma mensagem de conclusão deve ser enviada via rede para o servidor de processamento, que a repassa para o dispositivo intermediário, que a exibe na tela de interação com o usuário.

Esta mensagem gera uma percepção no usuário de que a representação está concluída e que pode começar a interação com os pinos. Ao passo que ele realiza a interação, é quantificada a região de toque por meio da leitura dos sensores de toque, presentes em

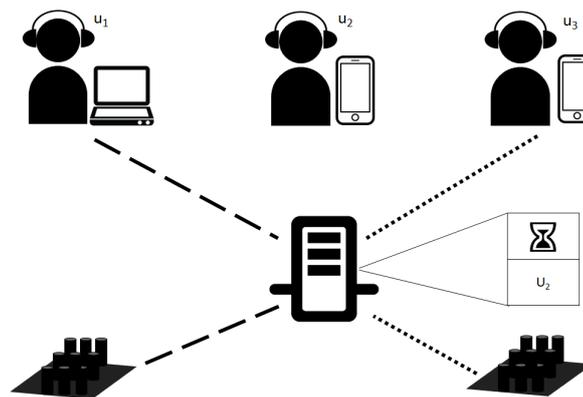
cada pino. Esta leitura é transmitida via rede para o servidor de processamento, que detecta o objeto da imagem que é tocado.

Com a detecção realizada, processa-se as suas informações. Após, elas são sintetizadas em um áudio, que é reproduzido para o usuário. Dessa maneira, há uma percepção secundária da imagem, permitindo um melhor entendimento dos objetos que a compõem.

O usuário pode submeter ao sistema háptico novas imagens para representação. Assim, todas as intenções, manipulações, detecções e percepções são realizadas novamente, de maneira sempre a atender às necessidades. Quando há a intenção de encerrar a utilização do sistema, o usuário informa via dispositivo intermediário, que enviará via rede uma mensagem para o servidor de processamento, o qual indicará, também via rede, que todos os pinos devem voltar à disposição inicial, abaixados.

Uma outra importante premissa do MannaHap é que a sua utilização se dê em larga escala em instituições de ensino e em entidades de atendimento especial aos DVs. Espera-se que tais organizações tenham o maior número possível de dispositivos táteis disponíveis para atendimento.

Todavia, não há garantias que o número de dispositivos sempre será suficiente para atendimento de todos os DVs de maneira concorrente. Assim, a arquitetura proposta para o MannaHap, exibida na Figura - 3.2, provê que o servidor de processamento gerencie de maneira centralizada a quantidade de usuários que têm a intenção de utilizar o sistema comparado ao número de dispositivos táteis disponíveis.



**Figura - 3.2:** MannaHap: arquitetura

Na figura, é possível observar que três usuários -  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$  - munidos com diferentes dispositivos intermediários - um *notebook* e dois *smartphones* - anseiam em utilizar o sistema para uma representação tátil e auditiva de uma imagem digital. No entanto, há apenas dois dispositivos táteis no ambiente em questão. Dessa maneira, o servidor

de processamento habilita dois usuários a utilizarem o sistema, enquanto o outro - nesse caso,  $u_2$  - deve aguardar até um dos dispositivos estar liberado para uso.

As próximas seções apresentam com mais detalhes cada um dos elementos do sistema, sendo possível compreender as características do usuário e do dispositivo intermediário, a representação intermediária de imagem digital proposta, as tarefas que compreendem o servidor de processamento, e a elaboração do dispositivo tátil.

## 3.2 Definições do componente “usuário”

O MannaHap é um sistema projetado para usuários cuja capacidade visual para interpretação de imagens digitais é inexistente, ou então, muito baixa. A seguir, listam-se as características esperadas de um usuário em potencial do sistema:

- **deficiência visual:** seguindo a classificação ICD-9-CM da National Center for Health Statistics (2009), apresentada na Seção 2.2, os usuários de interesse do sistema são aqueles que adequam-se nas três classificações de acuidade visual mais severas: baixa visão profunda, próximo à cegueira ou cegueira total;
- **faixa etária:** não há restrições para a idade do usuário, desde que o mesmo possua uma cognição adequadamente estabelecida para compreensão do que é uma imagem;
- **experiência:** o usuário deve possuir contato prévio com tecnologias assistivas consideradas básicas para atividades do dia a dia na utilização de computadores, como por exemplo, *softwares* leitores de tela. Não é necessário que o usuário já tenha experiência com outros dispositivos táteis, como o *display* proprietário BrailleDis.

No escopo tratado neste trabalho, o MannaHap tem por intuito o auxílio específico aos DVs. Assim, indivíduos que possuam outros tipos de deficiência, além da visual, podem ter um aproveitamento não adequado na utilização do sistema.

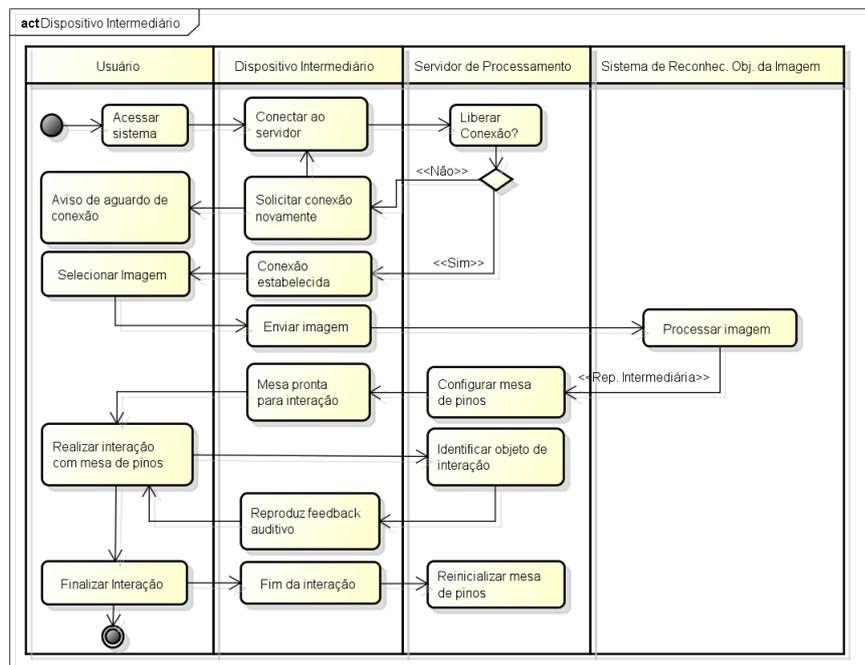
Os seguintes casos de DVs podem ser apontados como fora do escopo tratado: com deficiência auditiva; com deficiência motora nos membros superiores; e com deficiência mental, que afete os seus estímulos cognitivos. Para os citados, devem ser concentrados esforços para estudo e aplicação de acessibilidade em trabalhos futuros.

### 3.3 Definições do componente “dispositivo intermediário”

O meio primário de interação do usuário no MannaHap ocorre por meio de um dispositivo intermediário. Ele pode ser representado por qualquer dispositivo computacional de posse do *usuário* - *smartphones*, *tablets*, *notebooks*, computadores de mesa - desde que suporte o *software* que realiza as tarefas de interação deste componente, além de possuir saída de áudio.

De modo geral, este componente contém os módulos de seleção de imagem e de interação auditiva. A Figura - 3.3 apresenta o diagrama de atividades centrado no dispositivo intermediário. É importante dizer que estas atividades compõem apenas parte de todas as propostas no MannaHap, focando-se naquelas em que o componente atua. As demais atividades são apresentadas nas próximas seções.

Na figura são vistos outros componentes, como o usuário e o servidor de processamento, que atuam como emissores e/ou receptores das atividades do dispositivo intermediário.



**Figura - 3.3:** Diagrama de atividades centrado no dispositivo intermediário

Conforme exibe a figura, inicialmente o usuário acessa o sistema usando seu dispositivo intermediário. É solicitado ao servidor de processamento a liberação da conexão. Caso

não haja um dispositivo tátil operável e disponível, retorna-se um aviso de aguardo de conexão.

Periodicamente, o dispositivo intermediário deve solicitar nova conexão. A partir do momento que houver um disponível, a conexão é estabelecida e o usuário pode selecionar uma imagem.

Após, o usuário deve selecionar uma imagem digital para representação háptica. A imagem selecionada deve ser enviada a um sistema para reconhecimento de objetos da imagem, externo ao MannaHap.

Este sistema de reconhecimento é visto como uma “caixa preta”, na qual não compete ao MannaHap designar seu escopo de reconhecimento e métodos para tal. É importante explicar que o reconhecimento de componentes - denominados objetos no âmbito de processamento de imagens - é uma vasta área de pesquisa da Ciência da Computação e, portanto, o desenvolvimento de um próprio para o MannaHap não se adequaria ao tempo e ao cronograma deste trabalho.

Não obstante, visualizar o sistema de reconhecimento de objetos de imagem como um módulo externo ao MannaHap contribui para a abordagem DiY da solução proposta. Suponha, por exemplo, um pesquisador *A* que investiga uma solução de reconhecimento de expressões faciais em imagens digitais.

O sistema desenvolvido por *A* poderia ser integrado ao MannaHap num contexto de acessibilidade, provendo a um DV a expressão facial envolvida na imagem e, além disso, o mesmo poderia “tocar” esta expressão. A mesma ideia pode ser aplicada à um pesquisador *B*, que investiga o reconhecimento de autômatos da área de Teoria da Computação, como é o caso do MannAR.

Voltando à descrição do diagrama de atividades, é gerada uma representação intermediária da imagem digital, que é enviada para o servidor de processamento. As características desta representação são abordadas na Seção 3.4. Desse modo, o servidor prepara a mesa de pinos para interação, emitindo uma mensagem ao dispositivo intermediário quando estiver pronta.

Assim, o usuário passa a interagir com a mesa. Conforme a interação ocorre, o servidor de processamento mensura qual componente é tocado e envia um áudio para *feedback* auditivo ao dispositivo intermediário, contextualizando a imagem. O sistema permanece nesse ciclo até que o *usuário* demonstre a intenção de finalizar a interação, na qual uma mensagem é enviada para o servidor por meio do dispositivo intermediário.

A nível de *software*, os processos supracitados podem ser expressidos por uma aplicação *web*, que atenda as recomendações de acessibilidade descritas na subseção 2.5.1. Assim,

o usuário deve utilizar o seu dispositivo intermediário, acessar a aplicação e, com o apoio das tecnologias assistivas tradicionais para navegação, iniciar as interações no MannaHap.

### 3.4 Representação intermediária da imagem digital

A representação intermediária tem como objetivo padronizar as informações extraídas de uma imagem digital de entrada, de modo a sintetizar os dados necessários para a sua representação tátil e auditiva. Esta representação é independente dos métodos de reconhecimento de objetos da imagem, contribuindo assim para que diferentes pesquisas possam ser integradas ao MannaHap.

Para se estabelecer esta representação, é necessário primeiramente compreender as características de uma imagem digital que são independentes do tipo de reconhecimento realizado e, além disso, são necessárias no meio háptico. As características são listadas a seguir:

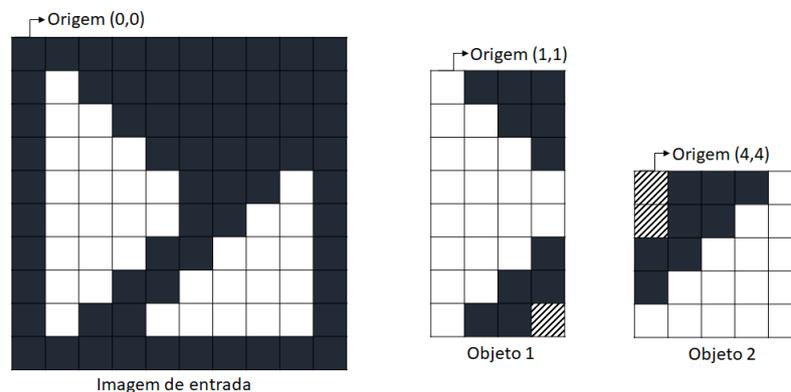
- **linhas:** representada por um valor numérico inteiro positivo, indica a dimensão em relação ao número de linhas da imagem original de entrada;
- **colunas:** representada por um valor numérico inteiro positivo, indica a dimensão em relação ao número de colunas da imagem original de entrada;
- **objetos:** representada por um vetor, compreende os objetos identificados na imagem digital de entrada. Cada objeto possui uma lista com características distintas, a saber:
  - **ID:** representado por um valor numérico inteiro positivo maior que 0, é um rótulo que identifica o objeto no contexto do MannaHap. Cada objeto deve possuir um ID único;
  - **coordenada de origem:** representada por um par ordenado numérico inteiro positivo  $(n_l, n_c)$ , no qual  $n_l$  indica a coordenada referente à linha e  $n_c$  indica a coordenada referente à coluna. Tem-se como restrição que  $n_l \leq linhas$  e  $n_c \leq colunas$ ;
  - **matriz de pixels:** representada por uma matriz de valores numéricos inteiros positivos, indica a valoração dos pixels da região do objeto identificado. A matriz deve possuir dimensões  $m \times n$ , na qual  $m \leq linhas$  e  $n \leq colunas$ . Recomenda-se que a matriz represente a região mínima que abranja distintamente um objeto. Os valores da matriz variam de acordo com a escala de níveis

de cinza da imagem representada, sendo que elementos da matriz com valor 0 indicam que o pino correspondente no dispositivo háptico deve permanecer abaixado.

- **descrição:** representada por um texto, provê uma contextualização do objeto para o qual será gerado um áudio para o *usuario*.

Faz-se notar que os valores armazenados em cada elemento da matriz de pixels é unidimensional. Isso acomete aos sistemas de reconhecimento que os objetos identificados devem ser tratados, ao se gerar a representação intermediária, em níveis de cinza. Outro aspecto a ser discutido é que a matriz de pixels de objetos diferentes, por ser uma estrutura trivialmente com dimensões retangulares/quadradas, podem apresentar valores diferentes para um mesmo pixel da imagem de entrada.

A Figura - 3.4 apresenta um exemplo do aspecto supracitado. Nela, há uma imagem digital de  $10 \times 10$  pixels, que, de modo a facilitar a visualização, está ampliada, sendo que cada quadrado demarcado representa 1 pixel. Esta imagem possui dois objetos, a saber: um triângulo isósceles e um triângulo retângulo.



**Figura - 3.4:** Imagem digital de entrada e objetos reconhecidos

Estes objetos aparecem destacados na parte direita da Figura - 3.4 com a segmentação mínima de pixels que contempla cada um dos objetos. Pode-se notar que na região do Objeto 1 há um pixel cuja valoração é referente ao Objeto 2 (pixel demarcado com listras pretas), o mesmo ocorre no Objeto 2.

Nestes casos, recomenda-se que na descrição da matriz de pixels de cada objeto, os pixels cujos valores são relativos a outros objetos sejam representados pelo valor 0, como se não houvesse uma parte de objeto naquela região. Omitir/modificar o valor destes pixels não acarretará em perdas na representação tátil da figura, pois o *servidor*

*central* realizará o reagrupamento e mapeamento dos pixels de cada objeto a partir da representação intermediária, conforme é explicado na Seção 3.5.

A nível de *software*, expressa-se a representação intermediária por meio da linguagem JSON (*JavaScript Object Notation*)<sup>2</sup>, que é um formato de texto para troca de dados totalmente independente de linguagens de programação e fundamentalmente composto por pares atributo-valor. No Apêndice A.1 é apresentada uma possível representação intermediária em formato JSON da imagem de exemplo da Figura - 3.4, contemplando todas as características discutidas nesta seção.

### 3.5 Definições do componente “servidor de processamento”

Realizando uma analogia com o corpo humano, pode-se afirmar que o servidor de processamento é o “cérebro” do MannaHap. Este componente é o responsável por centralizar e gerenciar as principais requisições provindas das intenções apresentadas pelo usuário por meio do dispositivo intermediário e também das interações com o dispositivo tátil. É também de responsabilidade do servidor manter o estado operacional do sistema, incluindo informações desde a disponibilidade do dispositivo até o mapeamento dos pinos. Para tal, ele deve possuir estruturas para armazenamento de alguns dados necessários, que são listados à seguir.

- **lista de dispositivos táteis:** representada por uma estrutura de lista, deve armazenar uma identificação de todos os dispositivos táteis presentes no ambiente do MannaHap, bem como se o dispositivo está disponível, sendo utilizado ou fora de uso por algum problema externo;
- **imagem nas dimensões da mesa de pinos:** representada por uma matriz de dimensões  $l \times c$ , sendo  $l$  o número de linhas presentes na matriz de pinos e  $c$  o número de colunas, deve armazenar a representação da imagem de entrada em tais dimensões, sendo que o valor de cada elemento da matriz representa a escala de subida do pino correspondente;
- **matriz de estado dos pinos:** representada também por uma matriz de dimensões  $l \times c$ , armazena em cada elemento o estado atual do pino correspondente, indicando a escala em que o mesmo se encontra erguido. Elementos com valor 0 indicam que o pino está abaixado;

---

<sup>2</sup>Página oficial: <https://www.json.org/> - Acessada em 01 de Dezembro de 2018

- **matriz de valoração dos sensores *touch***: representada também por uma matriz de dimensões  $l \times c$ , armazena em cada elemento o valor de capacitância obtido no sensor *touch* do pino correspondente;
- **objeto atual de interação**: representado por um valor numérico, armazena, à partir do início de interação do *usuário* com o *dispositivo tátil*, qual o objeto da imagem que o *usuário* está tocando;
- **áudio contextual**: representado por um arquivo em formato de áudio, armazena a representação em áudio do objeto da imagem tocado, que deve ser transmitido para o *dispositivo intermediário*.

A Figura - 3.5 exibe o diagrama de atividades centrado no servidor de processamento. Como apresentado nas características do MannaHap, na seção 3.1, diferentes *usuários* podem acessar o sistema, fazendo com que o esquema de estados apresentado ocorra concorrentemente.

As atividades iniciais são as mesmas apresentadas no diagrama centrado no dispositivo intermediário, na qual há a tentativa de conexão com o servidor. Com a conexão estabelecida e, após ser enviada a representação intermediária pelo sistema de reconhecimento de objetos, é realizado o mapeamento para uma representação tátil, que é especificado pelo Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1** Mapeamento da representação intermediária para a tátil

---

**Require:**  $ri$  {representação intermediária}

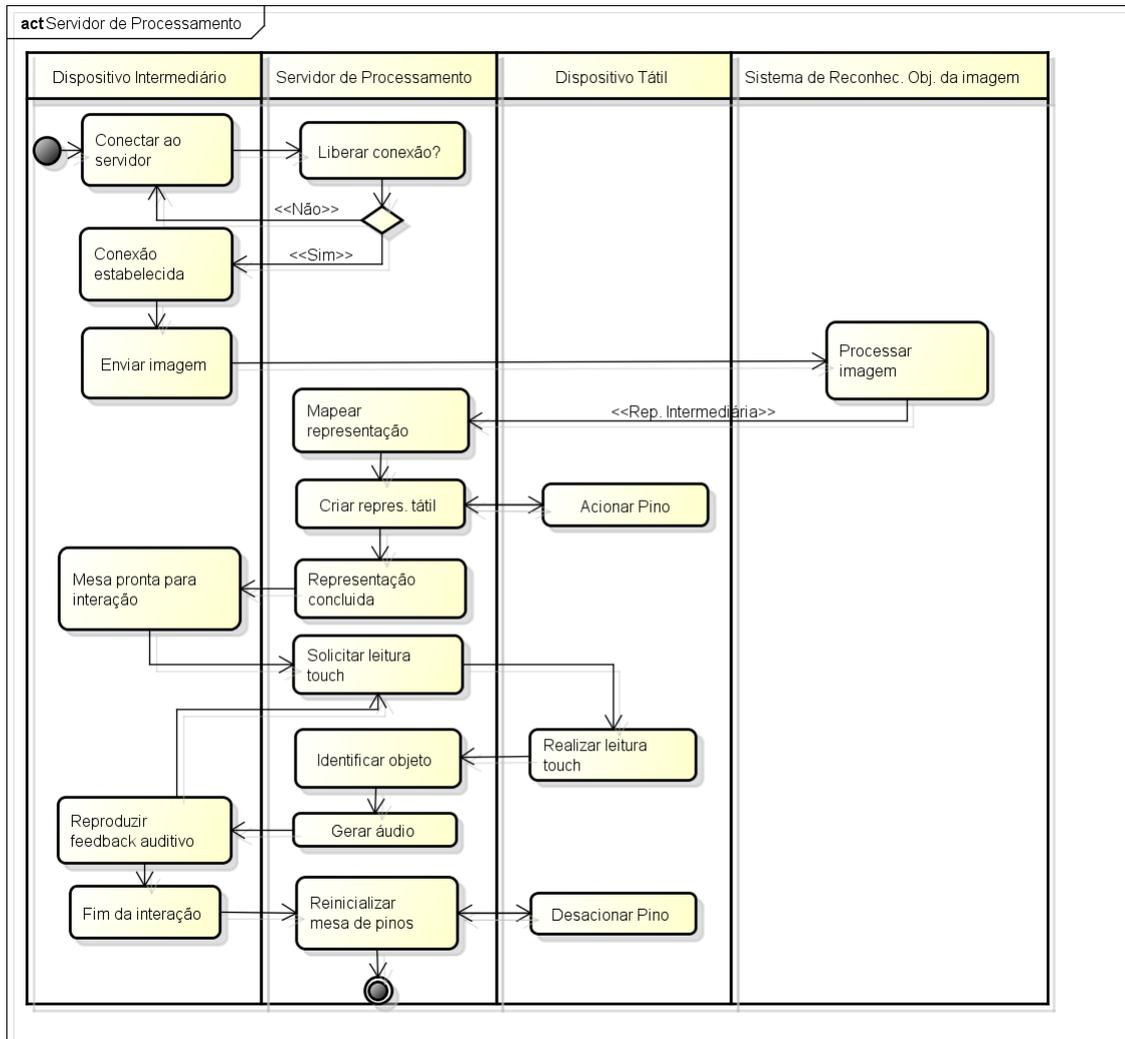
**Ensure:**  $rt$  {representação tátil}

```

1:  $img\_tmp \leftarrow$  imagem com dimensões  $ri.linhas \times ri.colunas$ 
2: for all  $obj \in ri.objetos$  do
3:    $l\_pm \leftarrow$  número de linhas de  $obj.pixMatrix - 1$ 
4:    $c\_pm \leftarrow$  número de colunas de  $obj.pixMatrix - 1$ 
5:   for  $l \leftarrow 0$  to  $l\_pm$  do
6:     for  $c \leftarrow 0$  to  $c\_pm$  do
7:        $l\_tmp \leftarrow obj.origemCord[0] + l$ 
8:        $c\_tmp \leftarrow obj.origemCord[1] + c$ 
9:        $img\_tmp[l\_tmp, c\_tmp] \leftarrow img\_tmp[l\_tmp, c\_tmp] + obj.pixMatrix[l, c]$ 
10:    end for
11:  end for
12: end for
13:  $l\_tatil \leftarrow$  número de linhas da mesa de pinos tátil
14:  $c\_tatil \leftarrow$  número de colunas da mesa de pinos tátil
15:  $rt \leftarrow transform(img\_tmp, l\_tatil, c\_tatil)$ 

```

---



**Figura - 3.5:** Diagrama de atividades centrado no servidor de processamento

Como entrada, o algoritmo requer a representação intermediária. Como saída, fornece a representação tátil da imagem de entrada. Inicialmente, é criada uma imagem temporária com as dimensões da imagem original de entrada, obtida pelos atributos *linhas* e *colunas* da representação intermediária (linha 1). Esta imagem temporária armazenará a composição da imagem original em níveis de cinza baseada nos objetos identificados.

Da linha 2 à linha 12 é realizada a composição da imagem temporária. Para cada objeto especificado na representação intermediária (linha 2), percorre-se cada um dos elementos da matriz de pixels (laços das linhas 5 e 6) e soma-se seu valor no elemento correspondente da imagem temporária (linha 9). Nas linhas 7 e 8 é feito o cálculo das coordenadas da imagem temporária relativo à coordenada de origem do objeto.

É válido ressaltar que é realizada uma soma do valor do elemento, e não uma atribuição direta, devido aos casos como o apresentado na Figura - 3.4, na qual o pixel correspondente a um objeto pode fazer parte da região de reconhecimento de outro. Após a composição, é realizada uma transformação de escala na imagem (linha 15), baseada nas dimensões da mesa de pinos tátil (linhas 13 e 14), resultando numa imagem cujos valores dos pixels representam a escala dos pinos na mesa.

Com o mapeamento realizado, o servidor inicia a criação da representação tátil na mesa de pinos. Para isso, devem ser realizadas diretivas de troca de mensagens baseada em comunicação síncrona, conforme apresenta o Algoritmo 2.

---

**Algoritmo 2** Diretivas de acionamento dos pinos

---

**Require:**  $rt$  {representação tátil}

**Ensure:**  $mep$  {matriz de estados dos pinos}

```

1:  $mep \leftarrow$  matriz inicializada com valor 0, com as mesmas dimensões de  $rt$ 
2:  $l\_rt \leftarrow$  total de linhas de  $rt - 1$ 
3:  $c\_rt \leftarrow$  total de colunas de  $rt - 1$ 
4: inicializa_transmissao()
5: for  $l \leftarrow 0$  to  $l\_rt$  do
6:   for  $c \leftarrow 0$  to  $c\_rt$  do
7:     if  $rt[l][c] \neq 0$  then
8:       levanta_pino( $l, c, rt[l][c]$ )
9:        $mep[l][c] \leftarrow rt[l][c]$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for
13: encerra_transmissao()

```

---

Como entrada, é solicitada a matriz de representação tátil gerada pelo Algoritmo 1. Como saída, é fornecida a matriz de estados dos pinos. Inicialmente, inicializa-se a matriz de estados com valor 0, indicando todos os pinos abaixados (linha 1). Após, o servidor envia ao microcontrolador do *dispositivo tátil* uma mensagem de inicialização da transmissão (linha 4) e deve aguardar por uma confirmação para prosseguir com o acionamento dos pinos.

Com a confirmação, percorrem-se todos os elementos da matriz de representação tátil (linhas 5 à 12) e, para os elementos cujo pino deve ser levantado (linha 7), é enviada a diretiva para levantá-lo (linha 8). Aguarda-se uma resposta do dispositivo tátil, confirmando que o pino foi levantado e, então, a matriz de estados é atualizada com a escala do pino (linha 9). Ao fim, encerra-se a transmissão (linha 13).

Com a operação realizada, envia-se uma mensagem ao dispositivo intermediário de que a mesa de pinos está operável, habilitando a interação por toque do usuário. O servidor aguarda a interação por toque. Neste aguardo, é necessário solicitar a leitura dos sensores *touch* e, baseado em seus valores, detectar o objeto de toque. Com o objeto detectado, deve-se gerar o áudio de contextualização. O Algoritmo 3 apresenta em detalhes os processos envolvidos.

---

**Algoritmo 3** Detecção de objeto tocado pelo usuário e geração de áudio

---

**Require:** *ri* {Representação intermediária}

**Ensure:** *audio*

```

1: obj ← 0
2: while not fim_interacao() do
3:   sensores ← ler_sensores()
4:   obj_tmp ← detecta_objeto(sensores, ri)
5:   if obj_tmp ≠ obj then
6:     obj ← obj_tmp
7:     audio ← gera_audio(obj, ri)
8:     envia_audio(audio)
9:   end if
10:  temporizador()
11: end while

```

---

Como entrada, deve ser informada a representação intermediária. Como saída, tem-se um arquivo de áudio relacionado ao objeto detectado. Inicializa-se o objeto de detecção com ID 0, não representando nenhum objeto (linha 1). O algoritmo então entra num laço, que permanece até o usuário demonstrar a intenção de fim de interação, via dispositivo intermediário (linhas 2 à 11).

Dentro do laço, solicita-se ao dispositivo tátil a leitura dos sensores, que é armazenado numa matriz com as dimensões da mesa de pinos, e, dessa maneira, cada elemento possui o valor de capacitância correspondente ao pino (linha 3). O servidor realiza a detecção do objeto baseado na matriz de sensores e na representação intermediária, alocando-o numa variável temporária (linha 4). Caso esse objeto detectado seja diferente do último detectado (linha 5), há a indicação de que o usuário interagiu com outro objeto da imagem.

Assim, o novo objeto deve ser armazenado (linha 6), um áudio deve ser gerado baseado no ID do objeto em questão e da sua descrição textual presente na representação intermediária (linha 7). Por fim, o áudio deve ser enviado para o dispositivo intermediário (linha 8). Aguarda-se um tempo pré-determinado para verificar novamente se o usuário finalizou sua interação (linha 10).

O Algoritmo 4 apresenta mais detalhes da função de detecção de objeto. A ideia principal do algoritmo é agrupar, por meio da soma, a capacitância total obtida nos pinos para cada objeto. A partir desta soma, deve-se verificar qual objeto possui a maior soma, sendo este o objeto identificado.

---

**Algoritmo 4** Função de detecção de objeto

---

**Require:**  $sensores, ri$

**Ensure:**  $obj\_ident$

```

1:  $soma\_capac \leftarrow$  vetor inicializado em 0 com dimensão igual ao número de  $ri.objetos$ 
2:  $l \leftarrow$  total de linhas de  $sensores - 1$ 
3:  $c \leftarrow$  total de colunas de  $sensores - 1$ 
4: for  $l \leftarrow 0$  to  $l_s en$  do
5:   for  $c \leftarrow 0$  to  $c_s en$  do
6:      $obj\_sensor \leftarrow$  resgata_obj( $l, c, ri$ )
7:      $soma\_capac[obj\_sensor] \leftarrow soma\_capac[obj\_sensor] + sensores[l][c]$ 
8:   end for
9: end for
10:  $obj\_ident \leftarrow 0$ 
11: for  $i \leftarrow 1$  to dimensão de  $soma\_capac - 1$  do
12:   if  $soma\_capac[obj\_ident] \leq soma\_capac[i]$  then
13:      $obj\_ident \leftarrow i$ 
14:   end if
15: end for
16:  $obj\_ident \leftarrow obj\_ident + 1$ 

```

---

O algoritmo tem como entrada a matriz da leitura dos sensores e a representação intermediária, provendo como saída o ID do objeto identificado. Inicialmente, é inicializado o vetor que armazenará a soma dos valores de capacitância dos sensores (linha 1). Após, percorrem-se todos os elementos da matriz de capacitância (linhas 4 à 9). No laço, resgata-se a qual objeto o sensor correspondente pertence (linha 6) e então, soma-se no vetor o valor de capacitância do sensor, considerando o índice relacionado ao objeto resgatado (linha 7).

Realizada a soma, passa-se à etapa de detecção do maior valor. Inicializa-se o objeto identificado com o índice do primeiro objeto (linha 10) e então, é realizada uma verificação em cada elemento do vetor das capacitâncias (linhas 11 à 15). Caso o valor da capacitância referente ao objeto identificado atual seja menor do que o objeto em verificação, altera-se o índice do objeto. Por fim, soma-se uma unidade no objeto identificado a fim de corrigir as questões de índice, já que na representação intermediária os objetos devem sempre começar com ID 1.

Voltando à descrição do diagrama de atividades, permanece-se no ciclo de interação entre usuário e mesa, leitura dos sensores e identificação de objetos até que o usuário demonstre a intenção de finalizar a interação. Quando isso ocorre, o dispositivo intermediário emite uma mensagem, fazendo com que o servidor reinicialize a configuração da mesa de pinos.

O algoritmo para reinicialização da mesa de pinos é semelhante ao Algoritmo 2, no entanto, com as seguintes modificações: é requerida apenas a matriz de estados dos pinos como entrada, que não é inicializada. Consequentemente, na linha 7 verifica-se se o elemento da matriz de estados de pinos (e não mais da representação intermediária) é diferente de 0. Caso seja, indica que o pino está levantado, e então, ele deve ser abaixado por meio de uma função a ser especificada na linha 8. O elemento da matriz deve então receber o valor 0 (linha 9).

A nível de *software*, o servidor de processamento deve ser desenvolvido numa linguagem de programação que implemente os protocolos de rede tradicionais para uma comunicação no formato cliente × servidor, de maneira a atender as solicitações dos dispositivos intermediários e realizar a conexão com os dispositivos táteis.

Para os mapeamentos que envolvam as imagens digitais, recomenda-se a utilização de bibliotecas próprias que facilitem sua manipulação, como é o caso da OpenCV<sup>3</sup> (*Open Source Computer Vision Library*), uma biblioteca de processamento digital de imagens que preza pela eficiência computacional e processamento em tempo real.

### 3.6 Definições do componente “dispositivo tátil”

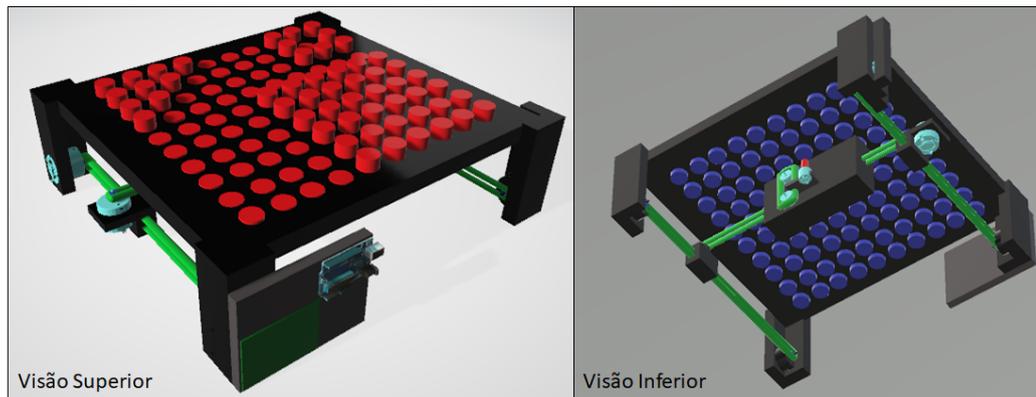
O dispositivo tátil é a concepção final da representação proposta pelo MannaHap. Por meio dele, o usuário poderá “sentir” a imagem digital, e, baseado no toque de interação, receber uma contextualização via áudio do componente da imagem no qual está tocando. A Figura - 3.6 exibe um conceito deste componente.

Os pinos para toque (na imagem, em cor vermelha) são dispostos numa superfície plana de suporte (cor preta), denominada mesa de pinos. Na parte inferior da superfície, acoplados a cada pino, há um aparato de base (cor azul) que, ao ser girado, realiza a subida/descida dos pinos.

Abaixo da superfície está o mecanismo de eixos tridimensional que atua no acionamento dos pinos. O mecanismo é basicamente composto por motores de passo (em azul claro) e correias para movimentação (em verde).

---

<sup>3</sup>Página do desenvolvedor: <https://opencv.org/> - Acessada em 01 de Dezembro de 2018



**Figura - 3.6:** Dispositivo tátil conceitual

Na figura estão ainda representadas peças de suporte para os motores dos eixos (em preto) e uma peça de encaixe para rotacionar a base do pino, realizando o movimento de subida/descida (em laranja). Com esta proposta, espera-se diminuir o custo financeiro do sistema quando comparado com as soluções já existentes, que utilizam motores dedicados para cada pino.

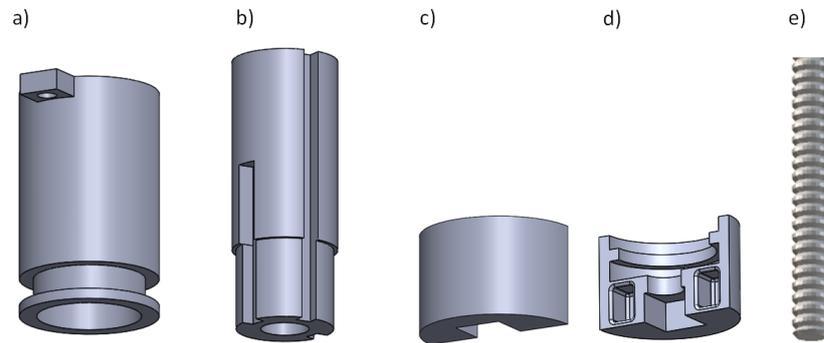
Na parte lateral há uma superfície para acoplamento do microcontrolador e das demais placas de circuito (em cinza), como por exemplo, dos sensores *touch* e multiplexadores. Embora também devam estar presentes no dispositivo tátil, não estão representadas na figura a disposição de cabeamento dos sensores, motores e de rede. A seguir, são discutidos mais detalhes de cada um dos itens que o compõe.

### 3.6.1 Definições do pino

O pino projetado para compor o MannaHap baseia-se num atuador linear, que é um mecanismo que gera um deslocamento linear por meio de uma força em movimento circular (Sclater e Chironis, 2011). Dessa maneira, o pino tem por princípio realizar em sua base um movimento circular, acionado por uma peça de encaixe que é rotacionado e, assim, desloca o pino para cima e para baixo, realizando o movimento linear.

A Figura - 3.7 apresenta o pino proposto em cinco partes que o compõe: a) parte externa do pino, a ser acoplada na parte inferior da mesa de pinos; b) parte interna do pino, que realiza o movimento de subida e descida; c) e d) encaixes de rosca; e) barra roscada.

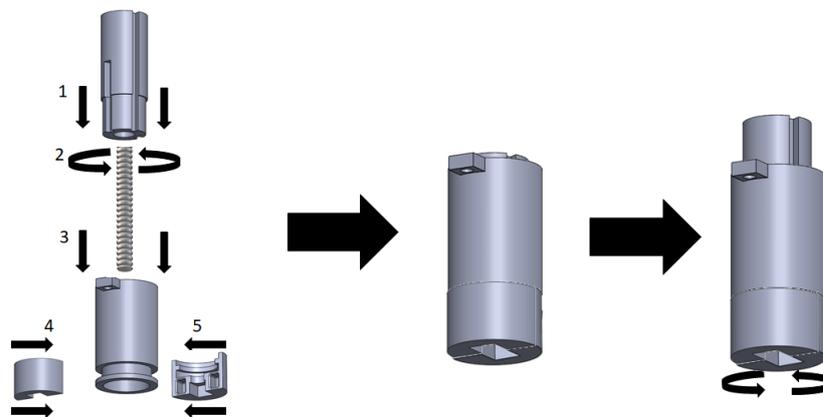
É importante notar que a peça interna do pino (b) apresenta um chanfro lateral que serve para alocação de um fio condutivo conectado ao sensor *touch*, de modo a mensurar a capacitância de toque. Já as peças c) e d) são apresentadas divididas devido ao fato da



**Figura - 3.7:** Pino proposto - componentes

barra roscada (e) ser acoplada primeiro à parte interna e só depois fixada na base. Na parte inferior das peças c) e d) é visível o molde para encaixe, em formato retangular.

A Figura - 3.8 exibe o processo de montagem do pino proposto. Inicialmente, fixa-se a barra roscada na parte interna do pino (1), realizando um movimento espiral (2) de modo a fazer uma rosca na parte interna. Com a barra fixada, insere-se a parte interna na parte externa (3), observando os chanfros para correto encaixe.



**Figura - 3.8:** Pino proposto - montagem e acionamento

Com as partes internas e externas encaixadas, uma ponta da barra roscada deve ficar visível na parte inferior e, desse modo, prendem-se os encaixes de rosca na base da parte externa juntamente com a ponta da barra roscada (4) e (5). O pino é acionado pela rotação dos encaixes de rosca.

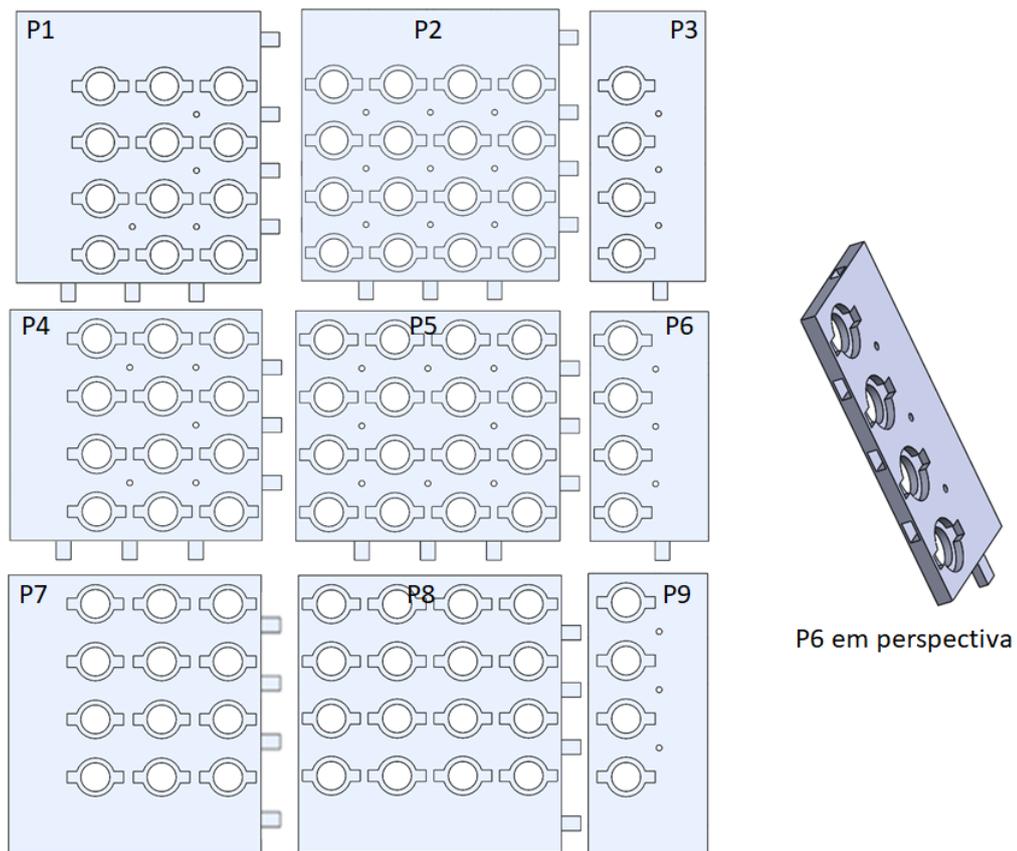
Ao passo que uma peça de encaixe do mecanismo de eixos realiza um movimento circular de rotação, a barra roscada gira. Com o movimento da barra, a parte interna do pino realiza o movimento de subida ou descida, dependendo do sentido do movimento circular.

As peças (a), (b), (c) e (d) foram projetadas utilizando o *software* de desenho assistido por computador SolidWorks 2018<sup>4</sup>. Com ele, é possível gerar as peças num formato de arquivo para impressão utilizando impressoras 3D. Na página oficial do projeto MannaHap<sup>5</sup> são disponibilizados os arquivos referentes à cada uma das peças.

### 3.6.2 Definições da mesa de pinos

Conforme já discutido, o sistema prima pelas características da abordagem DiY. De maneira a contribuir com tal premissa, indica-se a customização da “dimensão” da mesa de pinos, baseado num número de linhas e colunas a critério do desenvolvedor.

Para isso, é proposta a construção da mesa utilizando peças de encaixe, numa ideia semelhante à montagem de um quebra-cabeça. Foram elaboradas nove diferentes peças para encaixe, nomeadas de  $P_1$  à  $P_9$ , conforme apresenta a Figura - 3.9.



**Figura - 3.9:** Peças de encaixe para composição da mesa de pinos

<sup>4</sup>Página do software: <https://www.solidworks.com> - Acesso em 02 de dezembro de 2018

<sup>5</sup>Disponível em: <https://sites.google.com/view/mannahap>

Cada uma das peças possui espaços dedicados ao acoplamento dos pinos e garras para encaixe. As peças possuem (quando é necessário) aberturas para encaixe das garras correspondentes, conforme apresentado no detalhe à direita na Figura - 3.9. Na composição da mesa são obrigatórias, para sustentação, as peças de canto  $P_1, P_3, P_7$  e  $P_9$  em exatamente uma unidade.

Já as peças centrais  $P_2, P_4, P_5, P_6$  e  $P_8$  podem, embora não obrigatoriamente, serem aplicadas na superfície, bem como replicadas, garantindo a customização das dimensões da mesa. Tais dimensões são estabelecidas de acordo com a equação 3.1, na qual  $p_1, p_2, \dots, p_9$  são a quantidade de peças a serem inseridas corresponde à numeração apresentada na Figura - 3.9.

$$\begin{aligned} n_{linhas} &= 8 + 4 \times p_4 \\ n_{colunas} &= 4 + 4 \times p_2 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Devem ser atendidas as seguintes restrições de números de peças, de maneira a garantir a montagem correta da mesa tátil:

$$\begin{aligned} p_1, p_3, p_7, p_9 &= 1 \\ p_2, p_4, p_5, p_6, p_8 &\geq 0 \\ p_2 &= p_8 \\ p_4 &= p_6 \\ p_5 &= p_2 \times p_4 \end{aligned}$$

As nove peças foram projetadas e desenvolvidas também utilizando o SolidWorks 2018. Os arquivos de projeto e para impressão 3D das peças também são disponibilizados na página do MannaHap.

### 3.6.3 Definições dos eixos de movimentação

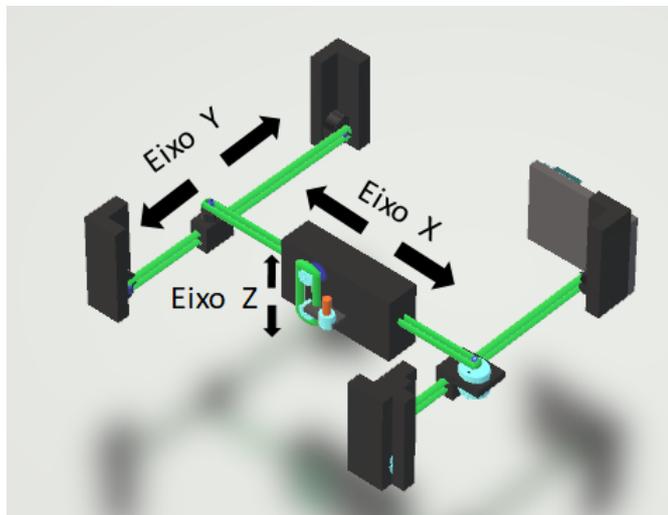
Para que os pinos possam ser acionados, devem haver meios para que uma peça de encaixe possa percorrer a parte inferior de cada um dos pinos e, assim, realizar a rotação, levantando-o ou abaixando-o.

Propõem-se três eixos de movimentação, um para alcance dos pinos em relação às linhas (que será chamado de *eixo y*), um em relação às colunas (*eixo x*), e um para elevar

e abaixar a peça de encaixe (*eixo z*). Além dos eixos, propõe-se um motor de suporte para rotação da peça de encaixe.

O eixo deve possuir três componentes básicos: um motor de rotação; um meio de deslocamento (uma correia dentada, por exemplo); e um objeto para se deslocar. O motor de passo deve realizar rotações e, dessa maneira, movimentar o meio de deslocamento. Por sua vez, este meio fará com que o objeto se desloque no eixo correspondente.

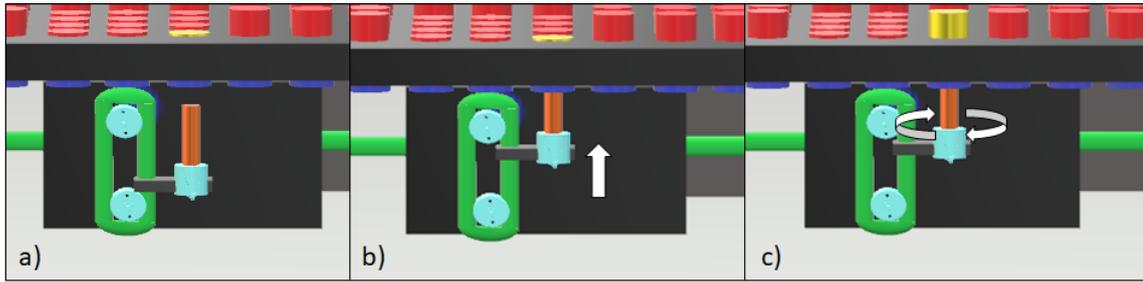
A Figura - 3.10 apresenta uma visualização conceitual dos eixos, baseado no modelo da Figura - 3.6. Nela, é possível observar os motores de passo (cor azul) e os meios de deslocamento (cor verde). No *eixo y*, o motor e o meio deslocam um objeto que, por sua vez, abriga o motor e o meio do *eixo x*. O mesmo ocorre entre o *eixo x* e o *eixo z*, que realiza a movimentação da peça de encaixe no pino (em laranja).



**Figura - 3.10:** Visualização conceitual dos eixos de movimentação

Com estas combinações de movimentos, e considerando também os movimentos nas direções contrárias, possibilita-se à peça de encaixe percorrer toda a mesa, de modo a acionar os pinos. Ao estar corretamente posicionado, o motor de suporte gira fazendo com que o encaixe também gire e, assim, faça o movimento circular na base do pino, levantando-o ou abaixando-o, conforme apresenta a Figura - 3.11.

Na parte a), tem-se a peça de encaixe posicionada abaixo da base (em azul) de um pino que deve ser levantado (em amarelo). Na parte b), foi realizado uma elevação no *eixo z*, promovendo o encaixe. Na parte c), é realizado o movimento de rotação na peça de encaixe, fazendo com que o pino seja erguido.



**Figura - 3.11:** Exemplo de ativação de um pino por meio dos eixos

### 3.6.4 Definições dos sensores *touch* e multiplexadores

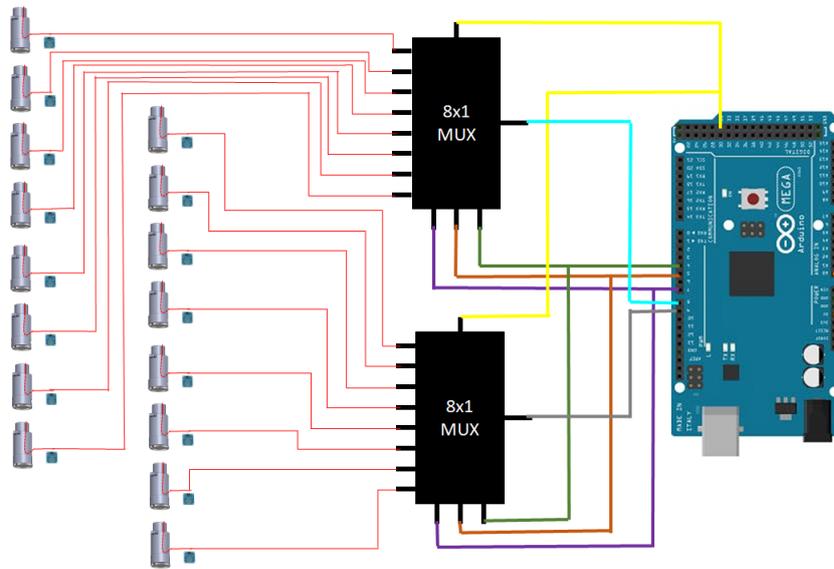
Além da representação tátil, o MannaHap também tem como premissa prover a representação auditiva da imagem digital. A ideia dessa representação é uma descrição contextual do objeto de toque em questão, que tem como princípio a sua detecção por meio dos sensores *touch*. Os sensores devem ser atribuídos para cada pino de maneira dedicada, fazendo com que o número de sensores utilizados seja o mesmo dos pinos.

Com tal afirmativa, tem-se o pensamento indutivo de que a plataforma do microcontrolador tenha entradas suficientes para realizar a leitura da capacitância dos sensores também de maneira dedicada. No entanto, plataformas de cunho popular, como é o caso do Arduino, possuem número limitado de entradas para leitura dos dados. Tornar a leitura dos sensores dedicada tende também a tornar o *hardware* do sistema mais custoso, do ponto de vista financeiro.

Mantendo a premissa de que o MannaHap seja um sistema com baixo custo financeiro quando comparado às soluções existentes, propõe-se a utilização de multiplexadores, diminuindo o número de entradas de leitura do microcontrolador. Fisicamente, os modelos de multiplexadores possuem, comumente, oito entradas de sinal a serem selecionados numa única saída, que será entrada para o microcontrolador. A Figura - 3.12 exemplifica a utilização dos sensores *touch* aliados aos multiplexadores.

Nela, concentram-se à esquerda dezesseis pinos com seus respectivos sensores *touch* dedicados. No centro estão dois multiplexadores de oito entradas para uma saída na qual os pinos estão conectados, oito em cada. À direita está uma plataforma do Arduino Mega, na qual os fios verde, laranja e roxo conectam-se aos seletores de entrada do multiplexador, o fio amarelo conecta-se à ativação e os fios azul claro e cinza às saídas produzidas pelos dois multiplexadores.

Neste exemplo, nota-se que são utilizadas apenas seis portas da plataforma do microcontrolador: uma para ativação combinada dos multiplexadores; três para a seleção da entrada combinada; e uma para cada saída de multiplexador. Se fosse utilizada uma porta



**Figura - 3.12:** Exemplo de utilização de multiplexadores para os sensores *touch*

para cada sensor dedicadamente, seriam necessários dezesseis portas, provendo, para esse caso, uma economia de 62,5%.

Para cada multiplexador inserido utilizar-se-á apenas uma porta a mais da plataforma, visto que as conexões de ativação e seleção são as mesmas para todos os multiplexadores, realizando assim uma leitura em paralelo dos sensores. O número de portas a ser utilizado podem ser expressos pela equação 3.2, sendo  $p$  o número de portas,  $s$  o número de seletores do multiplexador,  $n_{pinos}$  o número de pinos da mesa, e o número de entradas do multiplexador.

$$p = 1 + s + \left\lceil \frac{n_{pinos}}{e} \right\rceil \quad (3.2)$$

É importante ressaltar que o cálculo da divisão na equação, considerando ainda a função teto, indica o número de multiplexadores necessários para utilização. Para os casos em que a “resolução” da mesa de pinos é muito alta, recomenda-se a conexão agrupada em níveis de multiplexadores, na qual as entradas de um multiplexador de nível mais interno é fornecida pela saída de outros multiplexadores num nível externo.

Considere uma mesa tátil de resolução  $50 \times 50$ . Esta mesa possuirá 2500 pinos. Utilizando a fórmula da equação 3.2 e, considerando multiplexadores de oito entradas, tem-se que seriam necessárias 317 portas e 313 multiplexadores, uma quantidade alta considerando as plataformas convencionais.

A equação 3.3 apresenta, na primeira expressão, o cálculo para obter o número de portas considerando  $n$  níveis. Já a segunda expressão apresenta o cálculo do número

de multiplexadores necessários, sendo que cada termo do somatório representa o número necessário em cada nível.

$$p = 1 + n \times s + \left\lceil \frac{n_{pinos}}{e^n} \right\rceil$$

$$n_{mux} = \sum_{k=1}^n \left\lceil \frac{n_{pinos}}{e^k} \right\rceil \quad (3.3)$$

Nesse caso, para o exemplo supracitado, com dois níveis seriam necessários 47 portas e 352 multiplexadores. Considerando três níveis, seriam necessários 15 portas e 357 multiplexadores. Percebe-se então que, conforme o número de entradas na plataforma do microcontrolador diminui, o número de multiplexadores utilizados tende a aumentar, ainda que numa escala menor do que a diminuição de portas. Cabe então, baseado nas dimensões da mesa, avaliar qual a abordagem menos custosa.

### 3.6.5 Definições dos processos envolvendo o microcontrolador

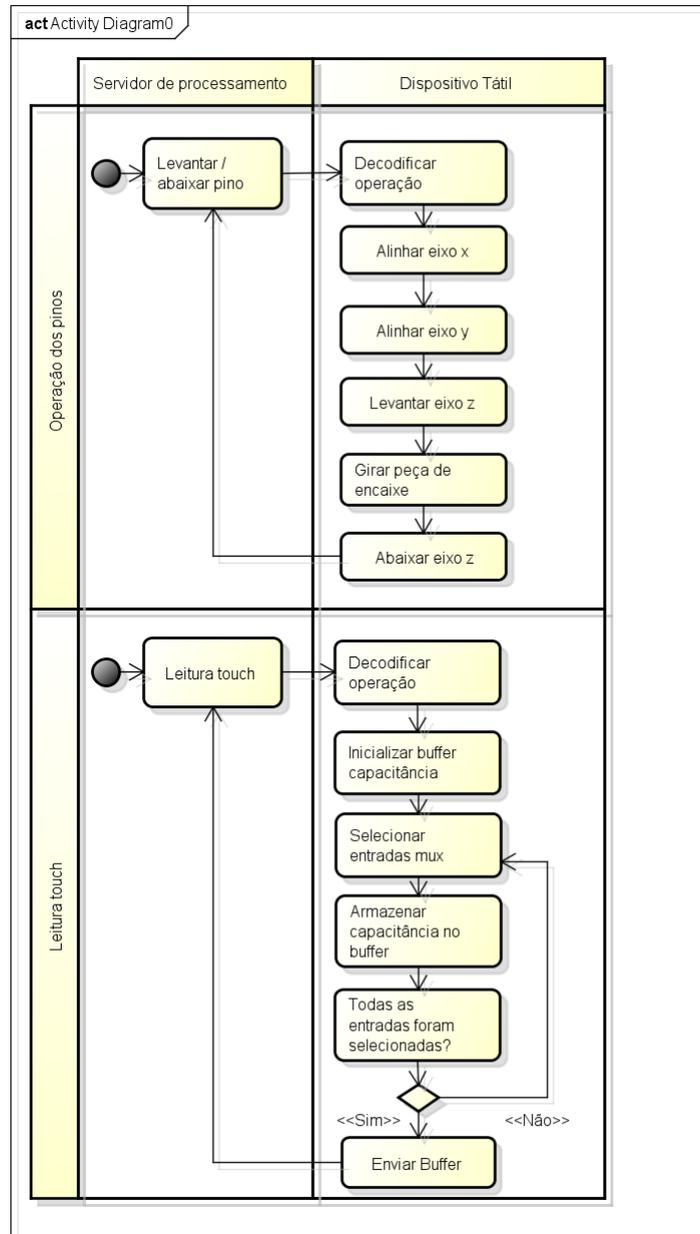
Agindo como elo de comunicação com o servidor de processamento, o microcontrolador realiza o controle dos eixos de movimentação e também a leitura dos sensores *touch*. É recomendado que este componente esteja integrado numa plataforma de prototipagem eletrônica, como por exemplo, alguma das distribuições Arduino.

A Figura - 3.13 apresenta o diagrama de atividades do dispositivo tátil, que é realizado pelo microcontrolador. As atividades dividem-se em dois processos distintos, a saber: operações relacionadas aos pinos e leitura dos sensores *touch*.

Nas atividades relacionadas à operação dos pinos, após receber a requisição numa comunicação via rede, o microcontrolador decodifica a operação a ser realizada. Depois, realiza o alinhamento do *eixo x* e do *eixo y*, de acordo com as informações providas na requisição. Com os eixos alinhados, o *eixo z* é elevado.

Após, o microcontrolador realiza o giro do motor da peça de encaixe, e o pino então é levantado ou abaixado. Depois do giro, o *eixo z* é abaixado. Por fim, o microcontrolador emite uma mensagem para o servidor de processamento de que o pino foi acionado / desacionado, passando a aguardar nova requisição.

Caso a requisição seja para leitura de capacitância dos sensores *touch*, o microcontrolador inicializa um *buffer* de armazenamento das capacitâncias. Na sequência, o microcontrolador realiza a leitura dos sensores. Como é proposta a utilização de multiplexadores, realiza-se um laço de leitura em paralelo das entradas dos multiplexadores, já armazenando os valores lidos no elemento correspondente no *buffer*.



**Figura - 3.13:** Diagrama de atividades centrado no dispositivo tátil

Quando todas as entradas foram selecionadas e, conseqüentemente, todos os sensores foram lidos, o *buffer* é enviado para o servidor de processamento. O microcontrolador volta então a aguardar uma nova requisição do servidor.

É importante notar que, embora o dispositivo tátil seja um elemento de fundamental importância do MannaHap, o microcontrolador realiza basicamente ações mecânicas e de leitura, cabendo ao servidor de processamento gerenciar e processar os dados obtidos e transformá-los em informação para o usuário.

### 3.7 Considerações gerais do modelo proposto

Este tópico apresentou o modelo do sistema háptico proposto como uma solução DiY de representações de imagens digitais para deficientes visuais, de modo tátil e auditivo. Foi visto que o MannaHap é composto por quatro componentes principais, que interagem e trocam informações entre si.

Foi apresentado o conceito geral do sistema, a sua arquitetura de funcionamento, as características principais e as definições de cada um dos seus componentes, com foco na descrição das atividades envolvidas.

Com relação ao *hardware*, foram descritos projetos a serem seguidos para elaboração da mesa de pinos e dos próprios pinos, numa perspectiva de que um desenvolvedor de interesse possa implementá-los e montá-los de acordo com as suas necessidades e interesses, numa abordagem DiY.

Nas propostas apresentadas, a mesa de pinos pode ser elaborada com dimensões customizáveis. Os pinos e a própria mesa podem ser impressos utilizando uma impressora 3D. Os pinos são acionados por meio de um único atuador, movimentado por três eixos. A leitura de sensores *touch* seguindo uma arquitetura multi-nível de multiplexadores habilita a utilização de plataformas com microcontroladores populares.

Com todos esses itens, espera-se reduzir o seu valor de custo financeiro, quando comparado com as soluções já existentes. Assim, DVs, instituições e entidades que os atendem passam a ter maior possibilidade de desenvolver seus próprios dispositivos, contribuindo para a acessibilidade de imagens digitais.

---

# Prova de conceito: desenvolvimento do protótipo MannaHap

---

Este tópico apresenta uma prova de conceito da solução proposta neste trabalho. Enquanto o tópico 3 introduz o modelo teórico do sistema háptico, esta prova de conceito desenvolve um protótipo baseado em *hardware* e *software* de modo a implementar o modelo MannaHap.

São apresentados neste tópico o escopo de desenvolvimento e os materiais e métodos empregados na criação do *hardware* e *software*. Com as informações que serão apresentadas, espera-se que o protótipo desenvolvido na pesquisa possa ser replicado e modificado, contribuindo para o avanço desta área de pesquisa.

## 4.1 Escopo de desenvolvimento

De modo a direcionar o desenvolvimento do protótipo, foram definidas algumas características de escopo, considerando as apresentadas na solução proposta. Elas são listadas à seguir.

- O ambiente do sistema háptico terá disponível um único dispositivo tátil para representação da imagem digital;
- a mesa de pinos desenvolvida terá dimensões de  $12 \times 12$  pinos. Este dimensionamento foi estabelecido devido ao tempo despendido para impressão das peças, considerando o tempo disponível para realização deste trabalho;

- os multiplexadores serão dispostos em dois níveis, de acordo com as definições da seção 3.6.4, reduzindo assim o número de portas utilizadas na plataforma microcontroladora;
- o usuário submeterá ao sistema um arquivo já com a representação intermediária da imagem digital, visto que o reconhecimento de objetos da imagem é uma atribuição de sistemas terceiros ao MannaHap. Um exemplo é o sistema MannAR;
- o arquivo de submissão deve considerar uma imagem na forma de representação binária, ou seja, com apenas dois valores admissíveis para um pixel. Dessa maneira, considera-se que cada pino possui apenas dois estados operacionais: totalmente abaixado ou totalmente levantado.

O protótipo desenvolvido é composto por duas partes: um *software* elaborado numa arquitetura cliente × servidor, que gerencia a interação do usuário, controla os processos entre os elementos do MannaHap e armazena informações do sistema; e um *hardware*, que implementa as definições estabelecidas para o dispositivo tátil.

Há também a utilização de *softwares* e *hardwares* auxiliares que complementam o protótipo desenvolvido, como a tecnologia assistiva para leitura de tela, o dispositivo de acesso ao sistema e o navegador *web* utilizado.

As seções a seguir apresentam o desenvolvimento do *hardware* e *software* do protótipo, detalhando os materiais e tecnologias utilizados, bem como a metodologia utilizada no desenvolvimento.

Ao decorrer destas seções, são apresentados componentes concebidos por meio de uma impressora 3D. Para todos eles, foi utilizada uma impressora de fabricação caseira, baseada no modelo Prusa Mendel<sup>1</sup>. A impressora tem uma área de impressão de 200 × 200 × 170 mm, bico de extrusão de 0,3 mm, velocidade de impressão de 40 mm/s a 50 mm/s e velocidade de preenchimento de 60 mm/s a 70 mm/s.

## 4.2 Materiais e métodos do desenvolvimento do *hardware*

Seguindo a concepção do MannaHap expressa na seção 3.6, definiu-se uma metodologia de desenvolvimento incremental do dispositivo tátil, na qual cada estágio é descrito à seguir.

---

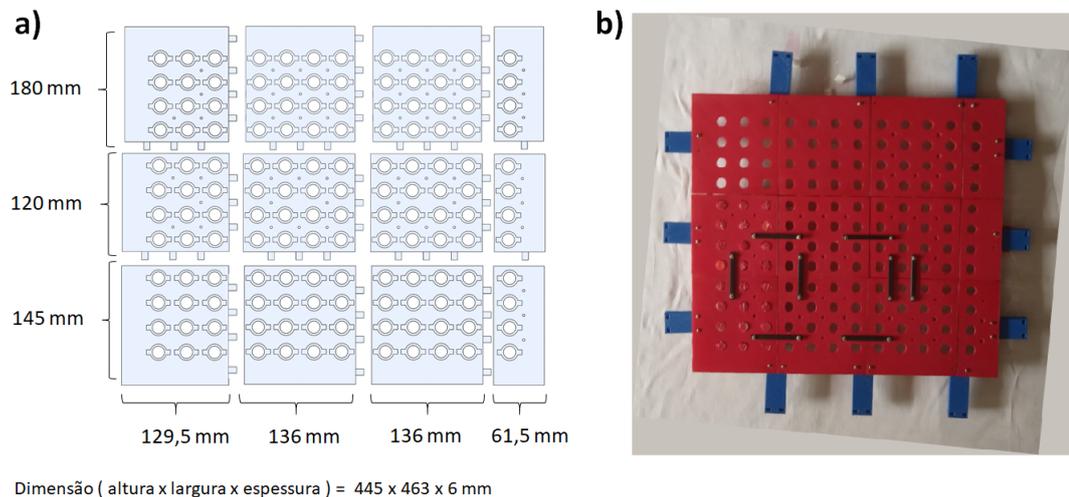
<sup>1</sup>Desenvolvedor: [https://reprap.org/wiki/Prusa\\_Mendel\\_\(iteration\\_1\)](https://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_(iteration_1)). Acessado em 05 de dezembro de 2018

- Desenvolvimento da parte superior do dispositivo, a saber, a mesa de pinos;
- desenvolvimento das peças de sustentação da mesa e do mecanismo de eixos;
- desenvolvimento do mecanismo de eixos;
- desenvolvimento dos pinos;
- desenvolvimento do circuito relativo à rede de multiplexadores e sensores *touch*;
- integração entre os circuitos e componentes.

#### 4.2.1 Desenvolvimento da mesa de pinos

Dado o escopo definido para o protótipo, a dimensão da mesa deve ser de  $12 \times 12$  pinos. Considerando a equação 3.1 e suas restrições, que estabelece as dimensões da mesa, e aplicando  $n_{linhas} = 12$  e  $n_{colunas} = 12$ , tem-se que devem ser utilizadas uma peça para P4 e P6, e duas peças para P2, P5 e P8, além das obrigatórias P1, P7, P3 e P9.

Assim, utilizando a impressora 3D, foram impressas as doze peças. A Figura - 4.1 apresenta, na parte a), a projeção das peças da mesa com as suas referidas dimensões; já na parte b), têm-se as peças montadas. A mesa impressa possui dimensões de  $445 \times 463 \times 6$  mm.



**Figura - 4.1:** Projeção e concebimento da mesa de pinos desenvolvida no protótipo

Durante o processo de impressão notou-se que, devido ao nível de precisão da impressora, algumas peças apresentavam, nas laterais, material impresso em maior quantidade.

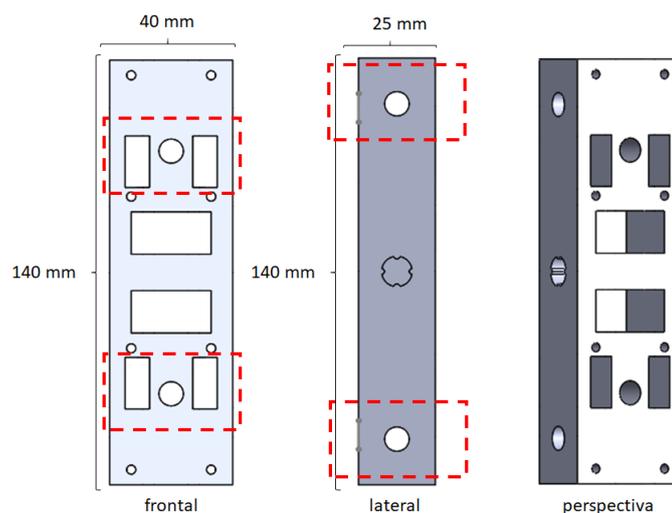
Já outras não encaixavam corretamente, devido à falta de precisão na impressão dos conectores.

Para tentar solucionar estes problemas, cada peça foi tratada manualmente, na qual procurou-se remover material impresso em excesso. Foi necessário também reforçar a conexão entre algumas peças, sendo realizada a impressão de uma peça própria para realizar este reforço, que foi parafusada à mesa. Tais peças podem ser observadas na parte b) da Figura - 4.1, destacados na cor preta.

#### 4.2.2 Desenvolvimento de sustentação da mesa de pinos

Tendo sido impressa a mesa de pinos e definido o seu dimensionamento, foi possível desenvolver, na sequência, as peças para sua sustentação, que também servem de suporte para o mecanismo de eixos. Elas dispõem-se num formato retangular, de modo a seguir o desenho da mesa de pinos. A sustentação possui quatro componentes de canto (que foram impressos), ligados por barras roscadas de 8 mm, presos por porcas e arruelas de 8 mm, compondo a base inferior do dispositivo.

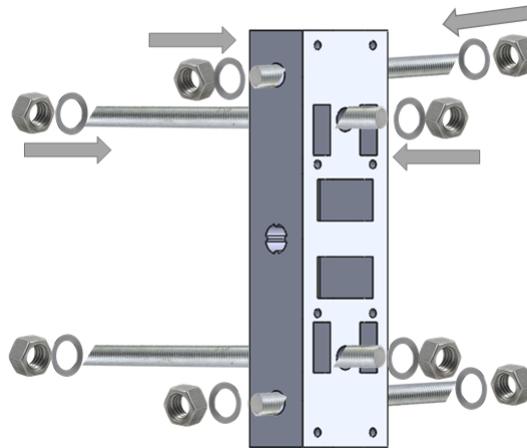
A Figura - 4.2 exibe a peça de suporte de canto supracitada na visão frontal, lateral e em perspectiva. Ela possui dimensões de 40 mm × 140 mm × 25 mm (largura × altura × profundidade). Em destaque, assinalados pela cor vermelha, estão as regiões que receberão as barras roscadas. Nota-se que para cada direção do eixo há duas regiões assinaladas, indicando que devem ser inseridas 2 barras. Com isso, procura-se evitar que o dispositivo seja afetado por movimentações externas, que podem causar desalinhamento.



**Figura - 4.2:** Peça de suporte de canto

Já a Figura - 4.3 mostra o esquema de ligação do suporte com as barras roscadas, porcas e arruelas. As setas em cinza indicam o sentido do aperto das porcas e arruelas, explicitando que ele deve haver na superfície de entrada e também de saída da barra com o componente.

O comprimento da barra roscada utilizada variou de acordo com o eixo dimensional da mesa de pinos. As barras inseridas mais próximas às extremidades superior e inferior do componente tiveram um comprimento de 600 mm, já as barras da parte central do componente tiveram um comprimento de 610 mm.



**Figura - 4.3:** Esquema de ligação entre suporte de canto, barras roscadas, porcas e arruelas

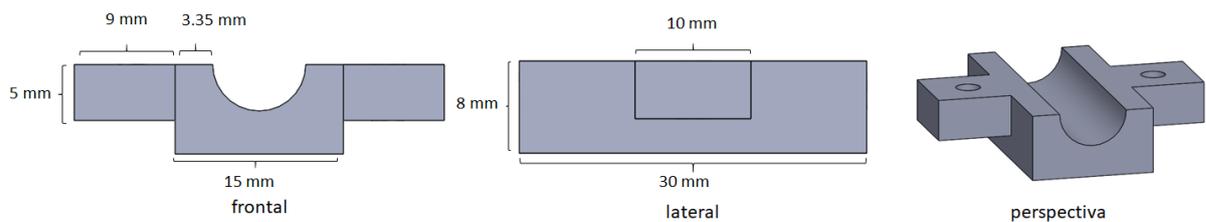
Considerando os 4 lados do suporte e o uso de 2 barras por lado, foram usadas 4 barras de 600 mm e 4 barras de 610 mm, totalizando 4840 mm de barra roscada utilizada. Quanto às porcas e arruelas, foram utilizadas 4 porcas e 4 arruelas para o aperto de cada barra, totalizando 32 itens de cada tipo.

Para acoplar a mesa, foi desenvolvido um componente composto por 3 peças impressas, que é parafusado à barra roscada da base inferior e à borda da mesa de pinos. É importante destacar que este componente possui 2 versões, que diferem-se pela altura e alcance de acoplamento.

Para fins de padronização, define-se que a *versão 1* é referente ao modelo de componente acoplado na barra roscada da parte da extremidade da peça de suporte de canto, conforme a Figura - 4.2, e a *versão 2* é referente ao acoplado na barra da parte central do suporte de canto. Foi necessário elaborar diferentes versões por dois aspectos, a saber: a

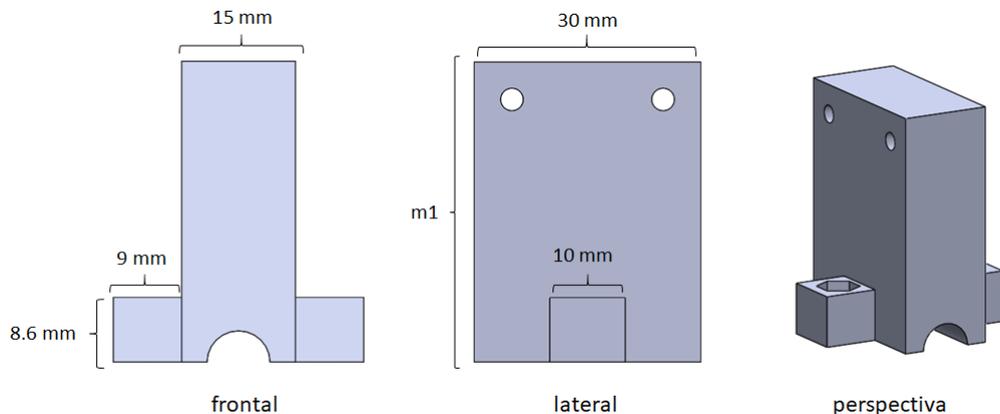
mesa de pinos não possui dimensão quadrada; e conforme visto na subseção anterior, as barras roscadas são conectadas pelos componentes de canto em alturas diferentes.

Destas três peças, uma delas é utilizada nas duas versões desenvolvidas, apresentada pela Figura - 4.4, também numa visão frontal, lateral e em perspectiva, com suas respectivas dimensões. Conforme observado na figura, ela possui um vão semicircular de modo a se fixar na barra roscada da base conjuntamente com as outras duas peças.



**Figura - 4.4:** Primeira peça do acoplador da mesa de pinos

A Figura - 4.5 exibe a segunda peça projetada que integra o acoplador da mesa de pinos. Ela é diretamente fixada na peça apresentada anteriormente, de modo a envolver a barra roscada em seus semicírculos. Na visão em perspectiva de ambas as figuras pode-se observar em seus flancos o espaço habilitado para a inserção de uma porca e um parafuso, fixando ambas.

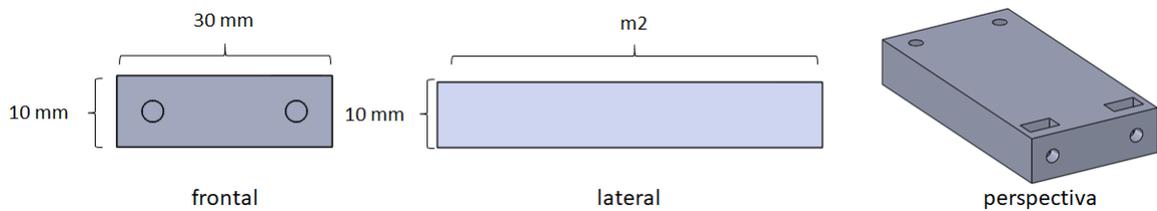


**Figura - 4.5:** Segunda peça do acoplador da mesa de pinos

Devido ao fato de haver duas versões, uma das dimensões da visão lateral está rotulada como m1. Para a *versão 1*, m1 tem a dimensão de 40 mm. Já para a *versão 2*, m1 tem a dimensão de 55 mm.

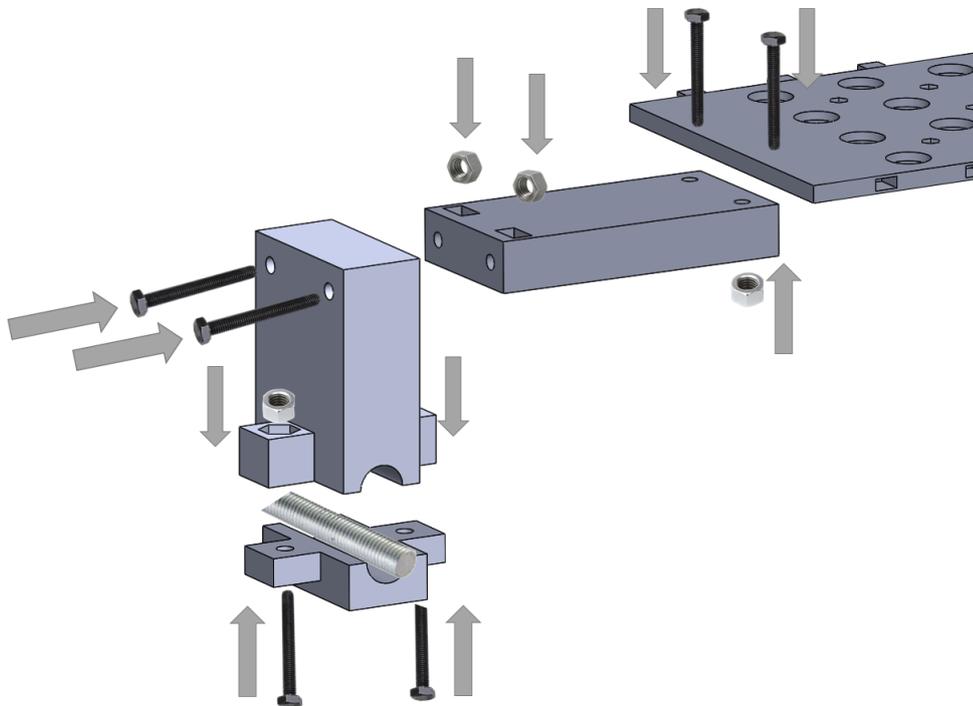
As duas peças apresentadas realizam a fixação na barra roscada, restando assim à terceira peça realizar a fixação da mesa de pinos, que é exibida na Figura - 4.6, com suas

dimensões. Observa-se, na visão frontal, os espaços para fixação com a segunda peça. Já na visão em perspectiva nota-se, ao fundo, os espaços que servirão para fixação da peça à mesa de pinos, também utilizando parafusos e porcas. A medida  $m_2$ , na *versão 1* tem dimensões de 58.5 mm e, na *versão 2*, 80 mm.



**Figura - 4.6:** Terceira peça do acoplador da mesa de pinos

A Figura - 4.7 apresenta o esquema de acoplamento da mesa de pinos com as barras roscadas de sustentação. Nela, é possível observar a disposição das três peças anteriormente apresentadas e a maneira que as mesmas são conectadas entre si e também com a barra roscada e a mesa. A disposição apresentada é válida para as duas versões de peças desenvolvidas.

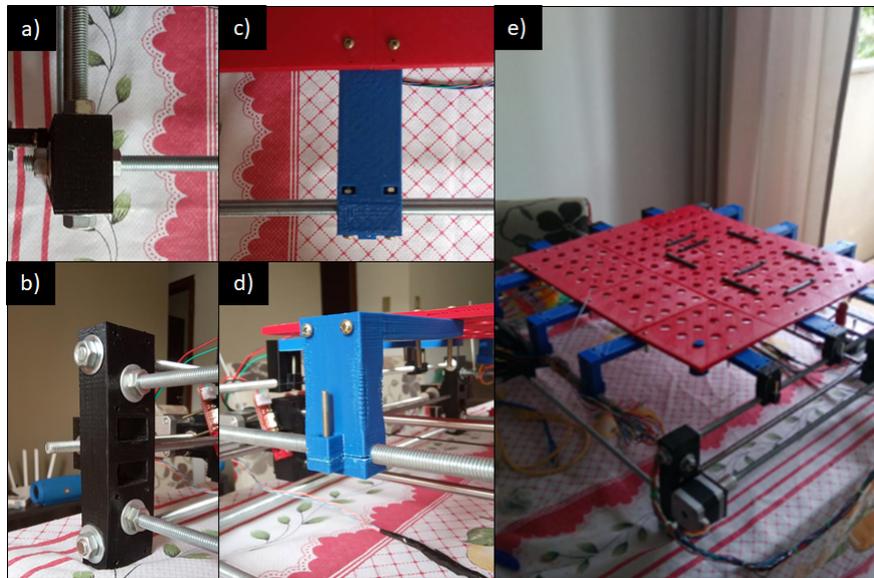


**Figura - 4.7:** Esquema de acoplamento da mesa de pinos com as barras roscadas de sustentação

Conforme apresentado na Figura - 4.7, a primeira e a segunda peça apresentadas são fixadas na barra roscada, que é encaixada nos semicírculos das peças. Para a fixação, usam-se parafusos e porcas de 3 mm. As setas em cinza indicam o sentido de fixação das peças. Já a terceira peça é fixada na parte superior da segunda, e, na sua outra extremidade, fixa-se a mesa de pinos.

Ao decorrer da construção do protótipo, percebeu-se que a mesa de pinos, devido a sua espessura de 6mm, não teria estabilidade suficiente caso houvesse apenas um acoplamento por lado. Assim, foram distribuídos 3 acopladores em cada lado da mesa, totalizando 12. Quanto às porcas e parafusos de 3 mm, utilizaram-se 6 conjuntos em cada acoplador, totalizando 72 unidades de cada item.

Todas as peças tratadas nesta subseção foram impressas seguindo os requisitos e quantidades apresentados. A Figura - 4.8 exibe imagens fotografadas de tais peças. Uma peça de suporte de canto é apresentada nas imagens a) e b), numa visão superior e em perspectiva, respectivamente. As imagens c) e d) trazem um conjunto de peças de acoplamento, seguindo as mesmas visões da peça de suporte. Por fim, a imagem e) mostra a visão geral da mesa, com seus 12 acopladores e a base formada pelas peças de suporte de canto e as barras.



**Figura - 4.8:** Concebimento das peças de sustentação da mesa de pinos e do mecanismo de eixos

### 4.2.3 Desenvolvimento do mecanismo de eixos e de acionamento do pino

De acordo com o modelo estabelecido na subseção 3.6.3, o sistema háptico deve possuir três eixos de movimentação: um para deslocamento no *eixo y*, um no *eixo x*, e um no *eixo z*, de maneira a levantar e abaixar uma peça que se acoplará à base do pino. Além destes eixos, deve haver um mecanismo para acionamento do pino.

A metodologia inicial para elaboração dos eixos foi a seguinte:

- desenvolver peças de sustentação para os motores;
- utilizar barras lisas para movimentação dos objetos, integradas à correia dentada no motor;
- acoplar o motor do *eixo x* na barra lisa de movimentação do *eixo y*;
- acoplar o motor do *eixo z* na barra lisa de movimentação do *eixo x*;
- acoplar o motor de acionamento dos pinos na barra lisa de movimentação do *eixo z*.
- desenvolver e acoplar uma peça de encaixe nos pinos, a ser impressa em 3D, no motor de acionamento.

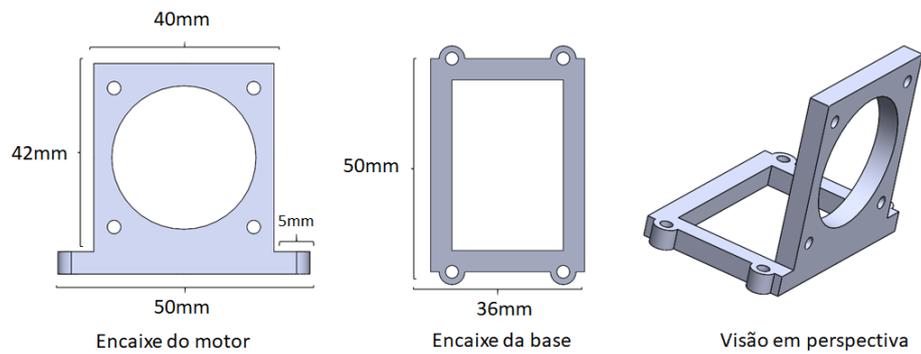
A seguir, são delineados o projeto das peças e suas respectivas dimensões, de acordo com a metodologia. Após, são descritos os processos de montagem das peças, incluindo a ordem e os modos em que as mesmas foram montadas.

Primeiramente, foram desenvolvidas as peças de sustentação dos motores do *eixo y*. Num primeiro esforço, de modo a garantir a precisão de alinhamento dos motores, a movimentação do referido eixo deveria ser realizada nas duas bases de sustentação. Dessa maneira, as correias deveriam ser duplicadas, estando uma em cada lado, similar ao modelo apresentado na figura Figura - 3.10.

No entanto, ao montar o eixo, verificou-se que, mesmo com as correias duplicadas, as peças de sustentação se movimentavam de maneira desigual, causando desalinhamento. Para tratar este problema, foi necessário modificar o mecanismo, substituindo as correias por barras roscadas e inserindo uma porca com uma mola na peça de sustentação. Com essa modificação, o motor rotaciona a barra roscada. Como a barra é estática, a porca se movimenta, fazendo com que o mecanismo se mova no *eixo y* de maneira alinhada.

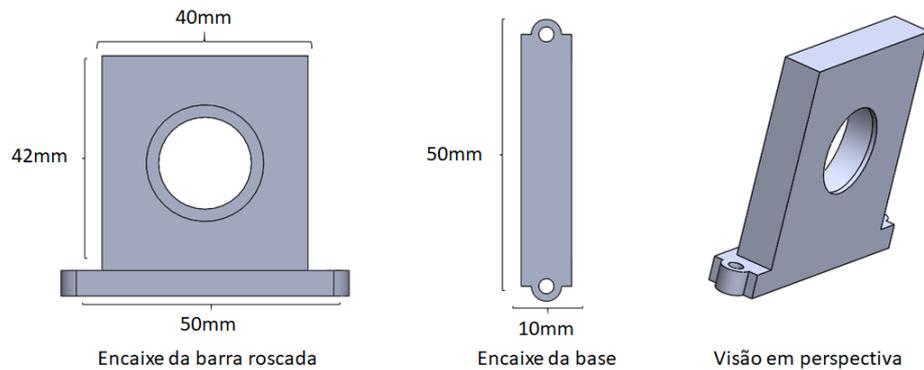
Foram desenvolvidas três peças de sustentação e movimentação para o *eixo y*, a saber: uma para o motor de passo; uma para a barra roscada; e uma para acoplamento do *eixo x*

na barra lisa. A Figura - 4.9 apresenta a primeira delas. Na figura, à esquerda é exibida a parte da peça onde se encaixa o motor, no centro está a parte que se fixa na sustentação da mesa de pinos, e à direita a visão da peça em perspectiva. Para realizar os encaixes, são utilizados parafusos e porcas de 3mm.



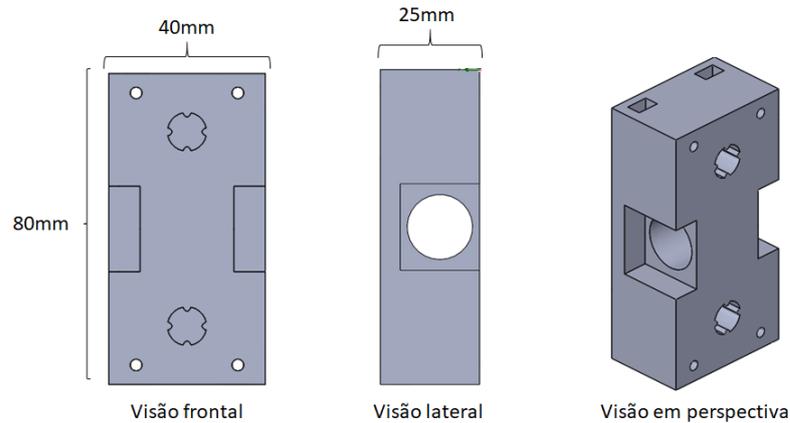
**Figura - 4.9:** Peça de sustentação do motor do *eixo y*

A Figura - 4.10 exibe a peça de sustentação para a barra roscada. À esquerda tem-se a visão da peça na parte do encaixe da barra roscada. Ao centro, o encaixe na base e à direita a visão da peça em perspectiva. Também são utilizados porcas e parafusos de 3mm para o encaixe.



**Figura - 4.10:** Peça de acoplamento da barra roscada do *eixo y*

A Figura - 4.11 mostra o projeto da peça de acoplamento do *eixo x* na barra lisa, realizando a movimentação. O círculo vazado ao centro da peça refere-se ao espaço dedicado para inserção na barra lisa. É observável ainda dois chanfros na parte superior e inferior da peça (visão frontal). Estes chanfros são utilizados para fixação das barras lisas utilizadas para movimentação no *eixo x*, que são apresentadas posteriormente.

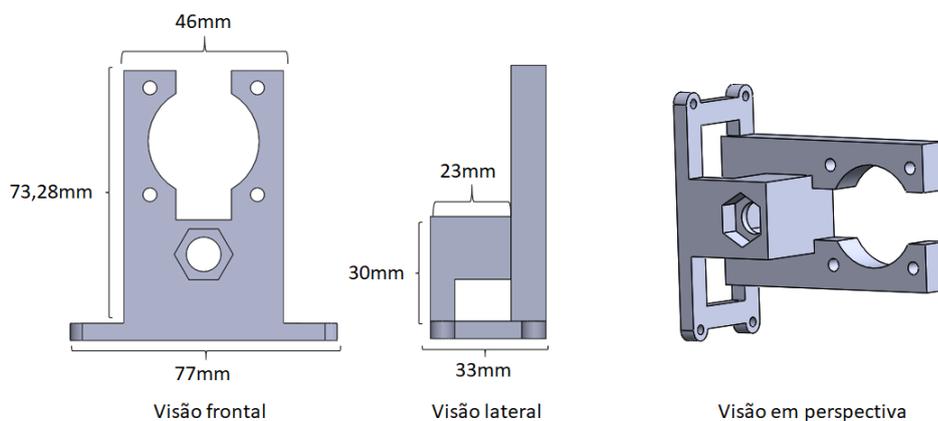


**Figura - 4.11:** Peça de sustentação na barra lisa para acoplamento do *eixo x*

Estas peças foram produzidas em duas unidades cada, de modo a utilizá-las em dois lados paralelos da mesa, garantindo o alinhamento do eixo. Da mesma maneira, foram utilizadas 2 barras roscadas.

O mecanismo do *eixo x* não sofreu alterações em sua premissa, sendo mantida a movimentação por correia. Para a sustentação e movimentação foram desenvolvidas quatro peças, a saber: para sustentação do motor; para apoio do rolamento da correia; para fixação da correia; e para sustentação do mecanismo do *eixo z*, que se desloca usando barra lisa.

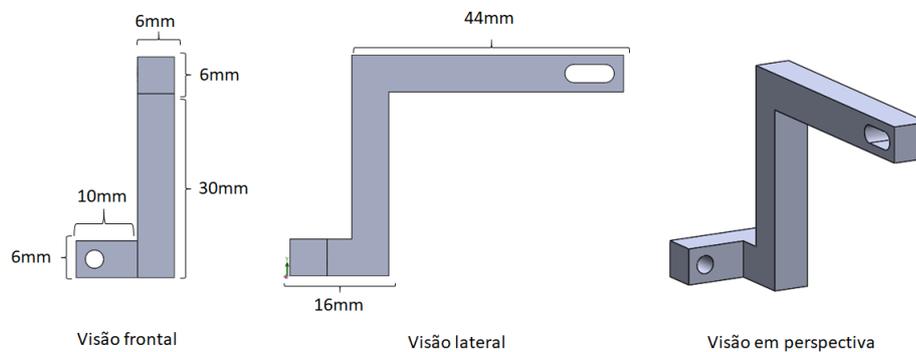
A Figura - 4.12 apresenta a peça de sustentação do motor do *eixo x*. O chanfro circular e o molde em formato de porca servem para que a barra roscada que posiciona o *eixo y* possa ser acoplada, realizando então a movimentação. Assim como a peça apresentada na Figura - 4.9, são utilizados quatro parafusos e porcas de 3mm para fixação.



**Figura - 4.12:** Peça de sustentação do motor do *eixo x*

O motor a ser anexado na peça permanecerá em uma das barras roscadas de movimentação do *eixo y*. Para fixação na outra barra, foi elaborada uma peça auxiliar que apoia o rolamento da correia durante a rotação do motor, que é similar à apresentada na Figura - 4.12, no entanto, ao invés de se anexar um motor, anexa-se um rolamento dentado com o apoio de uma barra fixa por porcas e arruelas, todas de 8mm.

A correia de rolamento é inserida no motor conjuntamente com polias dentadas. Esta correia realizará a movimentação do conjunto de peças de sustentação do *eixo z*. Para que a movimentação tenha tração, foi desenvolvida uma peça para esta função, apresentada na Figura - 4.13. Ela possui um orifício para fixar a peça de sustentação do *eixo z* por meio de parafusos de 3mm e um espaço para se prender a correia.

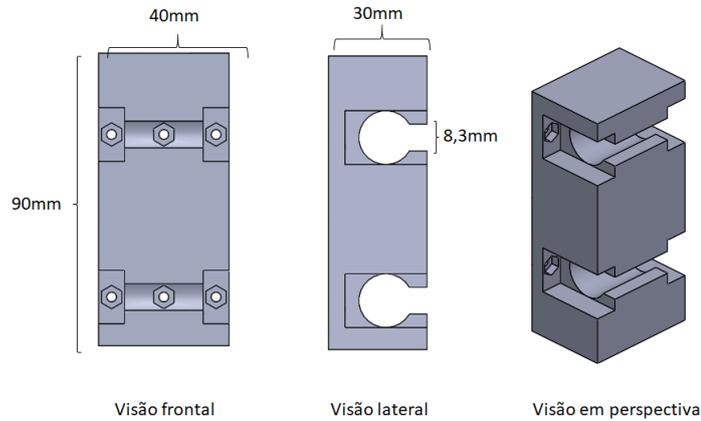


**Figura - 4.13:** Peça de fixação da correia

Para uma tração melhor, foram impressas e acopladas duas destas peças à de sustentação do *eixo z*. A segunda peça tem as mesmas dimensões da apresentada na Figura - 4.13, diferindo-se apenas no lado de encaixe. Em outras palavras, considerando a visão em perspectiva da peça, ao invés do encaixe estar voltado para a esquerda, está para a direita.

A peça de sustentação do *eixo z* é similar à da Figura - 4.11. No entanto, ela possui orifícios para duas barras lisas, que garantem um melhor alinhamento do eixo, movimentado pelas correias. Ela é apresentada na Figura - 4.14. Além dos orifícios, são dedicados espaços para parafusos de 3mm, que fixam rolamentos lineares à peça.

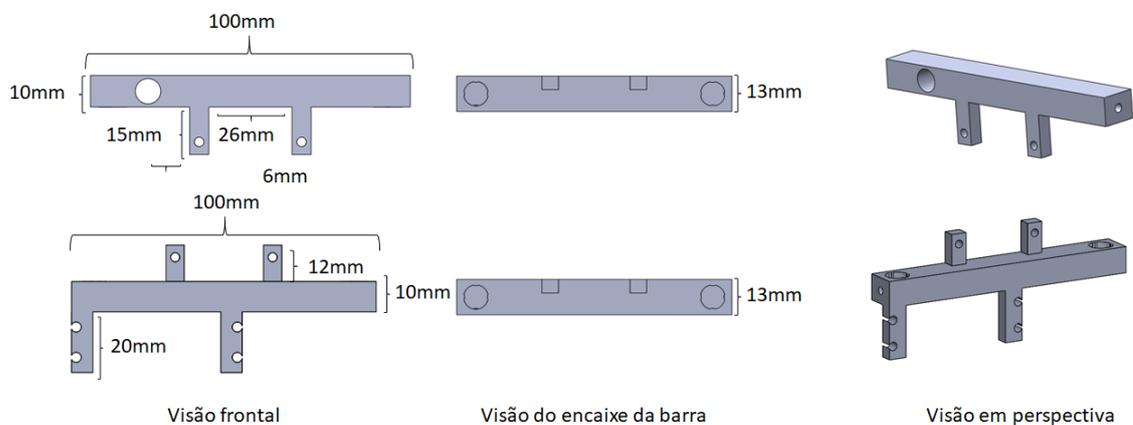
O mecanismo do *eixo z* também segue a premissa de movimentação por correias. Como o espaço físico para o eixo é reduzido, utilizou-se um servo motor ao invés do motor de passo. Foram desenvolvidas oito diferentes peças: duas para auxiliar o suporte do mecanismo e anexar duas barras lisas; duas para encaixes de rolamento lineares; uma para conexão dos encaixes; uma para acoplamento do servo; uma para encaixe do motor de ativação dos pinos; e uma para suporte da peça de encaixe do motor nos rolamentos lineares.



**Figura - 4.14:** Peça de sustentação nas barras lisas para acoplamento do *eixo z*

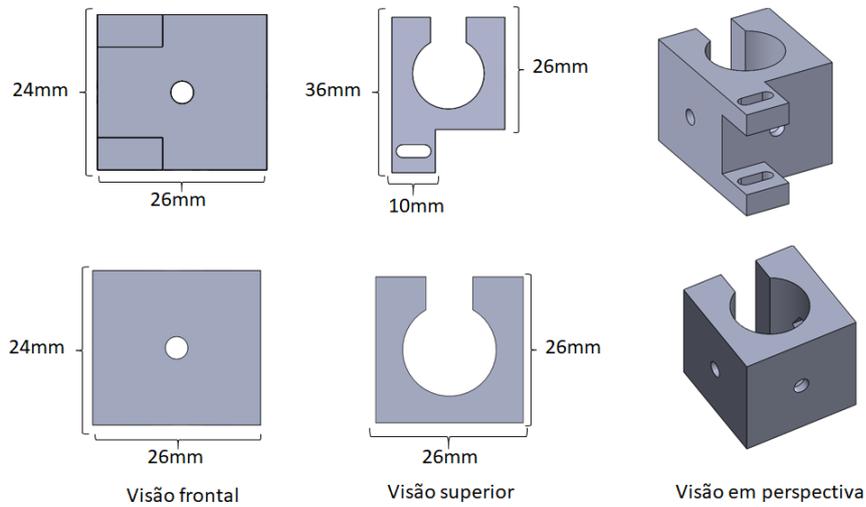
A Figura - 4.15 apresenta as duas peças de auxílio ao suporte do mecanismo. A primeira é inserida na parte superior da peça apresentada na Figura - 4.14. Ela possui um orifício para anexar um rolamento dentado com o apoio de uma barra fixada por porcas e arruelas, de modo a realizar a movimentação da correia.

A segunda, inserida na parte inferior, possui ainda uma superfície para anexar o servo motor que compõe o eixo. Utilizam-se parafusos e porcas de 3mm para sua fixação.



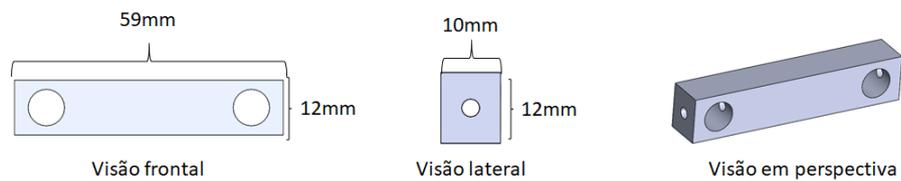
**Figura - 4.15:** Peças de suporte do mecanismo do *eixo z*

Na Figura - 4.16 são exibidas as duas peças de encaixe dos rolamentos lineares e, conseqüentemente, das barras lisas. Conforme é apresentado na figura, as peças são similares, possuindo um espaço para inserção da rolamento, que deslizará pela barra. A peça mostrada na parte superior possui uma protuberância na qual a correia de movimentação é presa, realizando o movimento do eixo.



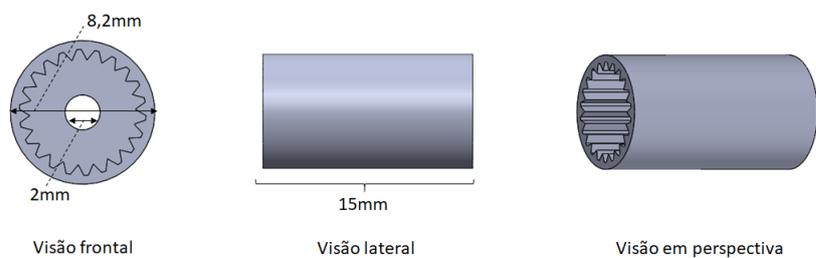
**Figura - 4.16:** Peças de encaixe dos rolamentos lineares

Para garantir que os rolamentos lineares deslizem igualmente, de maneira alinhada, foi desenvolvida uma peça que conecta as duas do rolamento, que é apresentada na Figura - 4.17. Ela é fixada também utilizando parafusos e porcas de 3mm.



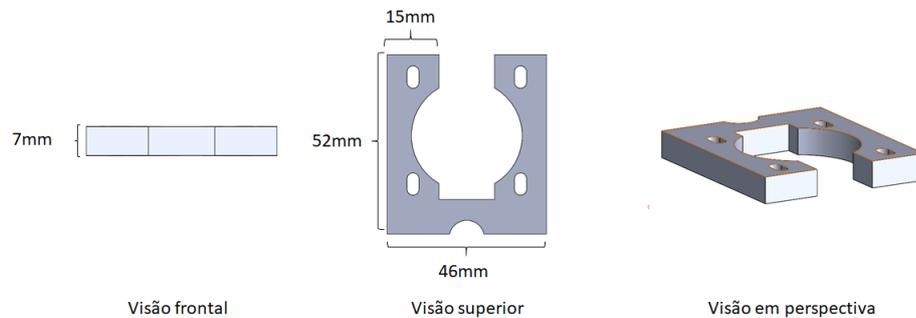
**Figura - 4.17:** Peça de conexão entre encaixe dos rolamentos

O servo utilizado para movimentação do eixo carece de um acoplador ao restante das peças, de modo a habilitar a movimentação da correia. A Figura - 4.18 exibe tal peça, que é um cilindro vazado, no qual encaixa-se a ponta do eixo do servo de um lado, e do outro, um rolamento dentado para movimentação da correia.



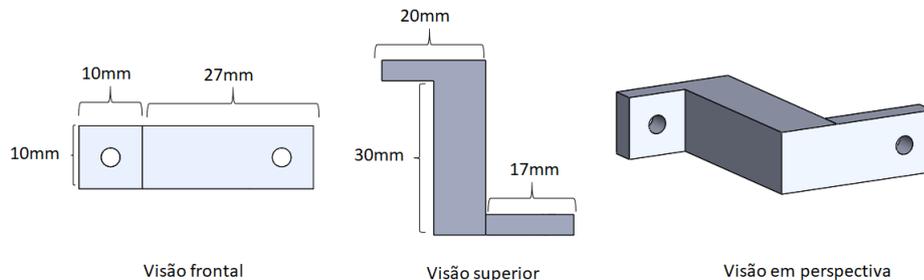
**Figura - 4.18:** Peça de acoplamento do servo motor

Realizando a conexão entre o *eixo z* e o eixo de ativação dos pinos, foi desenvolvida uma peça de encaixe do motor de passo que realiza a ativação, conforme a Figura - 4.19. Ela possui um espaço para o eixo do motor de passo realizar as rotações, fixando-o por quatro orifícios para parafusos de 3mm.



**Figura - 4.19:** Peça de encaixe do motor de ativação dos pinos

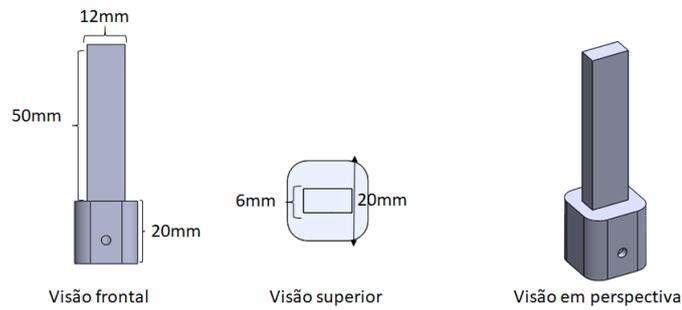
Para conectar a peça de suporte do motor nos rolamentos lineares foi projetada uma peça, conforme a Figura - 4.20. Ela possui orifícios de fixação para parafusos e porcas de 3mm. Como o encaixe se dá em duas outras peças, foi necessário projetá-la num formato similar à um "S", para garantir o parafusamento adequado e manter um espaço adequado entre as peças. São utilizadas duas destas.



**Figura - 4.20:** Peça de encaixe do suporte do motor ao rolamento linear

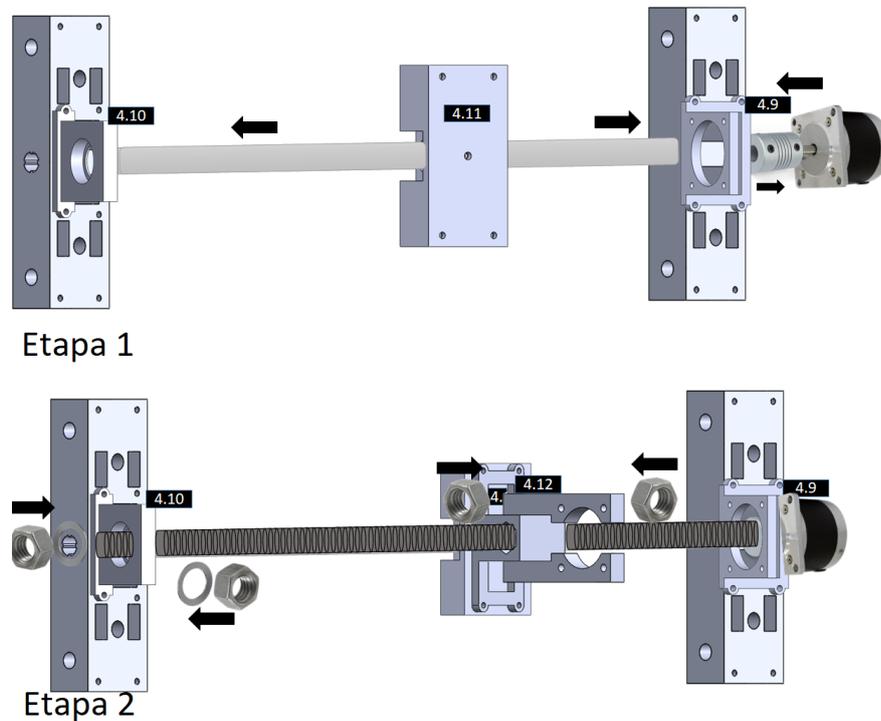
Quanto ao eixo de ativação dos pinos, foi desenvolvida uma peça para encaixe dos pinos, que é fixada no motor de passo de ativação, exibida na Figura - 4.21. Ela consiste numa espécie de bastão, cuja parte inferior é fixada no motor de passo. Conforme o *eixo z* realiza a movimentação de subida e descida, este bastão se encaixa/desencaixa na parte inferior do pino e, com a rotação do motor, o aciona/desaciona.

Com as peças projetadas, é explanado nos parágrafos a seguir a sua montagem. A Figura - 4.22 apresenta a montagem das peças relacionadas ao *eixo y*, dividida em duas



**Figura - 4.21:** Peça de encaixe da base do pino

etapas, para uma melhor visualização e entendimento. Na figura, os rótulos nos retângulos pretos indicam a figura relacionada à peça considerando o texto desta dissertação.

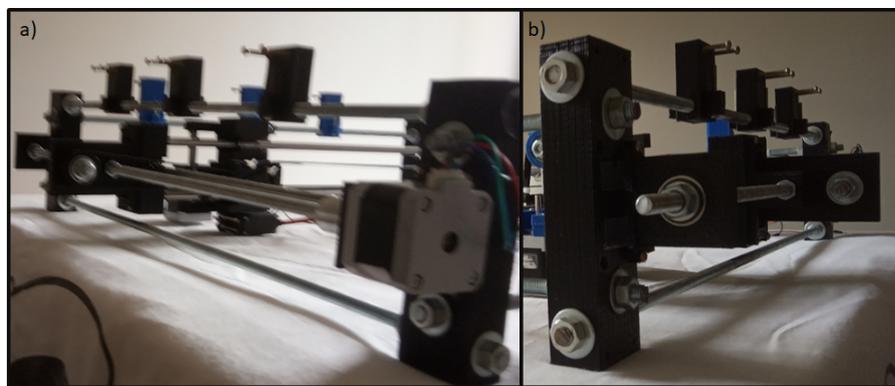


**Figura - 4.22:** Processo de montagem das peças relacionadas ao *eixo y*, na lateral da mesa

Na etapa 1, inserem-se as peças das Figuras 4.9 e 4.10 nas duas bases da mesa de pinos, fixando-as com parafusos e porcas de 3mm. Na peça 4.9 fixa-se o motor de passo e, em seu eixo, um acoplamento flexível ajustado em 5mm para o motor e 8mm para a barra roscada. A peça 4.11 é transpassada na barra lisa, que deve ser encaixada no orifício central das bases.

Feito isso, passa-se à etapa 2 de montagem. A peça 4.12 é fixada na peça de sustentação da barra lisa e, então, a barra roscada é inserida, de modo a passar pelas peças 4.10, 4.12 e 4.9. Deve ser feito o aperto com porcas e arruelas de 8mm na peça 4.10 e também no espaço dedicado à barra na peça 4.12.

Como comentado anteriormente, esta montagem é realizada em duas extremidades da mesa, para garantir o alinhamento do eixo. Assim, todas as peças apresentadas para o mecanismo deste eixo são duplicadas. A Figura - 4.23 exhibe as peças que foram impressas e montadas na mesa de pinos. Em a) tem-se a visão a partir do motor de passo acoplado. Já em b), a visão a partir do acoplamento da barra roscada.



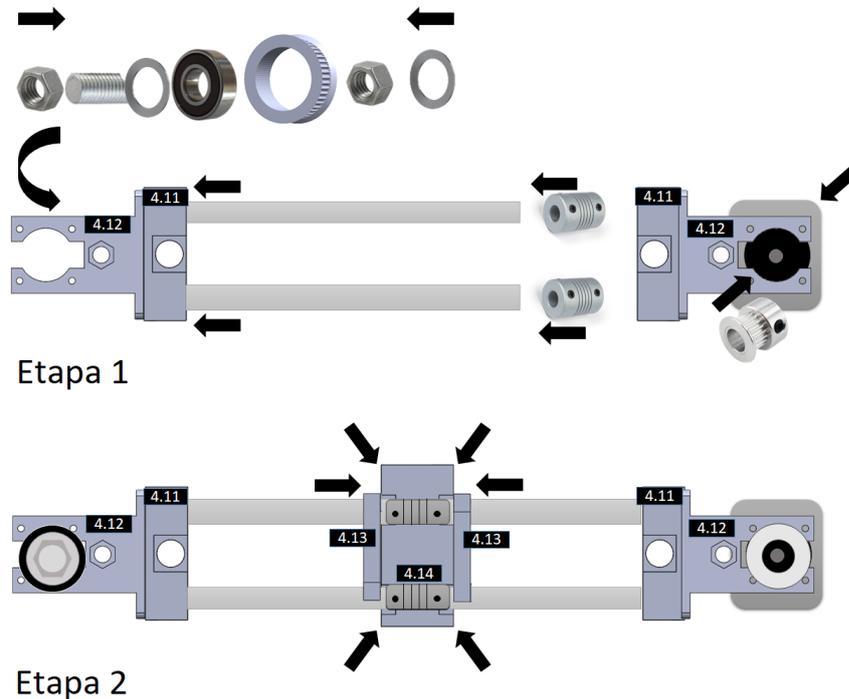
**Figura - 4.23:** Mecanismo do *eixo y* da mesa de pinos

A montagem do *eixo x* é realizada a partir das peças 4.11 e 4.12. A Figura - 4.22 apresenta o processo, também exibido em 2 etapas. Na etapa 1, deve ser anexado à uma das peças 4.12 o motor de passo (na imagem, no lado direito). Na ponta do eixo do motor deve ser inserido uma polia dentada para deslizamento da correia. Neste trabalho, foi utilizada uma polia dentada GT2 de 20 dentes.

Na peça 4.12 do lado oposto, deve ser montado o suporte para rolamento da correia, cujas peças estão exibidas na parte superior da imagem, na etapa 1. O rolamento é composto por um pedaço de barra roscada, que sustenta um rolamento 608 de 8mm de diâmetro, envolto por uma polia dentada. A barra é fixada por porcas e arruelas de 8mm.

Ainda na etapa 1, duas barras lisas devem ser fixadas em uma das peças 4.11 e, em seguida, dois rolamentos lineares, um em cada barra, devem ser anexados. Finaliza-se a etapa encaixando as barras lisas na peça 4.11 da extremidade oposta.

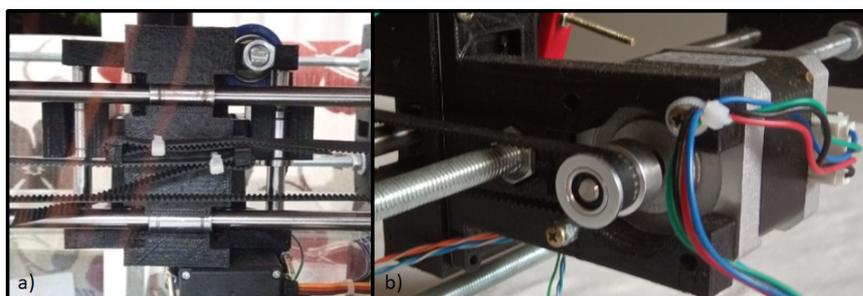
Na etapa 2, a peça 4.14 deve ser encaixada nas barras lisas, exatamente nas regiões dos rolamentos lineares, que precisam estar alinhados. Para garantir um rolamento igual pelas duas barras, parafusos de 3mm podem ser apertados na parte posterior da peça,



**Figura - 4.24:** Processo de montagem das peças relacionadas ao *eixo x*

prendendo-a aos rolamentos. Por fim, duas peças 4.13 são parafusadas à 4.14, em suas laterais, e assim, a correia dentada por ser inserida no eixo.

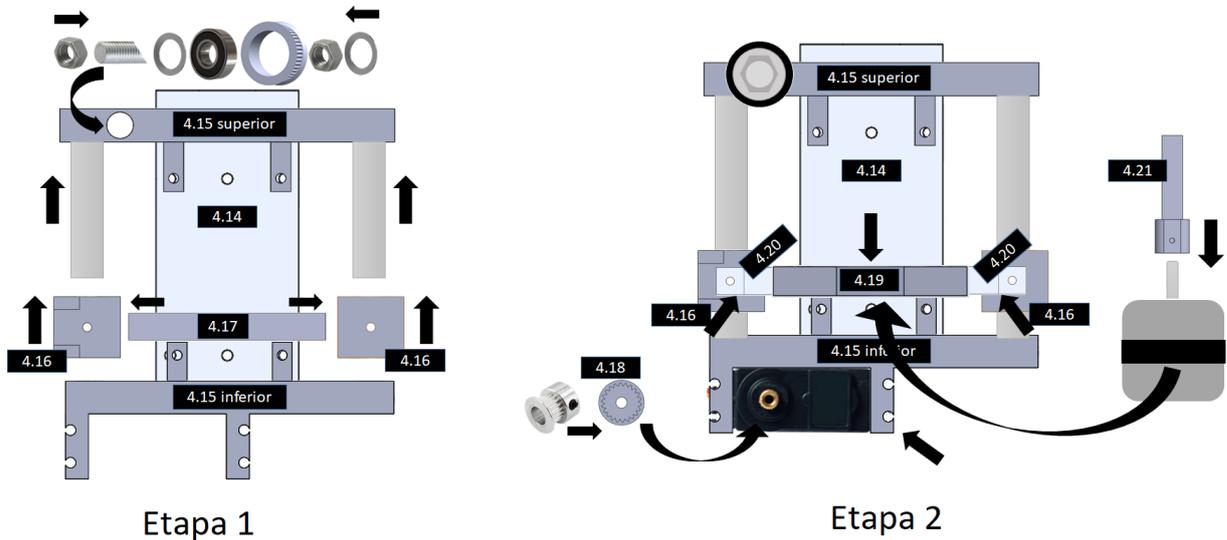
A Figura - 4.25 apresenta o mecanismo do *eixo x* impresso e montado na mesa de pinos. Em a) pode-se observar a peça de sustentação e as barras lisas, além das peças que fixam a correia, utilizando abraçadeiras. Na parte b) são exibidos o motor de passo e a polia dentada em seu eixo, que realiza a movimentação da correia.



**Figura - 4.25:** Mecanismo do *eixo x* da mesa de pinos

As peças do mecanismo do *eixo z* são montados na parte posterior da peça de sustentação do *eixo x*. A Figura - 4.26 apresenta o processo de montagem do eixo, dividido em duas etapas. Na etapa 1, fixam-se com parafusos de 3mm as peças 4.15 superior e

inferior. Duas barras lisas devem ser inseridas entre as peças e, nelas, as peças 4.16. Deve-se observar que a peça 4.16 com o suporte para fixação da correia deve permanecer na barra do lado do servo motor.



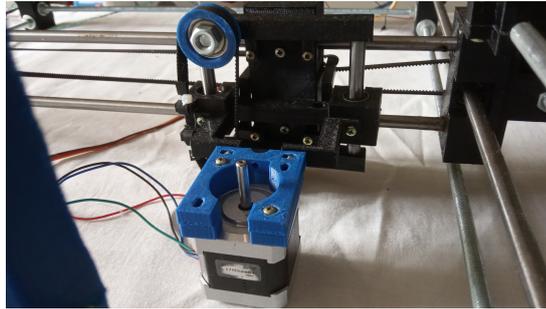
**Figura - 4.26:** Processo de montagem das peças relacionadas ao *eixo z* e à ativação dos pinos

Com as barras e suporte fixados, fixa-se o conector 4.17 para as peças 4.16. Similar ao feito no *eixo x*, um suporte para o rolamento deve ser montado e inserido no orifício correspondente na peça 4.15 superior.

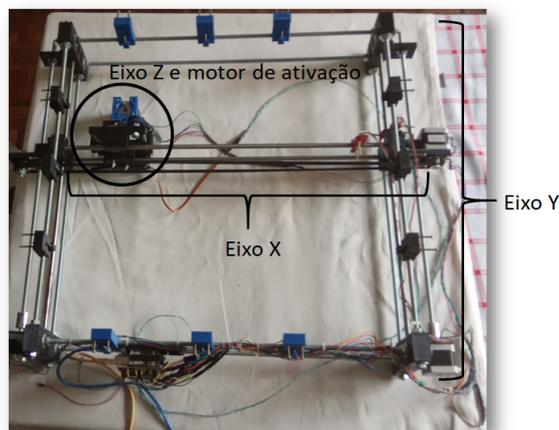
Com a estrutura principal do eixo montada, passa-se à etapa 2. Os conectores 4.20 de encaixe do suporte do motor devem ser encaixados nas peças 4.16, habilitando assim a fixação do suporte do motor 4.19. O motor de passo de ativação dos pinos, conjuntamente com a peça de encaixe 4.21, pode ser anexado na peça 4.19.

Por fim, insere-se o servo motor na peça 4.15 inferior e, em seu eixo, a peça de apoio 4.18, conjuntamente com a polia dentada. A correia pode então ser ajustada ao mecanismo. A Figura - 4.27 apresenta o mecanismo do *eixo z* e o mecanismo de ativação montados e inseridos na mesa de pinos.

A Figura - 4.28 apresenta os eixos de movimentação desenvolvidos e inseridos na base da mesa de pinos, que estão em destaque. O *eixo Y* compreende as duas laterais da figura, sendo que na parte inferior da figura pode-se ver os motores de passo. O *eixo x* está ao centro da mesa, com o motor de passo acoplado ao lado direito. Já o *eixo z* e o motor de ativação estão na parte esquerda da figura, acoplados na peça de suporte do *eixo y*.



**Figura - 4.27:** Mecanismo do *eixo z* e de ativação da mesa de pinos

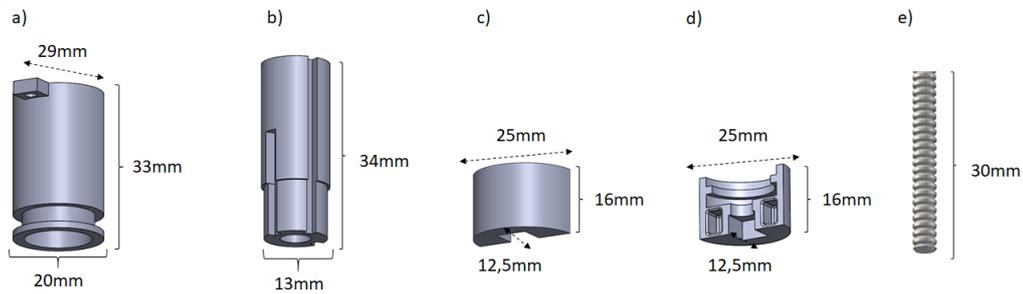


**Figura - 4.28:** Visão superior da base da mesa de pinos com os eixos de movimentação

De maneira geral, o grande desafio encontrado no desenvolvimento dos mecanismos foi atingir o alinhamento adequado para movimentação. Foram, ao longo da pesquisa, projetadas diferentes peças, até que se chegasse nas apresentadas nesta subseção. O desenvolvimento do *eixo z* também foi um desafio, pois era necessário um mecanismo que atuasse na subida/descida do motor de ativação, e que, ao mesmo tempo, tivesse um tamanho de ocupação pequeno, de maneira a atingir todos os pinos da mesa.

#### 4.2.4 Desenvolvimento dos pinos

Os pinos desenvolvidos para a mesa seguiram a mesma proposta da subseção 3.6.1, sendo composto por uma parte externa, uma parte interna, dois encaixes para a parte inferior, e uma barra roscada. A Figura - 4.29 exhibe tais partes e as suas respectivas dimensões. É importante destacar que a dimensão exibida na parte superior da peça a) refere-se ao comprimento considerando as “garras” para fixação da peça na mesa de pinos.

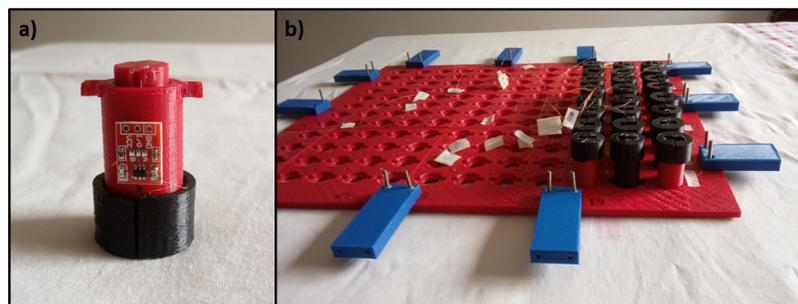


**Figura - 4.29:** Peças projetadas para os pinos e suas respectivas dimensões

A mesa estabelecida possui dimensões de  $12 \times 12$  pinos, sendo necessário a impressão e montagem de 144 pinos. Considerando o cronograma para realização do trabalho e os desafios encontrados para montagem dos eixos de movimentação (que levaram um tempo de execução além do previsto), notou-se que a confecção dos pinos também levaria um tempo além do estabelecido.

Tendo em vista que o objetivo deste estudo de caso era realizar um concebimento e avaliação inicial do modelo MannaHap, considerou-se adequado, embora não ideal, confeccionar apenas 64 pinos, dispostos quadraticamente na mesa de pinos, numa configuração de  $8 \times 8$ , haja vista as razões citadas no parágrafo anterior.

A Figura - 4.30 apresenta, na parte a), um pino confeccionado e montado. É possível notar, em sua peça externa, uma placa eletrônica, que é relacionada ao sensor *touch*, cuja utilização é descrita nas próximas subseções. Na parte b), tem-se a imagem de alguns pinos já fixados na mesa, cuja fixação foi realizada utilizando-se cola super adesiva.



**Figura - 4.30:** Pino confeccionado e processo de fixação na mesa de pinos

Além dos desafios relacionados ao tempo para confecção, a montagem dos pinos também foi um desafio. Todas as 64 barras roscadas de 30mm utilizadas foram preparadas manualmente, utilizando uma serra. A parte de rosca interna da peça, onde se aloca a barra roscada, não conseguiu ser impressa internamente (considerando a peça (b)

da Figura - 4.29), por questões de precisão da impressora, e ela também foi feita manualmente, com auxílio da própria barra roscada.

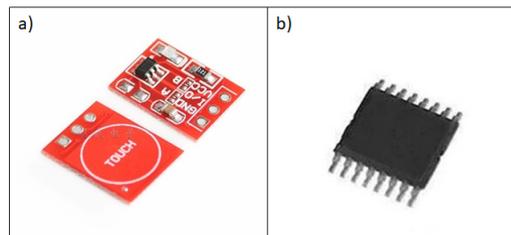
#### 4.2.5 Desenvolvimento do circuito da rede de multiplexadores e sensores *touch*

Para realizar a leitura pelo toque do usuário, objetivando prover um *feedback* auditivo, foi utilizado o sensor *touch* TTP223, dedicado para cada pino, totalizando assim o montante de 64 sensores. De modo a utilizar poucas portas do microcontrolador, foi projetada uma rede de multiplexadores em dois níveis.

Conforme o escopo definido para o estudo de caso, a configuração da mesa é de  $12 \times 12$  pinos, sendo, nesse caso, necessária a leitura de 144 sensores *touch*. Mesmo sendo confeccionados 64 pinos, optou-se por elaborar a rede de multiplexadores considerando os 144 sensores. Isto contribui para que, nos trabalhos futuros em que o restante dos pinos seja confeccionado, o circuito já esteja apto para realizar a leitura completa.

Para utilização no protótipo foram adquiridos multiplexadores MM74HC4051WMX, que possuem  $8 \times 1$  canais de entrada/saída e 3 canais de endereçamento. Considerando as fórmulas descritas na Equação 3.3 da subseção 3.6.4, o número de portas utilizadas é 10, e o número de multiplexadores é 21, sendo 18 no primeiro nível e 3 no segundo.

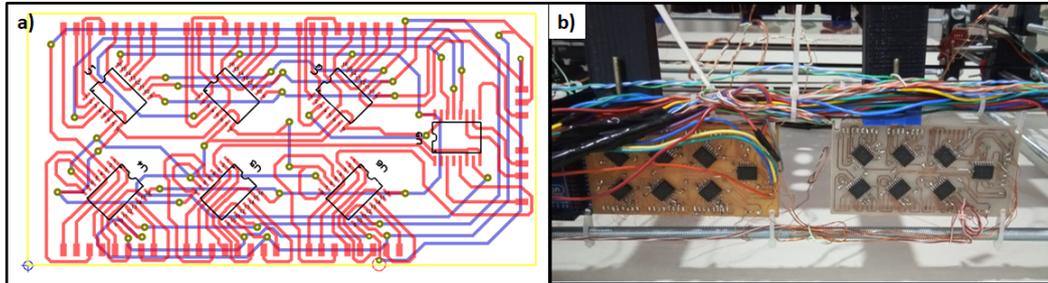
A Figura - 4.31 exhibe a placa de sensor *touch* (a) e multiplexador (b) utilizadas no protótipo.



**Figura - 4.31:** Sensor *touch* TTP223 e multiplexador MM74HC4051WMX, utilizados no protótipo

As placas *touch* foram anexadas diretamente nos pinos, previamente apresentado na Figura - 4.30. De modo a regular a sensibilidade do sensor, foi anexado em cada placa um capacitor de 22pF. Já para os multiplexadores, foi projetada uma placa de circuito impresso para sua inserção. Esta placa foi projetada utilizando o *software* proprietário

Proteus <sup>2</sup> Professional, versão 8. A Figura - 4.32 exibe o seu projeto (a) e o seu concebimento (b).



**Figura - 4.32:** Projeto e concebimento da placa de circuito impresso dos multiplexadores

Na imagem referente ao projeto (a), em amarelo estão os limites da placa, em vermelho as trilhas a serem impressas de um lado da placa, e em azul as trilhas do lado oposto. Em preto está o espaço alocado para os multiplexadores. Foram construídas três placas.

Conforme se observa na imagem, a placa possui, no total, sete multiplexadores, sendo seis do primeiro nível e um do segundo nível. Nessa configuração, cada multiplexador do segundo nível faz a “varredura” de leitura *touch* em apenas 6 dos 8 endereçamentos existentes.

Optou-se por essa configuração para otimização da leitura em paralelo dos sensores *touch*. Considere o total de 144 pinos e a configuração real dos multiplexadores: neste caso, dois multiplexadores do segundo nível responderiam pela leitura de 64 pinos cada, totalizando 128. Enquanto isso, o terceiro multiplexador do segundo nível responderia pela leitura de apenas 16 pinos. Já com esta configuração, cada multiplexador do segundo nível realiza a leitura de 48 pinos, facilitando a paralelização de leitura no microcontrolador.

Para realizar a impressão da placa, utilizaram-se os materiais e metodologia apresentados a seguir. Como materiais, foi utilizada uma placa de composição de fibra de vidro em que ambas as superfícies são compostas por uma camada de cobre e papel fotográfico do tipo *glossy*. O processo iniciou-se com a impressão do *design* do circuito no papel fotográfico. É importante realizar a impressão por meio de uma impressora a *laser*, pois é realizada a transferência do *tonner* contido na folha para a placa.

Devido à placa utilizar duas camadas, é necessário realizar o espelhamento da camada superior, para que na transferência o circuito fique em sua posição correta. Após a impressão, teve-se a necessidade de realizar o recorte da placa de fibra de vidro para que ficasse com as dimensões corretas da placa. Esse processo pode ser feito utilizando uma serra manual.

<sup>2</sup>Página do *software*: <https://www.labcenter.com/>. Acessada em 01 de fevereiro de 2019.

Em seguida, limparam-se as duas camadas da superfície para retirar toda a oxidação existente. Lavou-se com água corrente e, após sua secagem, foi aplicado álcool utilizando um papel toalha para garantir a retirada de toda possível gordura existente na superfície cobreada. Em seguida, recortou-se o papel em que foi impresso o circuito para que ficasse no tamanho exato da placa. Alinhou-se a folha recortada com a placa e utilizou-se fita crepe ou fita adesiva para fixar o papel à placa.

Para o processo de transferência, utilizou-se um ferro de passar doméstico. A placa, que já estava com papel *glossy* fixado, foi colocada em um superfície plana e, utilizando o ferro, aplicou-se pressão sobre a placa. Esse processo foi realizado para os dois lados placa, com duração de cerca de 2 minutos e meio.

Após esse processo, colocou-se a placa em um recipiente plástico com água em temperatura ambiente. O choque térmico causado ajuda o *tonner* a se desprender do papel e fixar-se em definitivo na camada de cobre da placa. Em seguida, com movimentos leves, foi retirado o papel.

Utilizou-se percloro de ferro para realizar a corrosão, ficando somente o cobre “protegido” pelo toner. Após a corrosão, lavou-se a placa em água corrente. Na sequência, furou-se a placa, e então, os componentes foram soldados. Por fim, as placas foram anexadas na mesa de pinos utilizando abraçadeiras de plástico.

#### 4.2.6 Integração entre os circuitos e componentes

Com a montagem e inserção de todos os componentes na mesa de pinos, foi necessário integrá-los em um único circuito controlador, na qual foi utilizado uma placa Arduino Mega 2560. Devido às dimensões da mesa de pinos, foi necessário realizar uma extensão no cabeamento dos motores de passo, na qual foram utilizados fios provenientes de cabos de par trançado.

Para integração das placas de sensores *touch* e as placas dos multiplexadores, bem como sua ligação nas portas do Arduino, foi utilizada uma fiação esmaltada AWG 32, por ser de pequena espessura e bem flexível, facilitando sua colocação entre os pinos, cujo espaço é reduzido.

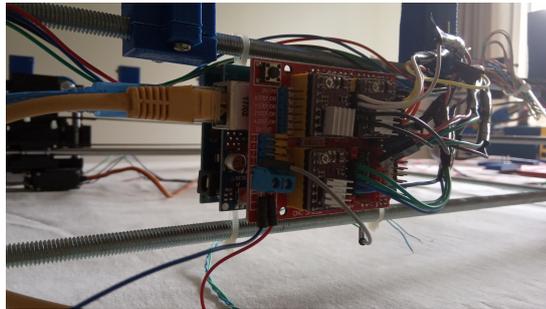
A fiação foi colada na ponta de cada pino, fixando-a com cola quente, transpassado pelo vão lateral do pino, soldada à placa *touch*, trilhada pela parte inferior da mesa e por fim soldada na placa dos multiplexadores.

Além da placa Arduino foram utilizadas mais duas placas, a saber: uma *Ethernet Shield* e uma placa controladora CNC. A *Ethernet Shield* habilita a conexão Ethernet

entre o Arduino e um dispositivo externo conectado via cabo. Já a placa controladora CNC gere a rotação dos motores de passo da mesa de pinos.

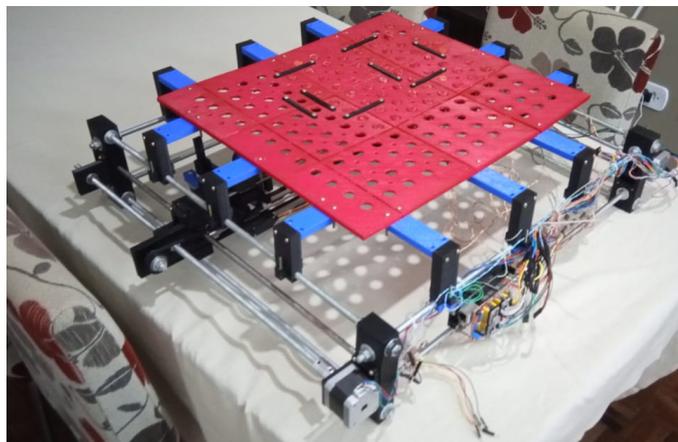
Para facilitar o código implementado na linguagem do microcontrolador do Arduino, foram utilizados *drivers* próprios para motores de passo na CNC, a saber, o driver DRV8825. No total, foram utilizados 3 *drivers*: um para controle dos dois motores do *eixo y*; um para controle do motor do *eixo x*; e um para controle do motor de ativação dos pinos. O servo motor não necessita de *hardware* adicional de *driver*.

Para alimentação do sistema, foi utilizada uma fonte proveniente de um computador *desktop*, que fornece as tensões de 12V e 5V, e, desse modo, atende as necessidades dos motores de passo (12V) e do servo motor (5V). Na Figura - 4.33 é possível visualizar a placa Arduino (mais interna) integrada com a *Ethernet Shield* (meio) e a placa CNC (à frente) com seus respectivos *drivers* e parte da fiação integrada às placas.



**Figura - 4.33:** Placas integradas da mesa de pinos

Tendo sido feita a integração entre os circuitos, finalizou-se o desenvolvimento da mesa, no que tange ao *hardware*. Na Figura - 4.34 é exibida a versão definitiva da mesa de pinos desenvolvida, numa vista superior, em perspectiva.



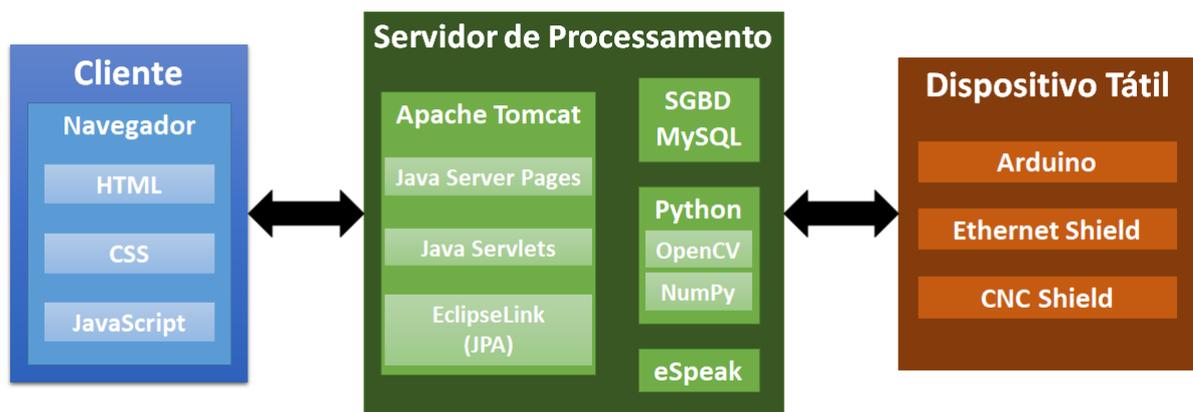
**Figura - 4.34:** Versão definitiva da mesa de pinos desenvolvida

### 4.3 Materiais e métodos do desenvolvimento do *software*

O *software* desenvolvido no protótipo foi modelado seguindo uma arquitetura cliente × servidor, de acordo com as premissas apresentadas na Seção 3.1. Nesta arquitetura, os componentes “usuário” e “dispositivo intermediário” constituem a parte cliente, o “servidor de processamento” constitui o servidor.

É importante estabelecer que, neste sistema, o “dispositivo tátil” atua como uma extensão da parte *cliente*, na qual o usuário interage com ele, cujas interações são processadas pelo servidor e transmitidas via áudio para o dispositivo intermediário.

De maneira a implementar esta arquitetura, foram utilizados uma série de aplicações e linguagens, apresentados na Figura - 4.35.



**Figura - 4.35:** Arquitetura cliente × servidor implementada, considerando linguagens e aplicações

A interação na parte *cliente* foi desenvolvida por meio de páginas *web*, na qual utilizaram-se as linguagens de marcação e de estilos HTML e CSS, além da linguagem de programação JavaScript. O Servidor de Processamento é composto por quatro módulos principais, a saber:

- servidor *web* Apache Tomcat<sup>3</sup>, versão 8.0.27;
- SGBD MySQL<sup>4</sup>, versão 6.3;
- *scripts* na linguagem Python, versão 2.7;

<sup>3</sup>Página: <http://tomcat.apache.org/>. Acessada em 01 de fevereiro de 2019

<sup>4</sup>Página: <https://www.mysql.com/>. Acessada em 01 de fevereiro de 2019

- e a aplicação de sintetização de voz eSpeak<sup>5</sup>, versão 1.48.15.

O Tomcat é um servidor *web* para linguagem Java mantido pela Apache, realizando o gerenciamento entre Java Server Pages (*front-end da aplicação*) e os Java Servlets (*back-end da aplicação*). Além disso, o servidor comunica-se com um SGBD MySQL por meio do EclipseLink<sup>6</sup>, um *framework* baseado em Java para comunicação com banco de dados.

De modo a tratar da representação intermediária da imagem digital de entrada bem como seu mapeamento para as dimensões da mesa de pinos, foram desenvolvidos *scripts* na linguagem Python, versão 3. Para tal, foram utilizadas bibliotecas que facilitam o processamento e manipulação de imagens, a saber: OpenCV<sup>7</sup>, que é uma biblioteca especializada em visão computacional; e o NumPy<sup>8</sup>, especializado na manipulação de arranjos e matrizes multidimensionais.

Já o eSpeak é uma aplicação que gera áudios em diversos idiomas baseado num texto de entrada. No sistema, é utilizado para geração do *feedback* auditivo para o usuário, baseado na região de toque do usuário na mesa de pinos.

Compondo o dispositivo tátil, foram desenvolvidos códigos na linguagem C++ modificada para a placa Arduino, além de bibliotecas para comunicação com a *Ethernet Shield* e a CNC.

Também com o objetivo de padronizar o código a ser desenvolvido, utilizou-se o padrão de arquitetura de *software Model-View-Controller* (MVC). Este padrão busca dividir uma determinada aplicação em três módulos de classes: a *View* representa a parte do sistema que interage diretamente com o usuário; o *Model* refere-se ao armazenamento e recuperação de dados; e o *Controller* realiza o gerenciamento entre as outras duas partes.

A Figura - 4.36 apresenta o diagrama de classes do protótipo de acordo com o padrão MVC. Na parte superior estão as classes relacionadas às *Views*, no centro as relacionadas aos *Controllers* e na parte inferior as relacionadas aos *Models*. As linhas entre as classes indicam a relação entre elas, sendo que relações entre *models* possuem cardinalidade, sugerindo sua composição. Nas subseções a seguir é apresentada uma visão geral de cada módulo e suas respectivas classes, detalhando a arquitetura.

---

<sup>5</sup>Página: <http://espeak.sourceforge.net/>, acessado em 01 de fevereiro de 2019

<sup>6</sup>Página: <https://www.eclipse.org/eclipselink/>, acessado em 01 de fevereiro de 2019

<sup>7</sup>Página: <https://opencv.org/>, acessado em 01 de fevereiro de 2019

<sup>8</sup>Página: <https://www.numpy.org/>, acessado em 01 de fevereiro de 2019

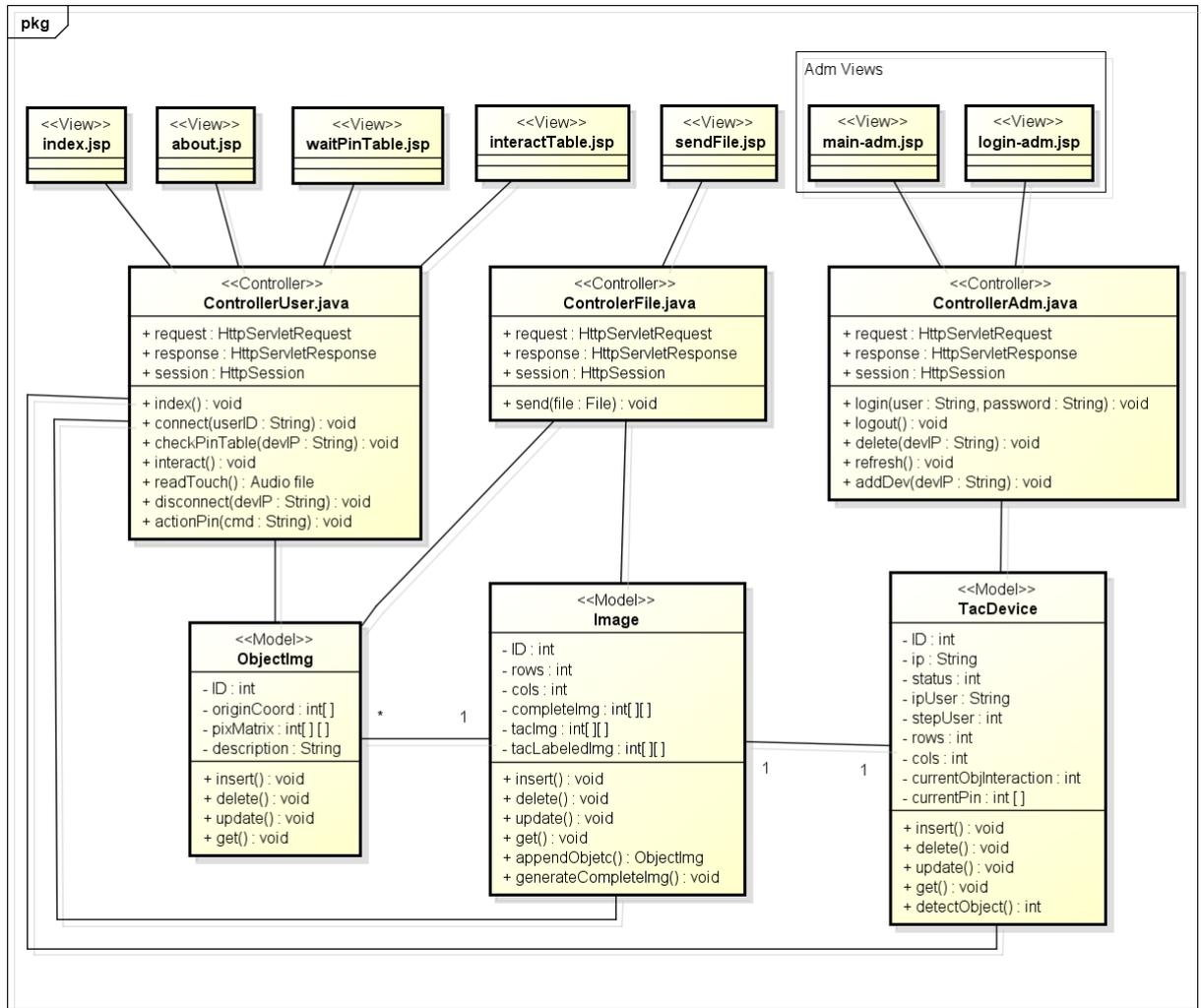


Figura - 4.36: Diagrama de arquitetura do *software* seguindo o padrão MVC

### 4.3.1 Desenvolvimento dos *Models*

As classes referentes ao *model*, expressas como entidades, são a representação dos dados a serem armazenados em banco de dados, de maneira a persistir e registrar as imagens e ações tomadas pelo usuário. Conforme apresentado na Figura - 4.36, foram implementadas três entidades, que são explanadas a seguir.

- **TacDevice:** entidade que modela as informações do dispositivo tátil. Tem uma relação de 1 para 1 para a entidade “Image”. Possui os seguintes atributos:
  - **ID:** identificador único do dispositivo, representado por um número inteiro positivo;

- **ip**: indica o endereço IP do dispositivo tátil vinculado, representado por uma String;
- **status**: indica o *status* atual de operação do dispositivo, representado por um número inteiro entre 1 e 5, correspondendo, respectivamente, a indisponível, disponível, usuário conectado, preparando pinos, e interagindo;
- **ipUser**: indica o endereço IP do usuário conectado ao dispositivo, representado por uma String;
- **stepUser**: armazena a etapa de interação do usuário no sistema, representado por um número inteiro entre 1 e 4, correspondendo, respectivamente, a não conectado, conectado ao dispositivo, enviando arquivo, e interagindo;
- **rows**: indica a dimensão em linhas da mesa de pinos, representado por um número inteiro positivo;
- **cols**: indica a dimensão em colunas da mesa de pinos, representado por um número inteiro positivo;
- **currentObjectInteraction**: indica o objeto atual que o usuário está interagindo, representado por um número inteiro. Inicialmente, possui valor 0, que corresponde à nenhuma interação;
- **currentPin**: indica a coordenada do pino atual no qual o eixo de ativação está posicionado, representado por um vetor de inteiros de duas posição, na qual a primeira indica a linha e a segunda a coluna. Inicialmente, possui valor (0,0), indicando o pino inicial.

Além dos métodos padrão de inserção, deleção, atualização e busca, esta entidade possui um método “detectObject”, que realiza a detecção do objeto de interação baseado na leitura dos sensores *touch*.

- **Image**: entidade que modela as informações de uma imagem digital, cuja representação intermediária foi submetida ao sistema pelo usuário. Tem uma relação de 1 para 1 com a entidade “TacDevice” e de 1 para  $n$  com a entidade “ObjectImg”. Possui os seguintes atributos:
  - **ID**: identificador único da imagem, representado por um número inteiro positivo;
  - **rows**: indica a dimensão da imagem em linhas (considerando pixels), representado por um número inteiro positivo;

- **cols**: indica a dimensão da imagem em colunas, representado por um número inteiro positivo;
- **completeImg**: representação completa da imagem de entrada, em níveis de cinza, representada por uma matriz de inteiros positivos;
- **tacImg**: representação completa da imagem mapeada para o formato tátil, representado por uma matriz de inteiros positivos;
- **tacLabeledImg**: representação alternativa da imagem no formato tátil, na qual os pixels são valorados de maneira correspondente ao objeto que estão associados. Embora não conste no modelo proposto do MannaHap, este atributo auxilia no processamento de detecção do objeto de interação.

Esta entidade possui dois métodos em específico, a saber: um para adicionar uma relação de um objeto com a imagem (“appendObject”) e um para geração da imagem completa, baseado em seus objetos (“generateCompleteImg”).

- **ObjectImg**: entidade que modela as informações dos objetos que compõem uma imagem digital. Esta entidade é parte componente de uma entidade “Image”. Possui os seguintes atributos:
  - **ID**: identificador único do objeto, representado por um número inteiro positivo maior que 0;
  - **originCoord**: identifica a linha e coluna iniciais correspondentes da imagem de entrada, sendo representada por um *array* de números inteiros de duas posições, na qual a primeira indica a linha e a segunda a coluna;
  - **pixMatrix**: indica a região do objeto, representado por uma matriz de inteiros, na qual os valores correspondem ao valor do pixel na imagem de entrada;
  - **description**: indica a descrição do objeto, representada por uma String. Esta descrição é utilizada posteriormente para sintetização do áudio, gerado pelo eSpeak;

### 4.3.2 Desenvolvimento das *Views*

Conforme observa-se na Figura - 4.36, foram desenvolvidas, ao todo, sete *Views* para o sistema, sendo 5 relacionadas ao uso operacional do MannaHap para um usuário DV e 2 para realizar o gerenciamento dos dispositivos táteis do sistema, podendo inclui-los, desvinculá-los e visualizar seu estado operacional. Estas duas últimas são consideradas como parte administrativa do sistema.

Todas as *Views* foram implementadas utilizando as linguagens descritas na Figura - 4.35, a saber: HTML, CSS e JavaScript. Dessa maneira, elas são expressas por meio de páginas *web* no formato JSP, que é o formato utilizado no gerenciamento do servidor Apache Tomcat. No desenvolvimento, procurou-se seguir as diretrizes de acessibilidade WCAG e eMAG na medida em que tais diretrizes se adequavam ao sistema proposto.

A seguir, as *views* são apresentadas com mais detalhes. As páginas *web* que as concebem podem ser observadas no Apêndice A.2.

- **login-adm.jsp**: apresenta a tela de login para acesso à área administrativa. Seu acesso é oculto para o usuário comum, sendo acessada apenas por meio da URL “/adm”. É composta por um formulário para preenchimento das credenciais de administrador, que é validado pelo “ControllerUser.java”;
- **main-adm.jsp**: disponível apenas mediante acesso autorizado das credenciais de administrador, exibe em uma tabela os dispositivos táteis vinculados ao sistema, informando seu ID, IP, *status*, IP do cliente conectado e uma opção para desvinculação do sistema. Na lateral direita, há um formulário para vinculação de um novo dispositivo tátil, devendo-se informar seu endereçamento IP e as dimensões de linhas e colunas referentes aos pinos;
- **index.jsp**: é a “tela de boas vindas” do sistema. Informa ao usuário se há um dispositivo tátil disponível para sua utilização. Caso haja, a conexão pode ser estabelecida por meio de um botão disponível na tela. Caso não haja, o sistema exibe uma mensagem solicitando ao usuário para tentar mais tarde;
- **about.jsp**: tela informativa para o usuário que traz informações sobre o que o sistema é e o objetivo, como é seu funcionamento e quem são os criadores;
- **sendFile.jsp**: disponível para o usuário apenas após conexão num dispositivo tátil, habilita a seleção de um arquivo para processamento do sistema. Neste protótipo, apenas arquivos JSON são aceitos, já no formato intermediário da imagem digital. Nesta tela o usuário tem a possibilidade, caso queira, de se desconectar do dispositivo tátil;
- **waitPinTable.jsp**: tela que exibe ao usuário, após a seleção do arquivo que contém a representação intermediária da imagem, uma mensagem de aguardo, informando que a imagem está sendo preparada na mesa de pinos e o tempo estimado para conclusão;

- **interactTable.jsp**: tela em que o usuário é redirecionado após o dispositivo tátil concluir a ativação dos pinos na mesa, representando a imagem. Ela informa ao usuário que o dispositivo tátil está pronto para interação. Conforme os objetos tocados são detectados e o áudio contextual é gerado, um *script* baseado em JavaScript reproduz o áudio. Ao fim da interação, o usuário tem a opção, por meio de botões, de encerrar a interação e submeter uma nova imagem, ou então se desconectar em definitivo do sistema.

### 4.3.3 Desenvolvimento dos *Controllers*

Para gerenciar as solicitações dos usuários pelas *Views* e as manipulações persistidas nos *Models*, foram desenvolvidas três classes *Controllers*, conforme apresenta a Figura - 4.36. É importante observar que todas estas classes possuem os mesmos atributos, de modo a manter o servidor Tomcat operando de maneira concisa:

- **request**: controla as ações e dados relacionados às requisições do usuário, como operações a serem processadas e dados enviados via formulário;
- **response**: controla as ações e dados relacionados às respostas a serem providas para o usuário, como URL's de redirecionamento;
- **session**: armazena e gerencia dados a serem persistidos e utilizados durante toda a conexão ativa do usuário, como endereço do dispositivo tátil e seu *status* operacional.

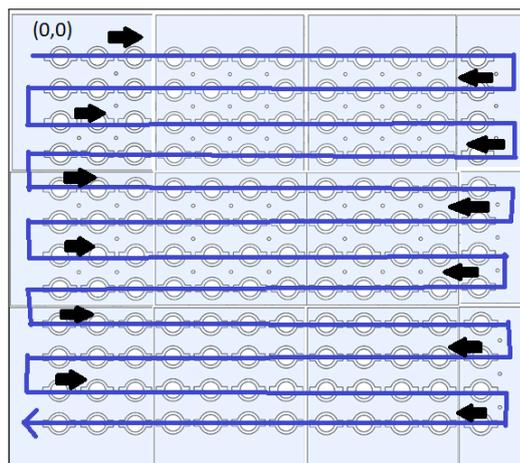
As classes desenvolvidas são detalhadas a seguir.

- **ControllerFile.java**: realiza o *upload* e processa as informações provindas do arquivo, submetido pelo usuário por meio da *view* `sendFile`, que contém a representação da imagem digital. Todo o processamento da imagem é tratado pelo método “`send`”, que persiste as informações gerais relativas à imagem num *model* “`Image`” e, após, persiste individualmente cada objeto em um *model* “`ObjectImg`”, criando a relação dos objetos com a imagem;
- **ControllerAdm.java**: gerencia as ações de um usuário com credenciais de administrador. Possui os seguintes métodos:
  - **login**: baseado em um nome de usuário e em uma senha enviada via formulário pela *view* “`login-adm.jsp`”, verifica se a tupla é válida. Caso seja, concede o acesso, redirecionando o sistema para a *view* “`main-adm.jsp`”. Caso contrário, envia uma mensagem de erro ao usuário;

- **logout**: remove o acesso à área administrativa, redirecionando o usuário novamente para a área de login;
  - **delete**: desvincula um dispositivo tátil do sistema mannaHap. Para realizar a desvinculação, é realizada uma pergunta adicional de confirmação, e em caso afirmativo, verifica se o dispositivo não está conectado com algum usuário;
  - **refresh**: atualiza a tabela com as informações sobre os dispositivos vinculados ao sistema;
  - **addDev**: vincula um dispositivo tátil ao sistema, verificando se o IP informado está conectado à rede e se é possível realizar uma comunicação com o mesmo utilizando o protocolo UDP.
- **ControllerUser.java**: gerencia as ações do usuário, solicitadas por meio das *views*, e transmite os processos dos *models* e também do dispositivo tátil. Trata os seguintes métodos:
- **index**: redireciona o usuário para a tela de utilização do sistema, verificando qual o *status* do dispositivo e qual a etapa de interação;
  - **connect**: realiza a conexão de um usuário por meio de seu IP com um dispositivo tátil disponível;
  - **checkPinTable**: após o envio de um arquivo de representação de imagem, verifica periodicamente a situação da mesa de pinos, informando ao usuário se a representação já está pronta ou não;
  - **interact**: confirma e registra que o dispositivo tátil está pronto para interação, enviando uma mensagem de aviso para o usuário;
  - **readTouch**: realiza as leituras de capacitância nos sensores *touch* por meio do microcontrolador Arduino, processando qual é o objeto de interação. Ao fim do processo, é retornado para o usuário o áudio contextual;
  - **disconnect**: desvincula o usuário à utilização do dispositivo tátil.
  - **actionPin**: envia ao dispositivo tátil comandos para rotação dos motores, de maneira a movimentar os eixos para ativação/desativação dos pinos.

O método “actionPin” envolve um processamento na qual é necessário conhecer a configuração corrente da mesa, quais os pinos que necessitam ser ativados/desativados, e em qual ordem isto deve acontecer.

Para desenvolvê-lo foi necessário, inicialmente, definir um “caminho” para ativação dos pinos. De maneira a depender o menor tempo possível para tal, foi adotada uma movimentação conforme a exibida na Figura - 4.37. Pode ser definido, neste caso, um padrão com relação à direção para percorrer as linhas: para as linhas de índice par, a movimentação é da esquerda para a direita (ponto de vista do usuário), para as de índice ímpar, da direita para a esquerda.



**Figura - 4.37:** Movimentação de acionamento dos pinos

No método, um laço itera pelas linhas e colunas considerando as dimensões da mesa, de modo a percorrer todos os pinos. Para realizar a movimentação e ativação dos pinos, segue-se o seguinte algoritmo:

1. Se o índice da linha do pino corrente é par:
  - (a) Se o pino atual não está na última coluna, realizam-se rotações no motor do *eixo x* para atingir o próximo pino, considerando a movimentação segundo o índice da linha;
  - (b) Se o pino atual está na última coluna, realizam-se rotações no motor do *eixo y*, para atingir o pino da linha seguinte;
2. Se o índice da linha do pino corrente é ímpar:
  - (a) Se o pino atual não está na primeira coluna, realizam-se rotações no motor do *eixo x* para atingir o próximo pino, considerando a movimentação segundo o índice;
  - (b) Se o pino atual está na primeira coluna, realizam-se rotações no motor do *eixo y*, para atingir o pino da linha seguinte;

3. atualiza-se o “currentPin”;
4. verifica-se o atributo “tacImg” na entidade da imagem a ser representada, nas coordenadas de “currentPin”. Caso o valor seja diferente de 0, é necessário levantá-lo / abaixá-lo:
  - (a) Rotaciona-se o servo motor do *eixo z* para cima;
  - (b) Rotaciona-se o motor de ativação para acionamento do pino;
  - (c) Rotaciona-se o servo motor do *eixo z* para baixo.

Embora o algoritmo apresentado seja para ativação dos pinos, ele é trivialmente modificado para desativação, sendo necessário apenas considerar a iteração, os sentidos de movimentação e rotação dos motores de maneira inversa. De modo a otimizar o processo, no momento de ativação, é verificado se o pino corrente é o último que necessita ser acionado, e em caso afirmativo, finalizado o processo.

#### 4.3.4 Desenvolvimento do código para o microcontrolador

O código para microcontrolador foi desenvolvido utilizando-se a IDE do Arduino, que auxilia os desenvolvedores da plataforma, realizando de maneira integrada compilação e envio do código para a placa, via comunicação serial. Foram utilizadas diferentes bibliotecas para o funcionamento do código, a saber:

- **Ethernet**: biblioteca do protocolo que atua na comunicação do microcontrolador com um dispositivo externo via protocolo de enlace Ethernet, considerando que uma placa *Ethernet Shield* está acoplada ao Arduino;
- **EthernetUDP**: permite o recebimento e transmissão de dados via *datagramas* do protocolo de transporte UDP;
- **SPI**: realiza a comunicação do microcontrolador com um dispositivo externo via conexão serial;
- **Servo**: gerencia a conexão, comunicação e rotação de servo motores conectados às portas lógicas da plataforma;
- **DRV8825**<sup>9</sup>: gerencia a conexão, comunicação e rotação dos motores de passo conectados à placa CNC e à placa de driver DRV8825 acoplados ao Arduino.

---

<sup>9</sup>Driver disponível em: <https://github.com/laurb9/StepperDriver/>, acesso em 20 de fevereiro de 2019.

Quanto a sua estrutura, o código é organizado em duas partes: instanciação, definição e inicialização de componentes (*setup*); e operação das funcionalidades do microcontrolador (*loop*).

Na primeira parte, definiram-se: as portas do microcontrolador relacionadas à rede de multiplexadores; as portas, angulação, número de passos e micropassos dos motores de passo; as portas e angulação do servo motor; e endereço MAC, IP e porta para a conexão Ethernet.

Quanto à segunda parte, o código concentra-se, inicialmente, em obter via UDP um datagrama enviado pelo servidor de processamento. Ao confirmar o recebimento, verifica-se a natureza dos dados provenientes: se é uma operação relacionada à movimentação de um eixo, ou se é uma operação de leitura da capacitância dos sensores *touch*.

Caso seja a movimentação de um eixo, é verificado no pacote a indicação de qual motor deve ser rotacionado, qual o sentido da rotação, e o quanto ele deve ser rotacionado. Após a operação, envia-se via UDP uma mensagem ao servidor, confirmando a movimentação.

No caso da operação ser de leitura da capacitância, as mesmas são lidas de maneira paralela, considerando o número de multiplexadores operáveis no segundo nível, e armazenador numa matriz. Ao fim, quando todas as capacitâncias foram lidas, os valores obtidos e armazenados na matriz são serializados e enviados via UDP para o servidor, que fará a desserialização.

Ao final de uma operação, o código retorna ao ponto de obtenção de um datagrama UDP, para iniciar um novo ciclo de operações.

## 4.4 Considerações gerais do protótipo

Este Tópico apresentou a prova de conceito da solução proposta neste trabalho, na qual desenvolveu-se um protótipo para o sistema MannaHap. Ele é constituído por um *hardware*, que implementa uma mesa de pinos para interação tátil, e um *software*, implementado seguindo uma arquitetura cliente × servidor no padrão de desenvolvimento MVC. Considerando o escopo definido, foram apresentados os materiais e métodos de desenvolvimento de *hardware* e *software*.

No que tange ao *hardware*, a elaboração de peças para o concebimento dos mecanismos de eixos mostrou-se um grande desafio. Conforme discutido na subseção 4.2.3, a precisão no alinhamento de movimentação das peças foi um fator determinante para a elaboração da mesa, na qual foram necessárias realizar algumas adaptações para garanti-la.

Um exemplo desta questão foi a movimentação desigual no *eixo y*, na tentativa de utilização de correias aliadas à rotação do motor, sendo adotada como solução a inserção

de barras roscadas em duas extremidades do eixo, na qual o movimento obtido passou a ocorrer de maneira adequada.

Devido à necessidade de despendir um tempo além do previsto em cronograma para solucionar tais questões, o desenvolvimento do *hardware*, em suas etapas seguintes, acabou prejudicado. Este aspecto é visível no período de impressão dos pinos, na qual foi possível a confecção de apenas 64 dos 144 pinos previstos.

No entanto, ao fim do desenvolvimento, obteve-se um protótipo de sistema háptico que implementa os conceitos estabelecidos pelo modelo MannaHap e, dessa maneira, está apto a ser utilizado e testado por usuários em potencial, no caso, deficientes visuais.

É de suma importância destacar a eficácia da impressora 3D utilizada para confecção das peças projetadas para a mesa de pino. Além de prover as peças à um baixo custo financeiro, quando comparado caso fossem obtidas de maneira comercial, ela representa uma autonomia para o pesquisador/desenvolvedor, fortalecendo a abordagem DiY, na qual “você constrói sua própria tecnologia”.

No próximo Tópico são abordadas as avaliações realizadas, de modo a verificar se a solução proposta neste trabalho, expressa pelo protótipo, atende as necessidades dos deficientes visuais no que tange à representação de imagens digitais, sendo uma tecnologia de baixo custo financeiro comparado às soluções existentes.

---

## Avaliações do estudo de caso

---

Este tópico apresenta as avaliações realizadas com o protótipo funcional que concebe as premissas estabelecidas pelo modelo MannaHap. Elas estão organizadas em três frentes:

- Avaliação de custo financeiro do desenvolvimento do protótipo;
- avaliação temporal de funcionamento do sistema, na qual tem-se como métrica o tempo para ativação dos pinos considerando diferentes imagens digitais;
- e realização de experimentos com usuários reais, objetivando-se analisar a acessibilidade, usabilidade e experiência de uso.

### 5.1 Avaliação de custo financeiro de desenvolvimento

Esta avaliação consistiu em discriminar, item por item, os custos relacionados à construção da mesa de pinos. De modo a facilitar a leitura e compreensão, agruparam-se os custos em quatro tabelas distintas, considerando diferentes partes da mesa.

A Tabela - 5.1 apresenta os custos da estrutura base, que envolvem as peças de sustentação e as de encaixe. A Tabela - 5.2 refere-se aos custos de construção dos eixos da mesa. A Tabela - 5.3 é relacionada aos custos dos pinos. A Tabela - 5.4 discrimina os custos de placas, circuitos e fiação utilizadas na mesa.

Nestas tabelas utilizou-se a referência numérica de figuras apresentadas neste texto de dissertação para indicar as peças que foram impressas utilizando a impressora 3D. É importante relatar que o custo unitário estabelecido para as peças impressas são uma

estimativa, considerando o consumo energético e a quantidade de filamento gasto para impressão.

Para o cálculo do consumo energético, levou-se em consideração o tempo despendido para impressão de uma determinada peça e, baseado nisso, o consumo em *watts* da impressora nesse período multiplicado pelo preço de custo especificado pela companhia elétrica do estado do Paraná, a saber, a Copel. Para o cálculo de custo de filamento, utilizou-se a milimetragem gasta na impressão por peça, indicada pelo *software* da impressora.

Tabela 5.1: Custo financeiro da estrutura base da mesa

Item	Medida	Qtde	Custo Unitário	Custo Total
Peça 4.2	un	4	R\$ 11,01	R\$ 44,03
Peça 4.5 - medida 1	un	6	R\$ 2,85	R\$ 17,12
Peça 4.5 - medida 2	un	6	R\$ 3,46	R\$ 20,75
Peça 4.4	un	12	R\$ 0,63	R\$ 7,52
Peça 4.6 - medida 1	un	6	R\$ 1,93	R\$ 11,60
Peça 4.6 - medida 2	un	6	R\$ 2,54	R\$ 15,21
Peça 3.9 - P1	un	1	R\$ 11,37	R\$ 11,37
Peça 3.9 - P2	un	2	R\$ 12,04	R\$ 24,09
Peça 3.9 - P3	un	2	R\$ 10,00	R\$ 20,00
Peça 3.9 - P4	un	1	R\$ 9,63	R\$ 9,63
Peça 3.9 - P5	un	1	R\$ 5,73	R\$ 5,73
Peça 3.9 - P6	un	1	R\$ 4,77	R\$ 4,77
Peça 3.9 - P7	un	1	R\$ 11,59	R\$ 11,59
Peça 3.9 - P8	un	2	R\$ 12,14	R\$ 24,27
Peça 3.9 - P9	un	1	R\$ 5,74	R\$ 5,74
Barra roscada 8mm	m	4,84	R\$ 5,00	R\$ 24,20
Porca 8mm	un	32	R\$ 0,30	R\$ 9,60
Arruela 8mm	un	32	R\$ 0,25	R\$ 8,00
Porca 3mm	un	72	R\$ 0,15	R\$ 10,80
Parafuso 3mm	un	72	R\$ 0,25	R\$ 18,00
<b>Custo total</b>				R\$ 304,02

Tabela 5.2: Custo financeiro dos eixos da mesa

Item	Medida	Qtde	Custo Unitário	Custo Total
Peça 4.9	un	2	R\$ 6,26	R\$ 12,53
Peça 4.14	un	1	R\$ 7,27	R\$ 7,27
Peça 4.12	un	2	R\$ 4,92	R\$ 9,84
Peça 4.9	un	2	R\$ 2,19	R\$ 4,38
Peça 4.10	un	2	R\$ 1,68	R\$ 3,36
Peça 4.13	un	2	R\$ 0,62	R\$ 1,25
Peça 4.15 topo	un	1	R\$ 1,74	R\$ 1,74
Peça 4.15 base	un	1	R\$ 1,88	R\$ 1,88
Peça 4.16 - 1	un	1	R\$ 1,67	R\$ 1,67
Peça 4.16 - 2	un	1	R\$ 1,36	R\$ 1,36
Peça 4.17	un	1	R\$ 0,94	R\$ 0,94
Peça 4.20	un	2	R\$ 0,64	R\$ 1,28
Peça 4.19	un	1	R\$ 1,43	R\$ 1,43
Peça 4.18	un	1	R\$ 0,14	R\$ 0,14
Peça 4.21	un	1	R\$ 1,51	R\$ 1,51
Parafuso 3mm	un	40	R\$ 0,25	R\$ 10,00
Porca 8mm	un	12	R\$ 0,30	R\$ 3,60
Arruela 8mm	un	12	R\$ 0,25	R\$ 3,00
Barra roscada 8mm	m	1,15	R\$ 5,00	R\$ 5,75
Barra lisa 8mm	m	2,4	R\$ 17,99	R\$ 43,18
Acoplamento Flexível	un	2	R\$ 12,00	R\$ 24,00
mola de compressão 8mm	un	2	R\$ 2,10	R\$ 4,20
rolamento linear 8mm	un	6	R\$ 7,90	R\$ 47,40
rolamento de esfera 608	un	2	R\$ 18,00	R\$ 36,00
Polia GT2 20 dentes aluminio	un	2	R\$ 9,90	R\$ 19,80
Correia dentada de 6mm	m	1,9	R\$ 15,90	R\$ 30,21
motor de passo NEMA 17	un	4	R\$ 79,90	R\$ 319,60
Servo motor	un	1	R\$ 12,70	R\$ 12,70
<b>Custo total</b>				<b>R\$ 610,02</b>

Tabela 5.3: Custo financeiro dos pinos

Item	Medida	Qtde	Custo Unitário	Custo Total
Pino parte interna	un	64	R\$ 6,26	R\$ 43,37
Pino parte externa	un	64	R\$ 7,27	R\$ 65,22
Pino encaixe 01	un	64	R\$ 4,92	R\$ 30,09
Pino encaixe 02	un	64	R\$ 2,19	R\$ 30,09
Barra roscada 6mm	m	2	R\$ 1,68	R\$ 6,00
Tubo de cola quente	un	3	R\$ 0,62	R\$ 4,50
Cola super adesiva	un	1	R\$ 1,74	R\$ 10,20
<b>Custo total</b>				R\$ 189,48

Tabela 5.4: Custo financeiro das placas e demais circuitos

Item	Medida	Qtde	Custo Unitário	Custo Total
Mux MM74HC4051WMX	un	21	R\$ 1,20	R\$ 25,20
Módulo Capacitor Touch	un	64	R\$ 0,45	R\$ 28,80
Placa Arduino Mega	un	1	R\$ 94,90	R\$ 94,90
Placa Ethernet Shield	un	1	R\$ 54,90	R\$ 54,90
Placa CNC Shield V3	un	1	R\$ 29,90	R\$ 29,90
Driver DRV8825	un	3	R\$ 18,90	R\$ 56,70
Placa de fibra de vidro 15x20	un	2	R\$ 15,60	R\$ 31,20
Capacitor 22pF	un	64	R\$ 0,12	R\$ 7,68
Papel fotográfico glossy	un	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
Fonte 200W 12V	un	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Fiação par trançado	m	5	R\$ 2,00	R\$ 10,00
Fiação esmaltada AWG 32	kg	0,1	R\$ 95,00	R\$ 9,50
<b>Custo total</b>				R\$ 389,78

Com as informações apresentadas nas tabelas, tem-se que **a estimativa de custo para a mesa de pinos desenvolvida no estudo de caso deste trabalho foi de aproximadamente R\$ 1493,30.**

Observando as partes separadamente, nota-se que o maior custo concentrou-se na construção dos eixos da mesa, correspondendo à aproximadamente 40,8 % do custo total

de desenvolvimento. Ao se analisar especificamente esta parte, averigua-se ainda que o custo com os motores de passo representaram 52,3% e, nos gastos gerais, 21,4%.

Ao se observar o custo relacionado a todas as peças que foram impressas, o gasto despendido foi de R\$ 452,78, o que representa cerca de 30,3% do montante. Somados aos motores de passo, correspondem à aproximadamente metade dos custos.

É possível ainda fazer uma estimativa do custo da mesa caso fossem confeccionados os 144 pinos. Neste caso, haveria acréscimo em todos os itens da Tabela - 5.3. A estimativa indicou um custo total de R\$ 422,66, equivalente a um aumento de aproximadamente 123% do gasto com 64 pinos. Neste caso, **o custo total da mesa com 144 pinos seria de R\$ 1726,48**, representando um aumento de aproximadamente 15,6%.

A Tabela - 5.5 apresenta uma comparação financeira de dispositivos táteis com o protótipo MannaHap. Foi considerada a cotação de 15 de março de 2019, na qual U\$ 1,00 equivalia à R\$ 3,82 e 0,88€. Faz-se importante dizer que para os quatro primeiros dispositivos apresentados, o valor apresentado refere-se à comercialização do produto, o que não indica, necessariamente, o seu custo de fabricação.

Tabela 5.5: Comparação financeira de dispositivos táteis com o MannaHap

Dispositivo tátil	Dimensões	Motores dedicados?	Valor (U\$)
Brailiant <sup>1</sup>	6 x 28	Sim	895,00
Focus 14 Blue <sup>2</sup>	6 x 28	Sim	1295,00
Focus 40 Blue	6 x 80	Sim	2995,00
BrailleDis	60 x 104	Sim	51135,00
LineSpace	-	Não	400,00
<b>MannaHap</b>	<b>12 x 12</b>	<b>Não</b>	<b>451,95</b>

Na tabela, tem-se cinco dispositivos táteis, além do MannaHap. Os três primeiros são produtos comerciais voltados para a representação de texto em Braille. O BrailleDis é uma ferramenta desenvolvida pela companhia alemã METEC<sup>3</sup>, cujo valor de aquisição é informado no trabalho de Namdev e Maes (2015). Já o LineSpace é a proposta apresentada por Swaminathan et al. (2016), explanado na seção 2.6. Os valores considerados para o MannaHap seguem a estimativa de 144 pinos confeccionados.

<sup>1</sup>Disponível : <https://irie-at.com/product/brailiant-bi14/>, acesso em 15 de março de 2019

<sup>2</sup>Disponível em: <https://store.freedomscientific.com/>, acesso em 15 de março de 2019

<sup>3</sup>Disponível em: <http://hyperbraille.de/>, acesso em 15 de março de 2019

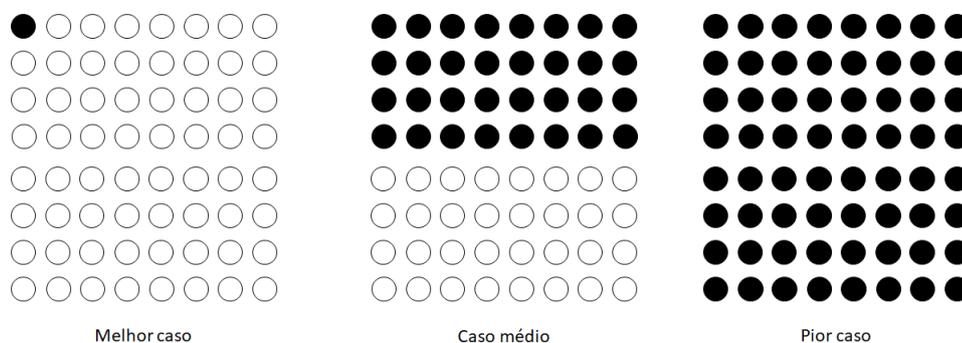
Nota-se que o MannaHap é o dispositivo com o menor custo ao considerar apenas os baseados em matriz de pinos. As duas ferramentas mais acessíveis financeiramente são as que não possuem motores dedicados para cada pino. É válido ressaltar que o LineSpace, embora não tenha uma matriz de pinos, utiliza-se de um mecanismo de eixos para criar as representações táteis, de maneira semelhante ao MannaHap.

Considerando as análises realizadas das partes componentes do MannaHap, avalia-se que os motores de passo representam uma parcela considerável dos custos do sistema, o que pode justificar o valor elevado dos dispositivos táteis relacionados apresentados na Tabela - 5.5. A impressão das peças também resultou numa parcela dos custos, indicando que, caso seja projetada uma mesa de dimensões maiores, o custo tende a aumentar significativamente.

## 5.2 Avaliação temporal de funcionamento da mesa de pinos

A avaliação temporal de funcionamento da mesa de pinos teve como objetivo analisar o seu comportamento baseado no tempo despendido para acionamento/desacionamento dos pinos, considerando diferentes configurações. Inicialmente, discutiu-se sobre a questão: “quais as configurações da mesa de pinos que abrangem, de maneira geral, as representações possíveis, permitindo assim uma avaliação adequada?”

Para responder à essa pergunta, buscaram-se referências na área de Projeto e Análise de Algoritmos, mais especificamente, nas maneiras de avaliar a complexidade de tempo de um algoritmo. Uma das maneiras de se avaliar é por meio da notação assintótica, considerando o melhor, o pior e o caso médio para execução. Desse modo, foram tomadas três representações de imagem digital, exibidas na Figura - 5.1.



**Figura - 5.1:** Configurações adotadas para avaliação temporal da mesa de pinos

No melhor caso, a representação possui apenas um pino acionado, o primeiro, considerando as coordenadas de linhas e colunas. No caso médio, a representação possui metade dos pinos acionados. No pior caso, todos os pinos estão acionados.

Com as configurações estabelecidas, formulou-se a representação intermediária no formato JSON para submissão no sistema. A metodologia de avaliação seria então, baseada na cronometragem de tempo para cada configuração. No entanto, uma série de adversidades foram detectadas, dificultando a realização deste tipo de avaliação. Elas são descritas a seguir.

Ao se iniciar a avaliação para o caso médio, notou-se que, para alguns pinos, o encaixe da peça do motor de ativação não era realizado de maneira correta e, conseqüentemente, o pino não era rotacionado, realizando sua subida/descida. Ainda foi percebido que alguns pinos cujo acionamento era anteriormente realizado de maneira correta, passavam a ter problemas de encaixe.

Esse comportamento foi tido como anormal, visto que o projeto das peças da mesa possuem o mesmo espaçamento entre os pinos. Após uma inspeção na mesa, notaram-se os fatores que causavam tais adversidades:

- a inserção manual dos pinos na mesa utilizando fita super adesiva gerava desalinhamento entre um pino e outro;
- alguns encaixes entre as peças da mesa deixavam um espaçamento além do estabelecido, devido ao nível de precisão da impressão;
- ao se fixar todos os pinos na mesa, o peso empregado por eles geraram um desnível entre o centro e as bordas da mesa, na qual estavam as peças de sustentação.

Com isso, o algoritmo desenvolvido de mapeamento e acionamento dos pinos não surtia o efeito esperado na mesa. A única solução possível para corrigir tais problemas seria um mapeamento individual de cada pino, com rotações específicas para adequação do encaixe em sua parte inferior.

Porém, considera-se que tal solução é inviável, pois perde-se a generalização de algoritmo proposto e, além disso, para cada mesa construída, o mapeamento individual teria que ser realizado. Desse modo, considera-se como prioridade em trabalhos futuros uma melhor análise para solucionar tal desafio.

Mesmo com os problemas advindos, foi realizada uma avaliação temporal de funcionamento, que fornece uma estimativa de tempo para representação da imagem. Para tal, foi observado individualmente o tempo para execução de padrões de movimentação dos eixos. Eles são descritos na sequência.

- deslocamento entre colunas: 3 segundos;
- deslocamento entre linhas: 5 segundos;
- deslocamento de subida/descida: 0,5 segundos;
- rotação para acionamento do pino: 3 segundos.

Obtidos estes valores, foi possível estabelecer uma equação para cálculo do tempo total de acionamento:

$$T = 3n_{dc} + 5n_{dl} + 4n_{pa} \quad (5.1)$$

Sendo que  $n_{dc}$  é o número de deslocamentos entre pinos numa coluna,  $n_{dl}$  o número de deslocamentos entre pinos numa linha e  $n_{pa}$  é o número de pinos a ser ativado. Os valores de  $n_{dc}$  e  $n_{dl}$  podem ser obtidos da seguinte maneira (considera-se que o índice das linhas e colunas começa em 0):

$n_{dl}$  = índice da linha em que está o último pino ( $p_{ult}$ ) a ser acionado (considerando o “caminho” estabelecido na Figura - 4.37).

- Se  $n_{dl}$  é par:

$$n_{dc} = n_{dl} \times col + i_{col}(p_{ult})$$

- Se  $n_{dl}$  é ímpar:

$$n_{dc} = n_{dl} \times col + col - i_{col}(p_{ult})$$

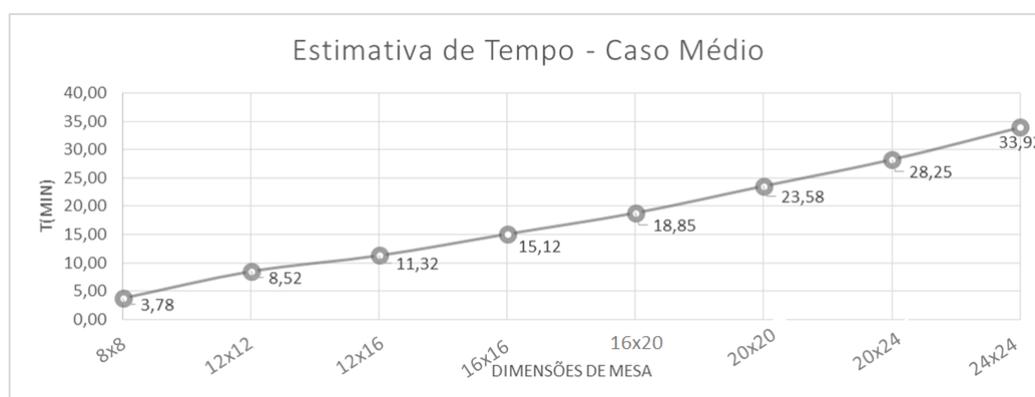
Na qual  $col$  é o valor máximo de índice para uma coluna e  $i_{col}(p_{ult})$  é o índice da coluna em que está o último pino a ser acionado. Com as equações estabelecidas, foi calculada a estimativa de tempo para acionamento nas três configurações tratadas, apresentado na Tabela - 5.6.

Tabela 5.6: Estimativa de tempo de ativação dos pinos para as configurações propostas

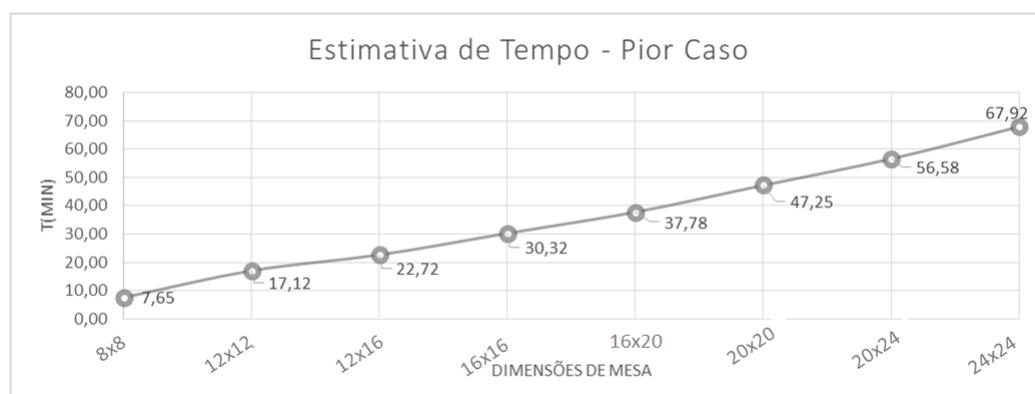
Configuração	ndc	ndl	npa	T(segundos)
Melhor caso	0	0	1	4
Caso médio	28	3	32	227
Pior caso	56	7	64	459

Pela tabela, o melhor caso leva 4 segundos para concluir a configuração, pois é apenas o tempo de subida do pino (0,5 segundos), rotação (3 segundos), e descida (0,5). Pelas equações estabelecidas, nota-se que, independentemente das dimensões da mesa de pinos, ele levará sempre o mesmo período de tempo.

Já para o caso médio, a estimativa de tempo foi de 3 minutos e 47 segundos. Para o pior caso, 7 minutos e 39 segundos. Foi realizado uma estimativa de tempo para o caso médio e pior caso considerando outras dimensões possíveis para a mesa de pinos. Os gráficos são apresentados na Figura - 5.2 e Figura - 5.3, respectivamente.



**Figura - 5.2:** Estimativa de tempo (minutos) para o caso médio, considerando diferentes dimensões de mesa de pinos



**Figura - 5.3:** Estimativa de tempo (minutos) para o pior caso, considerando diferentes dimensões de mesa de pinos

Comparando os gráficos, nota-se que o tempo no pior caso é aproximadamente o dobro do caso médio, o que era um comportamento esperado. Ao se analisar o tempo despendido no pior caso para a mesa nas dimensões em que foi construída no protótipo, o pior caso tem uma estimativa de cerca de 17 minutos. Para uma mesa projetada com o dobro dimensional ( $24 \times 24$ ), o tempo ultrapassa 1 hora.

Pelas estimativas, avalia-se que o tempo despendido para ativação dos pinos tende a ser um problema durante a experiência de uso do sistema, considerando representações densas (muitos pinos ativados). Exemplificando, um usuário utilizando uma mesa de pinos de dimensões  $24 \times 24$  certamente não aguardará por mais de 1 hora para poder interagir com a mesa.

Assim, a otimização do tempo para ativação dos pinos é uma questão a ser investigada em trabalhos futuros. Uma possível melhoria a ser feita é a inserção de *eixos*  $x$  em paralelo, o que ocasionaria um aumento no custo de produção da mesa. Para estas questões, será necessário ponderar o custo  $\times$  benefício entre uma mesa com maior número de motores e menor tempo de ativação ou uma mesa com menor número de motores e maior tempo de ativação.

### 5.3 Experimentos com usuários reais

A realização de experimentos com usuários reais teve como objetivo avaliar três critérios principais, a saber: i) a acessibilidade do sistema, baseado nas diretrizes WCAG e eMAG; ii) a usabilidade do sistema, baseado nas diretrizes de Nielsen (Nielsen, 2001); iii) efetividade e experiência de uso da ferramenta.

Experimentos com usuários reais envolvem questões éticas a serem tratadas, sempre propiciando benefícios e riscos (por menores que sejam) aos colaboradores. Desse modo, os envolvidos nesta pesquisa, em colaboração com os envolvidos na pesquisa relacionada ao MannAR, submeteram conjuntamente um projeto com um protocolo de experimentos para o Comitê Permanente de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (COPEP) da Universidade Estadual de Maringá.

Este projeto, intitulado “Tecnologias Assistivas de Imagens Digitais para Deficientes Visuais”, foi aprovado pelo COPEP no dia 20 de dezembro de 2018, com número de parecer de aprovação 3.098.506 (Anexo B.1).

A metodologia estabelecida para experimentação consistia nas seguintes etapas:

1. **recrutamento de voluntários:** os voluntários deveriam possuir baixa visão profunda, cegueira parcial ou total;
2. **divisão amostral:** os voluntários seriam divididos em dois grupos: pessoas que cursam ou cursaram graduação na área de computação, e pessoas que não cursaram;

3. **treinamento:** se realizaria um treinamento com os voluntários para utilização das tecnologias assistivas desenvolvidas, explicando o funcionamento básico e os objetivos das ferramentas;
4. **utilização da tecnologia MannAR:** realização dos experimentos envolvendo esta ferramenta;
5. **utilização da tecnologia MannaHap:** realização de um segundo experimento envolvendo esta ferramenta;
6. **aplicação de questionários de avaliação:** para cada ferramenta utilizada, seriam aplicados questionários para avaliar os itens propostos na pesquisa;
7. **análise dos dados:** a análise dos dados obtidos com os experimentos seria realizada de maneira heurística. Baseado nas respostas do questionário, os dados seriam compilados de maneira qualitativa, considerando uma escala de aproveitamento / aceitação de cada um dos itens avaliados.

O universo de voluntários considerados para o experimento é pequeno, ainda mais quando considerada apenas uma região geográfica específica, como a cidade de Maringá. Com o objetivo de auxiliar no recrutamento de voluntários, contatou-se o Programa Multidisciplinar de Pesquisa e Apoio à Pessoa com Deficiência e Necessidades Educativas Especiais da UEM (PROPAAE-UEM), que é uma entidade que atende deficientes visuais.

A entidade prontamente apoiou a pesquisa e a realização dos experimentos, atuando como intermediadora para recrutamento dos voluntários. Foi repassado aos envolvidos na pesquisa o contato dos deficientes visuais atendidos pelo programa, totalizando seis possíveis voluntários. Destes, um possuía deficiência visual total e cinco possuíam baixa visão.

Realizado o convite via e-mail, apenas duas pessoas retornaram o e-mail, aceitando o convite para participar o experimento. Ambos possuíam baixa visão. Devido à amostra para os experimentos ser muito pequena e limitada, a divisão amostral em pessoas que cursaram ou não graduação na área da Computação não foram abordadas, de maneira a preservar o anonimato dos participantes.

Após agendamento com os dois voluntários, os experimentos com as tecnologias tiveram início. Embora os experimentos tenham sido realizados em parceria com a pesquisa MannAR, não serão abordados e discutidos neste trabalho os experimentos e resultados obtidos com tal ferramenta.

O experimento ocorreu no laboratório Manna, no Departamento de Informática da Universidade Estadual de Maringá. Foram previamente preparadas a mesa de pinos e um

*notebook* para utilização no experimento, que possuía a seguinte configuração: sistema operacional Windows 10 versão Professional; processador i7 2.8 Ghz; 16GB de memória RAM; leitor de tela NVDA.

Iniciando o experimento, foi realizado o treinamento da ferramenta, explanando o objetivo geral do MannaHap, seus componentes e a realização dos testes. Na utilização da ferramenta, foram abordadas duas imagens digitais, cuja disposição na mesa de pinos pode ser verificada no Apêndice A.3.

Foi estabelecida a seguinte metodologia de utilização da ferramenta: i) contato inicial com o sistema; ii) envio da primeira imagem; iii) interação com a mesa de pinos; iii) envio da segunda imagem; iv) interação com a mesa de pinos. Ao fim da utilização, os voluntários receberam um *link* para preenchimento *online* dos questionários.

Devido às dificuldades relacionadas ao acionamento automático dos pinos por meio do mecanismo de eixos, conforme explanado na Seção 5.2, a configuração dos pinos para representação das imagens foi realizada de maneira manual, pelos aplicadores do experimento.

A Figura - 5.4 exibe a realização dos experimentos com os usuários deficientes visuais. A imagem está “pixelizada” na região do rosto dos voluntários, de maneira a garantir o anonimato de participação. Na imagem a), tem-se o usuário utilizando a interface *web* do *mannaHap*. Já na imagem b), o usuário está realizando a interação com a mesa de pinos.



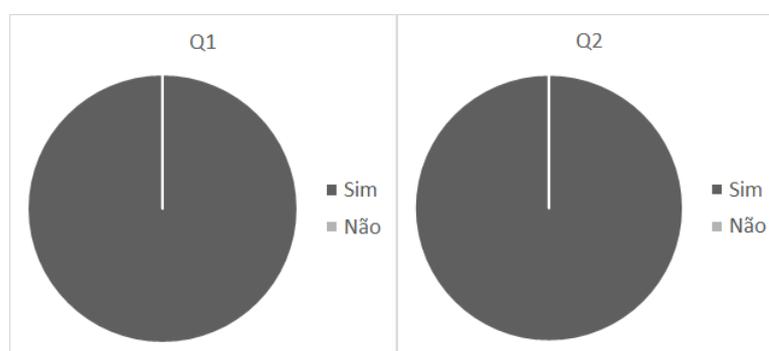
**Figura - 5.4:** Realização dos experimentos com usuários reais

Após a realização dos experimentos, os usuários responderam, por meio de formulário *online*, quatro questionários. A análise das respostas destes questionários são realizadas nas próximas subseções.

### 5.3.1 Avaliação de experiência de uso

A avaliação para efetividade de uso da ferramenta foi realizada por meio de sete questões elaboradas de maneira heurística. Elas podem ser lidas, na íntegra, no Apêndice A.4. As questões Q1 e Q2 verificaram a efetividade de identificação dos objetos na interação tátil, cuja resposta era baseada em "sim" ou "não".

A Figura - 5.5 apresenta os resultados obtidos nestas questões. Pode-se observar que ambos os usuários responderam positivamente para as duas questões. Isso indica que todos os objetos representados na mesa foram tocados, identificados e compreendidos.

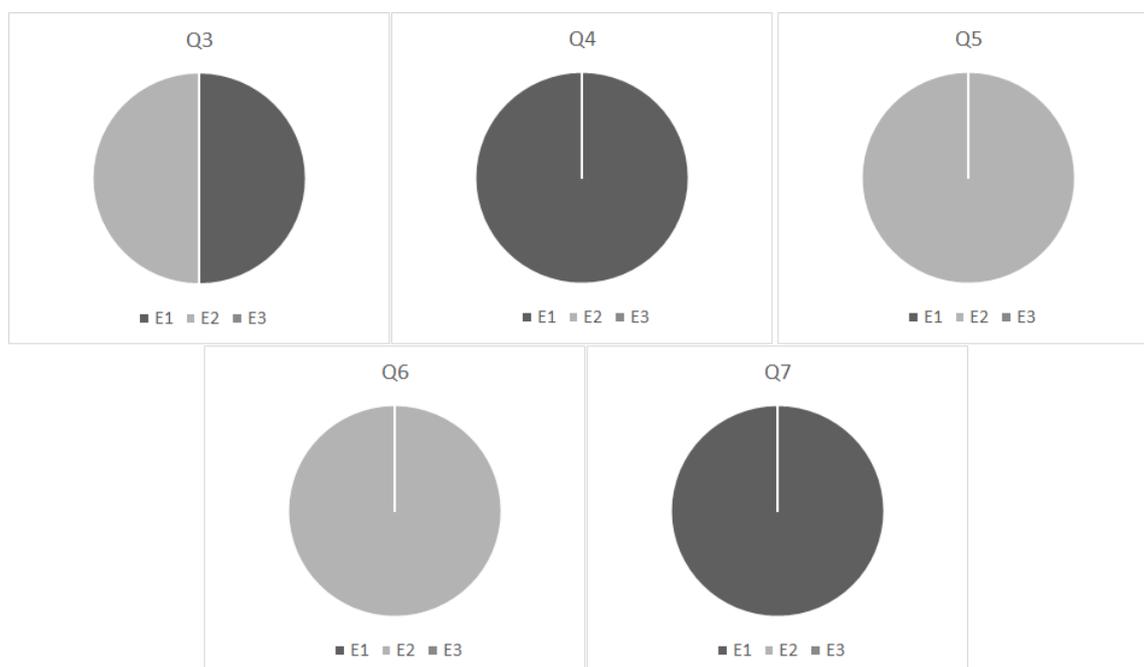


**Figura - 5.5:** Resultados da experiência de uso das questões Q1 e Q2, com opções de resposta “Sim” ou “Não”

As questões de Q3 à Q7 verificaram a experiência de uso quanto à necessidade de ajuda externa para utilização da ferramenta, representação dos objetos, dimensão e espaçamento da mesa de pinos. Estas questões possuíam 3 opções de resposta, considerando graus de satisfatoriedade do item tratado. Ao fim, o voluntário poderia deixar comentários gerais sobre a experiência de uso.

A Figura - 5.6 exibe os resultados obtidos para as questões de Q3 à Q7. É importante notar que, como as opções de resposta, embora todas em 3 níveis de satisfatoriedade de experiência de uso, possuem texto diferente para se adequar à questão. Desse modo, elas estão representadas no gráfico pelos rótulos E1, E2 e E3, sendo E1 o grau de melhor experiência de uso e E3 o de pior experiência.

A questão Q3 foi a única a ter divergências de respostas, considerando os dois usuários. Um deles respondeu que não precisou de nenhuma ajuda durante a utilização do sistema, já o outro respondeu que precisou de ajuda parcialmente, principalmente no início da utilização. Mesmo necessitando de ajuda parcial, este fator da experiência de uso não afetou as demais questões, quando comparado com a experiência do usuário que não necessitou de ajuda, conforme é visto a seguir.



**Figura - 5.6:** Resultados da experiência de uso das questões Q3 a Q7, com 3 graus de satisfatoriedade na experiência de uso

As demais questões tiveram respostas unânimes quanto ao grau de experiência de uso. Para as questões Q4 e Q7, a experiência foi a melhor possível. Desse modo, há um indicativo de que tanto a representação das figuras geométricas quanto o espaçamento entre os pinos estavam adequados, não influenciando negativamente a utilização do MannaHap.

Já para as questões Q5 e Q6, a satisfabilidade de experiência teve um grau médio, na qual os participantes indicaram que o *feedback* auditivo ocorria com um *delay* considerável após o toque e que, embora não tenha sido um problema para o experimento, o tamanho da mesa de pinos é um fator que afeta a experiência de uso caso o dispositivo fosse utilizado no dia-a-dia.

Dentre os comentários gerais sobre esta avaliação, destacam-se duas arguições que podem ser investigadas em trabalhos futuros:

*“Acredito que os pinos poderiam ter uma cor destacada (em contraste) da cor da mesa, pois facilita a visualização para pessoas de baixa visão.”*

*“Quanto à resposta sonora, (...), poderia ter um botão extra em algum ponto da mesa que, quando pressionado, dá o feedback sonoro sobre a figura tocada.”*

De um ponto de vista analítico, pode ser considerado que os participantes tiveram, no geral, uma boa experiência de uso. Um dos pontos fundamentais do sistema, que é a

representação de imagens digitais e seus objetos, foi um aspecto com avaliação positiva máxima.

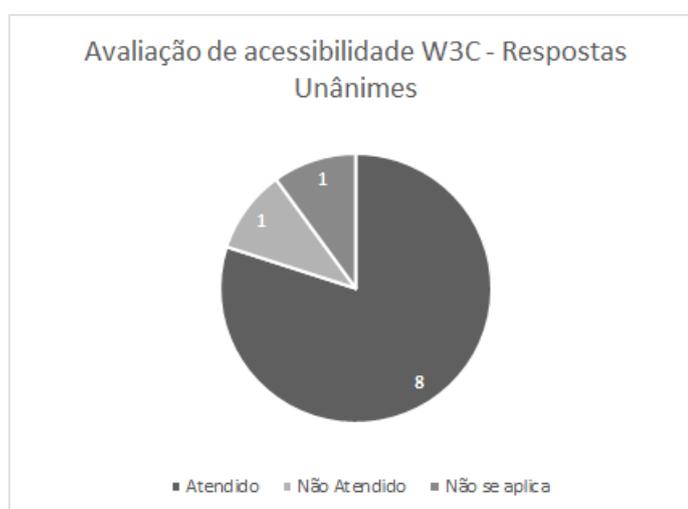
Com relação aos aspectos que necessitam ser melhorados, o atraso causado para o *feedback* auditivo pode ter ocorrido por diferentes fatores, a saber: a sensibilidade de leitura do sensor não está adequada ao toque que é realizado; a cola quente utilizada para fixação do fio de capacitância na ponta do pino causa interferência na leitura do toque; o processamento do áudio pelo eSpeak e transmissão para o usuário está consumindo um tempo além do esperado.

Já a dimensão da mesa de pinos é um aspecto que pode ser tratado no desenvolvimento de novos dispositivos. Um provável desafio a ser solucionado para mesas com tamanho reduzido é o alinhamento e movimentação dos mecanismos de eixo, que, conforme visto na seção 5.2, é uma questão de pesquisa para os próximos trabalhos.

### 5.3.2 Avaliação de acessibilidade

A avaliação de acessibilidade foi realizada por meio do questionário provido pela W3C, referente ao atendimento das diretrizes WCAG, que pode ser visto no Anexo B.2. Embora também haja uma avaliação relacionada às diretrizes eMAG, ela não foi aplicada devido a estas diretrizes serem uma especialização do WCAG e, desse modo, as avaliações possuem muitos aspectos em comum.

No total, há 12 diretrizes, nas quais o usuário informa se elas estão sendo atendidas, não atendidas ou elas não se aplicam ao sistema especificado. Destas, 10 tiveram respostas unânimes dadas pelos dois participantes, que podem ser observadas na Figura - 5.7.



**Figura - 5.7:** Resultados da avaliação de acessibilidade, considerando respostas unânimes

Destas respostas, 8 foram avaliadas como totalmente atendidas. A diretriz 1.2 - Mídia Dinâmica ou Contínua foi avaliada como não se aplicando ao sistema, o que é condizente com o apresentado, já que o sistema não possui conteúdos de vídeo para serem exibidos em formas alternativas.

Já a diretriz 1.4 - Distinguível, foi avaliada como "Não Atendida". Esta diretriz é relacionada ao discernimento de conteúdo por meio do contraste entre cores, que são comumente expressos por *layouts* alternativos em alto-contraste. Este aspecto facilita a compreensão de conteúdo em *sites* para pessoas com baixa visão. Esta característica não está presente no sistema desenvolvido, e é uma demanda a ser atendida em trabalhos futuros.

Duas diretrizes não tiveram uma resposta unânime dos participantes, a saber: diretriz 3.2 - Previsível e diretriz 3.3 - Assistência na inserção de dados. Para a primeira, obteve-se uma resposta “atendido” e outra “não se aplica”. Para a segunda, um “atendido” e um “não atendido”.

A diretriz 3.2 trata da funcionalidade das páginas que são apresentadas ao usuário, na qual não pode haver um comportamento inesperado das mesmas. Para este caso, não foi possível avaliar os motivos que levaram um dos participantes a considerar que a diretriz não se aplicava ao sistema, já que a interação primária se deu por meio das páginas *web*.

Já a diretriz 3.3 trata da assistência prestada pelo sistema na inserção de dados, principalmente no preenchimento de formulários. Considerando o sistema desenvolvido, há apenas duas páginas que apresentam formulários: a de acesso à área administrativa e a de vinculação de novos dispositivos táteis.

Revisitando estes formulários, notou-se que os campos possuem *placeholders* indicativos do conteúdo que deve ser inserido, e que caso seja preenchido com um dado fora do formato (por exemplo, um conjunto de letras onde deve haver apenas números), a página informa o usuário do erro. Ambos os formulários também apresentam mensagens de erro caso a operação realizada não ocorra conforme o esperado.

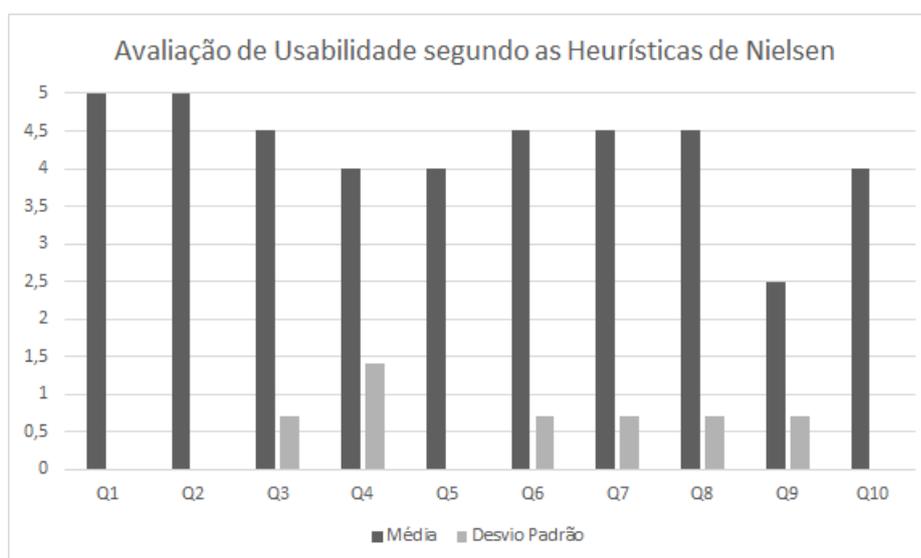
De maneira geral, a avaliação realizada constatou que o sistema desenvolvido, mesmo não tendo as características e objetivos comuns de um sistema *web* convencional, como um portal de informações, atende em sua maioria às diretrizes de acessibilidade. É necessário, no entanto, disponibilizar o sistema em um *layout* em alto-contraste, de maneira a aperfeiçoar a utilização por parte de pessoas com baixa visão.

### 5.3.3 Avaliação de usabilidade

Baseado nas heurísticas de Nielsen, apresentadas na subseção 2.5.2, foi elaborado um questionário com 10 questões, na qual cada uma contemplava a avaliação de uma heurística. Ele pode ser visualizado no Apêndice A.5.

Para esta avaliação, foi utilizada a escala de Likert (1932) para expressar o grau de concordância do usuário com a heurística avaliada. Ela basicamente consiste em atribuir um valor entre 1 e 5, sendo 1 a concordância mínima e 5 a concordância máxima. Caso o usuário acreditasse que a heurística não era aplicável ao sistema, havia a possibilidade de atribuir o valor 0.

A Figura - 5.8 apresenta o resultado da avaliação, sendo os resultados expressos considerando as métricas de média e desvio padrão. Para as questões nas quais não se observa o desvio padrão, indica-se que houve unanimidade nas respostas dos participantes.



**Figura - 5.8:** Resultados da avaliação de usabilidade, segundo as heurísticas de Nielsen

Observa-se que houve unanimidade para as heurísticas apresentadas em Q1, Q2, Q5 e Q10, sendo que as duas primeiras obtiveram o grau máximo. Isto indica que com relação à usabilidade, o sistema apresentou-se totalmente informativo quanto aos eventos ocorridos frente ao usuário e com uma linguagem compreensível.

Uma informação importante a se citar sobre a avaliação é referente à heurística Q5, na qual um dos participantes julgou que ela não se aplicava ao sistema (motivo o qual ocasionou unanimidade na apresentação do gráfico). Esta heurística trata da sinalização e confirmação de ações “drásticas” no sistema, como a deleção de um arquivo. Visto que

o MannaHap não apresenta situações como a descrita em Q5, eis que, possivelmente, esta seja a motivação para a resposta deste participante.

A heurística Q9 obteve a menor média da avaliação (2,5) com um desvio padrão de aproximadamente 0,7. Esta heurística trata do auxílio do usuário a corrigir erros cometidos. Embora as avaliações pontuaram com um valor baixo na escala, não foram realizados comentários gerais sobre este ponto que indicassem as motivações para tal.

Durante os experimentos, não foram notados erros cometidos pelos participantes, para os quais o sistema não tenha auxiliado corretamente a sua correção. De todo modo, torna-se necessário em trabalhos futuros um estudo para verificação e desenvolvimento deste tipo de auxílio.

A heurística com maior desvio padrão foi a Q4 (aproximadamente 1,41), indicando uma maior divergência na avaliação dos participantes. Esta heurística trata da consistência nos meios de comunicação e interação. Dado os *delays* no *feedback* auditivo provido pelo sistema, é justificável que tal aspecto tenha gerado maior desconforto em um dos participantes.

Com exceção da heurística Q9, todas as demais possuíram média superior à 4, indicando que o protótipo desenvolvido tende a ser facilmente utilizado pelos usuários em potencial, realizando de maneira correta as tarefas as quais possuem interesse.

## 5.4 Considerações gerais

Este tópico apresentou as avaliações realizadas com o protótipo desenvolvido. Elas ocorreram de três modos: custo financeiro; temporal de funcionamento do sistema; e experimentos com usuários reais, avaliando a acessibilidade, usabilidade e experiência de uso do sistema.

De maneira geral, **avalia-se que o protótipo indica uma resposta afirmativa para a investigação fundamental desta pesquisa: é possível elaborar um modelo de sistema háptico de representação de imagens digitais para deficientes visuais com um custo financeiro acessível quando comparado aos já existentes.**

Na avaliação de custo, notou-se um aspecto interessante: aproximadamente metade dos gastos é composto pelos motores e impressão das peças. Isso demonstra os motivos pelos quais dispositivos hápticos com motores dedicados para cada pino tendem a ter um custo elevado.

Já a avaliação temporal apontou, segundo as estimativas realizadas, que o tempo despendido para a representação de imagens digitais cuja configuração necessita de muitos pinos erguidos é, possivelmente, um item a ser investigado. Considerando uma mesa de

dimensões de  $24 \times 24$  pinos, por exemplo, o tempo para representação pode ultrapassar uma hora, o que é inviável para um usuário em potencial aguardar.

Nesta avaliação foi também detectada uma série de adversidades, que comprometeram o funcionamento do encaixe correto dos pinos. As causas estavam diretamente relacionadas ao método de fixação dos pinos na mesa e ao encaixe das peças. Investigar meios para solucionar estes desafios é tido como prioridade para trabalhos futuros.

Ao se analisar estas duas avaliações conjuntamente, tem-se o seguinte indicativo: um sistema que ativa pinos sequencialmente (apenas um motor para ativação) tem um custo consideravelmente menor do que um sistema com pinos dedicados, no entanto, seu tempo para representação das imagens é consideravelmente maior. Isso gera um *tradeoff* entre duas questões de projeto: custo de desenvolvimento  $\times$  experiência de uso do usuário com o sistema.

A primeira questão impacta diretamente na principal premissa desta pesquisa, já a segunda impacta na aceitação que o sistema pode ter frente aos seus usuários em potencial. Investigar o ponderamento entre estas questões mostra-se um amplo campo de pesquisa para trabalhos futuros. Algumas direções que podem ser tomadas são: averiguar a utilização de eixos de ativação em paralelo, um para cada linha, por exemplo; diminuir as medidas das peças que compõem a mesa, diminuindo assim o espaço físico para movimentação dos eixos.

Já com os experimentos com usuários reais, foi possível verificar um indicativo de que o sistema atendeu, em sua maioria, os padrões de acessibilidade, e é de fácil uso, conforme as heurísticas de usabilidade tratadas. Na avaliação da experiência de uso, o sistema foi considerado como atendendo às necessidades do usuário e funcionando corretamente.

É importante mencionar que, conforme dito no parágrafo anterior, os resultados obtidos são apenas um indicativo das condições do sistema, visto que houveram apenas dois DVs que se voluntariaram para participar dos experimentos. Espera-se, futuramente, ampliar o conjunto de voluntários, realizando mais experimentos.

Os experimentos também indicaram aspectos a serem melhorados em trabalhos futuros, a saber: a disponibilização do sistema em alto contraste para usuários com baixa visão; a investigação e otimização do tempo de resposta do *feedback auditivo*; e melhorar o auxílio no sistema com relação à recuperação de possíveis erros do sistema.

---

## Conclusão

---

Este trabalho apresentou a conceituação de um modelo de sistema háptico baseado na abordagem DiY, de representação de imagens digitais para deficientes visuais, munido de um *display* de pinos *refreshable*, com um custo financeiro acessível quando comparado aos já existentes.

A partir do estudo dos aspectos fundamentais e da análise dos trabalhos relacionados, foi proposta como solução o modelo de sistema háptico MannaHap, na qual os usuários acessam um sistema *web* e, após submeter uma imagem digital, podem interagir com uma mesa de pinos *refreshable*, munidos de sensores *touch*, que geram um *feedback* auditivo para contextualização da região da imagem tocada.

Como principais contribuições do modelo proposto, têm-se:

- representação intermediária de uma imagem digital, gerada a partir de uma imagem de entrada, a ser utilizada para representação do dispositivo tátil. Com esta representação, diferentes pesquisas relacionadas à interpretação e reconhecimento de objetos em imagens digitais podem ser integradas ao MannaHap, como é o caso da pesquisa MannAR;
- algoritmos para o mapeamento da representação intermediária  $\times$  representação tátil, diretivas de acionamento dos pinos, e detecção de um determinado objeto tocado pelo usuário, de modo a prover um *feedback* auditivo adequado;
- mesa de pinos proposta numa abordagem semelhante a um “quebra-cabeça”, na qual o seu dimensionamento pode ser definido por peças customizáveis, replicadas a partir de nove modelos principais, que são encaixáveis, estando a critério das necessidades

do desenvolvedor e dos usuários. Esta contribuição é diretamente relacionada ao conceito DiY;

- mecanismo de movimentação para acionamento dos pinos baseado em três eixos principais, similar ao de uma impressora 3D, na qual um componente é direcionado para uma determinada região. Assim, cada pino seria acionado individualmente, sem a necessidade de um mecanismo dedicado para seu acionamento.

Como prova de conceito do modelo proposto desenvolveu-se um protótipo, sendo definida uma mesa com dimensões de  $12 \times 12$  pinos, cujas peças foram impressas utilizando uma impressora 3D. Durante a elaboração do protótipo, diferentes desafios surgiram, como o alinhamento correto dos eixos. O tempo despendido com estes desafios causou um atraso de cronograma, impactando na quantidade de pinos confeccionados, sendo 64 dos 144 previstos, tornando a dimensão em  $8 \times 8$ .

Foram realizadas avaliações para verificar as premissas da pesquisa, divididas em três frentes: avaliação de custo financeiro; avaliação temporal de funcionamento do sistema; e realização de experimentos com usuários reais, analisando a acessibilidade, usabilidade e experiência de uso.

Com a avaliação de custo financeiro, verificou-se que o MannaHap era o de valor mais acessível dentre outros quatro dispositivos baseados em mesas de pinos *refreshable*, sendo seu valor total estimado em R\$ 1493,30, cerca de 113 vezes menos custoso do que o BrailleDis, um dispositivo tátil referência na área.

Os experimentos com usuários reais contaram com a participação de dois DVs com baixa visão. Como resultados dos experimentos, os participantes indicaram que o sistema atendia, em sua maioria, as diretrizes de acessibilidade, que possuía boa usabilidade e proveu uma boa experiência de uso, na qual cumpriu com suas atribuições de maneira clara e concisa.

Já a avaliação temporal de funcionamento expôs alguns aspectos que necessitam de uma investigação mais aprofundada em trabalhos futuros. Inicialmente, verificou-se a não conformidade na disposição dos pinos, prejudicando diretamente o seu acionamento por meio dos eixos.

Nesta avaliação, segundo estimativas realizadas considerando diferentes dimensões de mesas de pinos, notou-se que o tempo despendido para a representação das imagens digitais podem despendem um tempo considerável, tornando impraticável o aguardo do usuário para a referida representação. A solução mais sugestiva para esta questão seria uma melhoria na ativação dos pinos, possivelmente por meio da adição de motores de ativação.

No entanto, solucionar a questão desta maneira implicaria diretamente no aumento do custo financeiro do sistema. Com isso, há uma nova questão de pesquisa a ser investigada: *é possível estabelecer um ponderamento adequado entre o tempo de ativação dos pinos que não afete significativamente a experiência de uso e mantenha o sistema com um baixo custo financeiro?*

Dada as conclusões supracitadas, as avaliações realizadas e demais considerações apresentadas, são diretrizes para trabalhos futuros:

- *Realizar uma investigação relacionada ao ponderamento entre tempo de ativação dos pinos e custo financeiro do sistema.* Algumas direções que podem ser tomadas para esta investigação consistem na utilização de eixos paralelos de movimentação de modo a diminuir o tempo de ativação e na tentativa de redução do espaço físico da mesa de pinos;
- *Analisar novos meios de fixação dos pinos na mesa, de modo a garantir o correto espaçamento e alinhamento.* Uma possível linha de análise a ser seguida é realizar os encaixes utilizando parafusos e aumentando os orifícios para fixação do pino;
- *Realizar melhorias na parte interativa com o usuário.* Conforme as avaliações dos experimentos com DVs, procurar disponibilizar o sistema em alto contraste, otimizar o tempo de resposta do *feedback* auditivo e melhorar o auxílio na recuperação de erros.
- *Promover experimentos com um maior número de DVs.* Para esta questão, um caminho a ser trilhado é ampliar a rede de contatos com entidades que atendam DVs não só em Maringá, mas em toda a região.

Por fim, pode-se concluir que o modelo de sistema háptico proposto, denominado MannaHap, é um indicativo de que tais sistemas podem ser desenvolvidos com um custo financeiro acessível quando comparado aos dispositivos já existentes, seguindo a abordagem DiY.

Espera-se que o MannaHap seja um prelúdio para a popularização do uso de *displays* de pinos *refreshable* e da abordagem DiY nas mais diferentes áreas de atuação dos DVs que envolvam a representação de imagens digitais, como educação, trabalho e localização.

## REFERÊNCIAS

---

- ARDUINO INC. What is arduino? [On-line], Último acesso em: 30/10/2018. Disponível em <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- BORNSCHEIN, J.; PRESCHER, D.; WEBER, G. Collaborative creation of digital tactile graphics. In: *Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility*, ACM, 2015, p. 117–126.
- BOURNE, R. R.; FLAXMAN, S. R.; BRAITHWAITE, T.; CICINELLI, M. V.; DAS, A.; JONAS, J. B.; KEEFFE, J.; KEMPEN, J. H.; LEASHER, J.; LIMBURG, H.; ET AL. Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, v. 5, n. 9, p. e888–e897, 2017.
- BRAIER, J.; LATTENKAMP, K.; RÄTHEL, B.; SCHERING, S.; WOJATZKI, M.; WEYERS, B. Haptic 3d surface representation of table-based data for people with visual impairments. *ACM Transactions on Accessible Computing (TACCESS)*, v. 6, n. 1, p. 1:1–1:35, 2015.
- BRASIL *Cartilha do censo 2010–pessoas com deficiência*. Secretaria dos Direitos Humanos da Presidência da República, 2012.
- BRASIL emag-modelo de acessibilidade em governo eletrônico. Disponível em: <http://emag.governoeletronico.gov.br/>, 2014.
- BRASIL Institui a lei brasileira de inclusão da pessoa com deficiência (estatuto da pessoa com deficiência). *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 07 de julho, 2015.
- BROWN, J.; KIM, H. N. Usability of alzheimer’s mhealth applications. *Journal of Best Practices in Health Professions Diversity: Education, Research & Policy*, v. 11, n. 1, 2018.

- BUZZI, M. C.; BUZZI, M.; LEPORINI, B.; SENETTE, C. Playing with geometry: a multimodal android app for blind children. In: *Proceedings of the 11th Biannual Conference on Italian SIGCHI Chapter*, ACM, 2015, p. 134–137.
- CALDWELL, B.; COOPER, M.; REID, L. G.; VANDERHEIDEN, G. Web content accessibility guidelines (wcag) 2.0. *WWW Consortium (W3C)*, 2008.
- CONDIT, R.; JONES, D. W. Stepping motors fundamentals. 2004.
- COOMANS, S.; LACERDA, G. S. Petese, a pedagogical ergonomic tool for educational software evaluation. *Procedia Manufacturing*, v. 3, p. 5881–5888, 2015.
- FISCHER, D. Capacitive touch sensors: Application fields, technology overview, and implementation example. *Fujitsu Microelectronics Europe*, 2010.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital image processing*. 3 ed. Pearson International, 2007.
- HATZFELD, C.; KERN, T. A. *Engineering haptic devices*. Springer, 2016.
- HURST, A.; TOBIAS, J. Empowering individuals with do-it-yourself assistive technology. In: *The proceedings of the 13th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, ACM, 2011, p. 11–18.
- ISO Iso 9999: 2016. assistive products for persons with disability: classification and terminology. 2016.
- KIM, J.; YEH, T. Toward 3d-printed movable tactile pictures for children with visual impairments. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, 2015, p. 2815–2824.
- KÖHLMANN, W.; LUCKE, U. Alternative concepts for accessible virtual classrooms for blind users. In: *Advanced Learning Technologies (ICALT), 2015 IEEE 15th International Conference on*, IEEE, 2015, p. 413–417.
- LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*, 1932.
- LOURENÇO, A. C.; CRUZ, E. C. A.; FERREIRA, S. R.; JUNIOR, S. C. Estude e use circuitos digitais. *Editora Érica*, 1999.

- LUQUE, L.; BRANDÃO, L. O.; KIRA, E.; BRANDÃO, A. A. On the inclusion of learners with visual impairment in computing education programs in brazil: practices of educators and perceptions of visually impaired learners. *Journal of the Brazilian Computer Society*, v. 24, n. 1, p. 4, 2018.
- MACKEY, D. The united nations convention on the rights of persons with disabilities. *Syracuse J. Int'l L. & Com.*, v. 34, p. 323, 2006.
- VAN DER MEULEN, E.; CIDOTA, M. A.; LUKOSCH, S. G.; BANK, P. J.; VAN DER HELM, A. J.; VISCH, V. T. A haptic serious augmented reality game for motor assessment of parkinson's disease patients. In: *Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct), 2016 IEEE International Symposium on*, IEEE, 2016, p. 102–104.
- NAMDEV, R. K.; MAES, P. An interactive and intuitive stem accessibility system for the blind and visually impaired. In: *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, ACM, 2015, p. 20.
- NATIONAL CENTER FOR HEALTH STATISTICS. Classifications of diseases and functioning & disability. *About the International classification of Diseases, 10th Revision, Clinical Modification (ICD-10-CM)*, 2009.
- NIELSEN, J. *Usability engineering*. Elsevier, 1994.
- NIELSEN, J. How to conduct a heuristic evaluation. *retrieved November*, v. 10, 2001.
- PENIDO, É. D. C. C.; TRINDADE, R. S. Microcontroladores. *IFMG,[SL]*, v. 1, n. 1, p. 1–80, 2013.
- PISSALOUX, E. E.; VELÁZQUEZ, R.; MAINGREAUD, F. A new framework for cognitive mobility of visually impaired users in using tactile device. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, v. 47, n. 6, p. 1040–1051, 2017.
- SCLATER, N.; CHIRONIS, N. P. *Mechanisms and mechanical devices sourcebook*, v. 5. McGraw-Hill New York, 2011.
- SILVA, P. M.; PAPPAS, T. N.; ATKINS, J.; WEST, J. E. Perceiving graphical and pictorial information via hearing and touch. *IEEE Trans. Multimedia*, v. 18, n. 12, p. 2432–2445, 2016.
- SILVA, S. Acessibilidade digital em ambientes virtuais de aprendizagem. *Revista GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias*, v. 2, n. 3, p. 245–254, 2012.

- SIM, G.; READ, J. C. Using computer-assisted assessment heuristics for usability evaluations. *British Journal of Educational Technology*, v. 47, n. 4, p. 694–709, 2016.
- SPINELLI, A.; DAVID, G.; GIDARO, S.; CARVELLO, M.; SACCHI, M.; MONTORSI, M.; MONTRONI, I. First experience in colorectal surgery with a new robotic platform with haptic feedback. *Colorectal Disease*, v. 20, n. 3, p. 228–235, 2018.
- SWAMINATHAN, S.; ROUMEN, T.; KOVACS, R.; STANGL, D.; MUELLER, S.; BAUDISCH, P. Linespace: A sensemaking platform for the blind. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, 2016, p. 2175–2185.
- VÖLKEL, T.; WEBER, G.; BAUMANN, U. Tactile graphics revised: the novel brailledis 9000 pin-matrix device with multitouch input. In: *International Conference on Computers for Handicapped Persons*, Springer, 2008, p. 835–842.
- YEADON, W. H.; YEADON, A. *Handbook of small electric motors*. McGraw Hill Professional, 2001.
- YIN, X.; GUO, S.; HIRATA, H.; ISHIHARA, H. Design and experimental evaluation of a teleoperated haptic robot-assisted catheter operating system. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 27, n. 1, p. 3–16, 2016.
- ZENG, L.; WEBER, G. Exploration of location-aware you-are-here maps on a pin-matrix display. *IEEE transactions on human-machine systems*, v. 46, n. 1, p. 88–100, 2016.

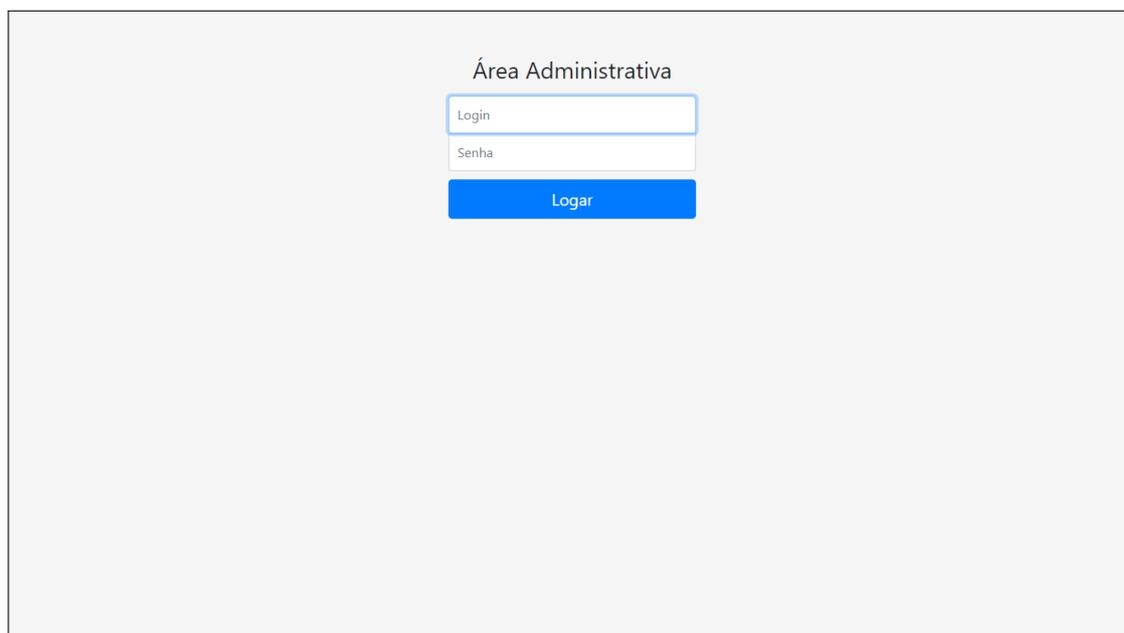
## Apêndices

---

### A.1 Exemplo de representação intermediária no formato JSON da imagem digital apresentada na Figura - 3.4

```
{
  "image": {
    "rows": 10,
    "cols": 10,
    "objects": [
      {"ID": 1,
        "originCoord": [1,1],
        "pixMatrix":
          [
            [255, 0, 0, 0],
            [255, 255, 0, 0],
            [255, 255, 255, 0],
            [255, 255, 255, 255],
            [255, 255, 255, 255],
            [255, 255, 255, 0],
            [255, 255, 0, 0],
            [255, 0, 0, 0]
          ],
        "desc": "Triângulo isósceles localizado à esquerda"},
      {"ID": 2,
        "originCoord": [4,4],
        "pixMatrix":
          [
            [ 0, 0, 0, 0, 255],
            [ 0, 0, 0, 255, 255],
            [ 0, 0, 255, 255, 255],
            [ 0, 255, 255, 255, 255],
            [255, 255, 255, 255, 255]
          ],
        "desc": "Triângulo equilátero localizado à direita"}
    ]
  }
}
```

## A.2 Páginas web desenvolvidas segundo a definição das Views



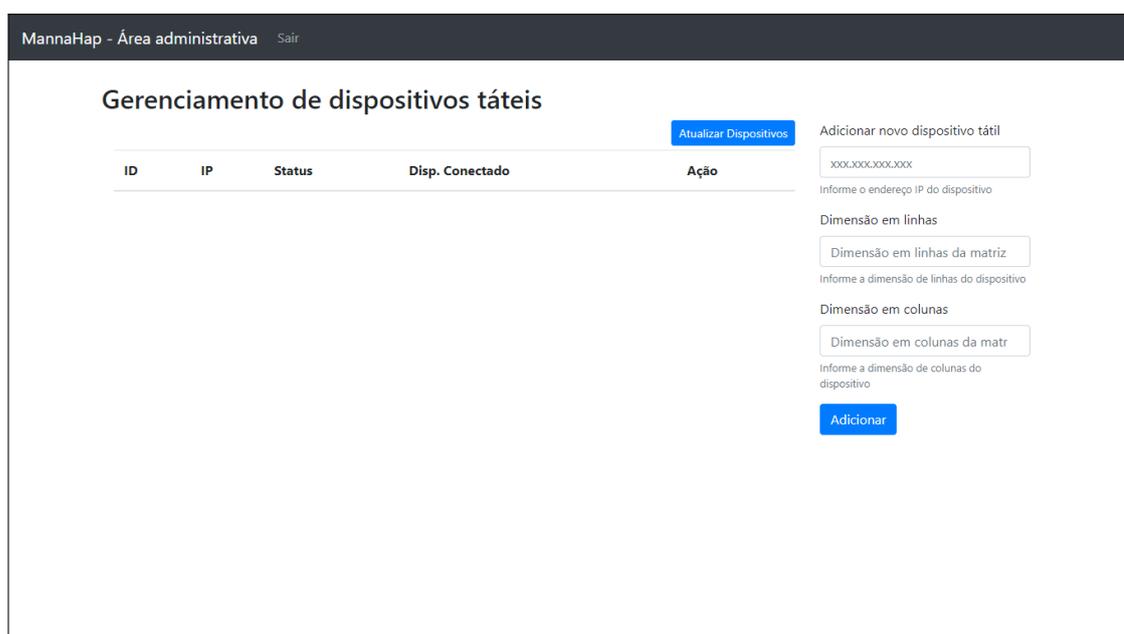
Área Administrativa

Login

Senha

Logar

Figura - A.1: View login-adm.jsp



MannaHap - Área administrativa Sair

### Gerenciamento de dispositivos táteis

Atualizar Dispositivos

ID	IP	Status	Disp. Conectado	Ação
----	----	--------	-----------------	------

Adicionar novo dispositivo tátil

xxx.xxx.xxx.xxx

Informe o endereço IP do dispositivo

Dimensão em linhas

Dimensão em linhas da matriz

Informe a dimensão de linhas do dispositivo

Dimensão em colunas

Dimensão em colunas da matr

Informe a dimensão de colunas do dispositivo

Adicionar

Figura - A.2: View main-adm.jsp, sem dispositivos táteis vinculados

The screenshot displays the 'Gerenciamento de dispositivos táteis' (Touch Device Management) page in the MannaHap administrative area. The page header includes 'MannaHap - Área administrativa' and a 'Sair' (Logout) link. The main content area features a table with the following data:

ID	IP	Status	Disp. Conectado	Ação
1	192.168.1.100	Ativado	-	<a href="#">Desvincular</a>

Additional elements on the page include an 'Atualizar Dispositivos' (Update Devices) button, a form to 'Adicionar novo dispositivo tátil' (Add new touch device) with a placeholder IP 'xxx.xxx.xxx.xxx', and sections for 'Dimensão em linhas' (Rows dimension) and 'Dimensão em colunas' (Columns dimension), each with a corresponding input field and an 'Adicionar' (Add) button.

**Figura - A.3:** *View* main-adm.jsp, com um dispositivo tátil vinculado

The screenshot shows the 'Bem vindo ao MannaHap' (Welcome to MannaHap) page. The header includes 'MannaHap', 'Usar o Sistema' (Use the System), and 'Sobre' (About). The main content area contains the following text:

**Bem vindo ao MannaHap**

Aqui você poderá submeter um arquivo no formato JSON para obter a representação tátil e auditiva de uma imagem digital.

Infelizmente, neste momento, todos os dispositivos táteis estão ocupados para uso. Tente mais tarde.

**Figura - A.4:** *View* index.jsp, na qual não há dispositivos táteis disponíveis para o usuário

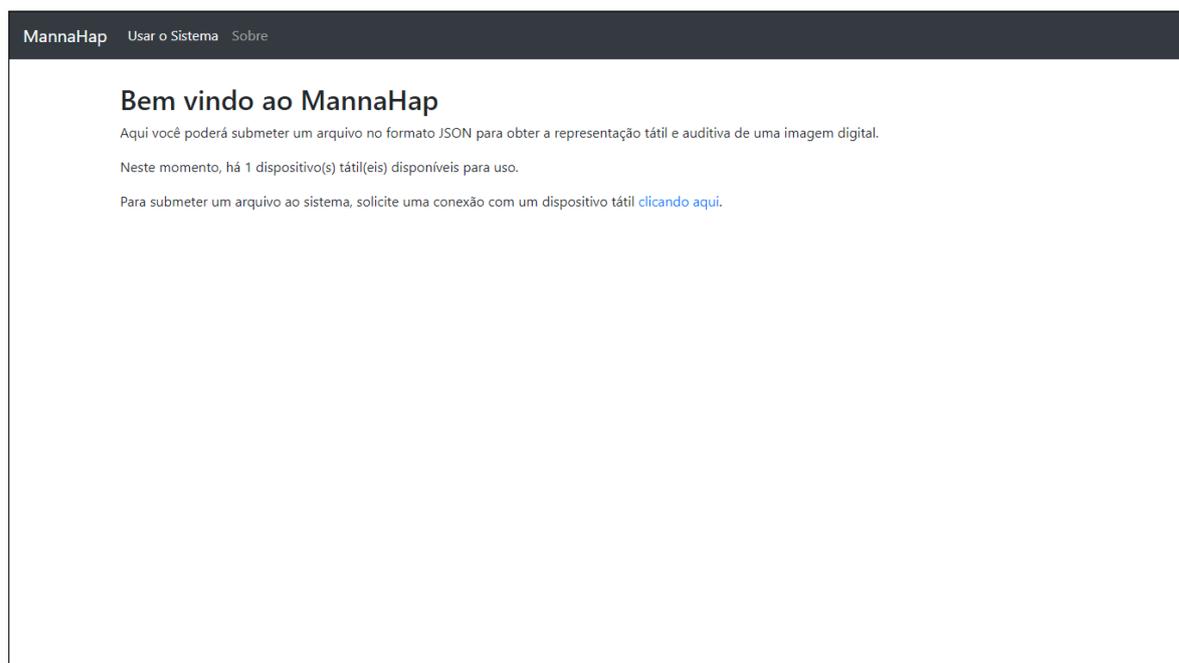


Figura - A.5: *View index.jsp*, na qual há um dispositivo tátil disponível para o usuário

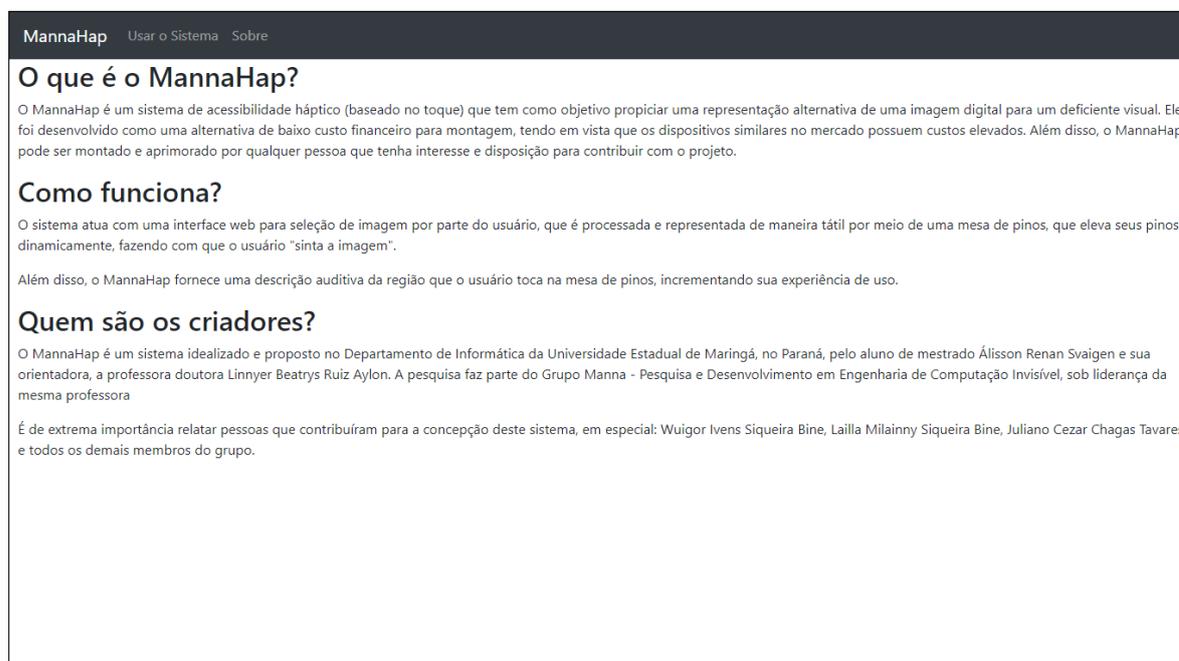


Figura - A.6: *View about.jsp*

MannaHap Usar o Sistema Sobre

## Submeter arquivo

Caro usuário, você está conectado ao dispositivo tátil (endereço IP: 192.168.1.100)

A seguir, você poderá submeter o arquivo.

Selecione o arquivo JSON com as informações processadas da imagem digital. Atenção: o processamento do arquivo pode demorar cerca de 1 minuto. Aguarde o redirecionamento da página.

Nenhum arquivo selecionado

Caso queira se desconectar do dispositivo, [clique aqui](#).

**Figura - A.7:** *View* sendFile.jsp

MannaHap Usar o Sistema Sobre

## Aguardando configuração da mesa de pinos

Caro usuário, o seu arquivo já foi enviado.

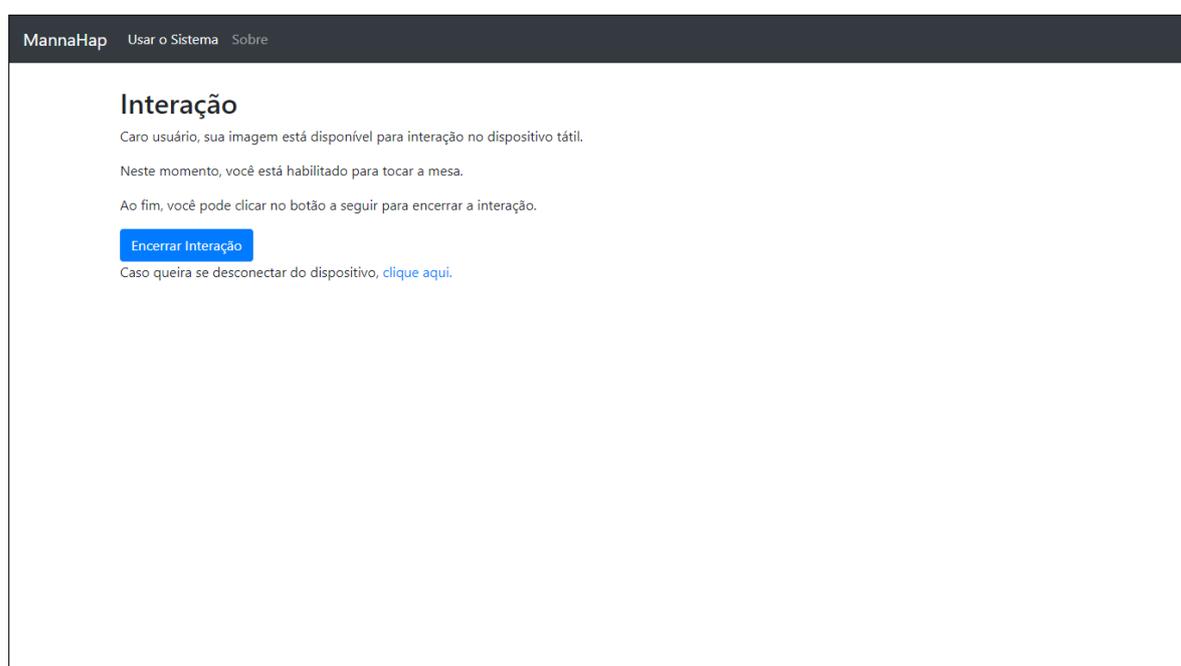
Neste momento, o dispositivo tátil está configurando a mesa de pinos para representar a imagem digital.

O tempo estimado para conclusão da configuração é de aproximadamente 01 minutos.

Quando a configuração estiver concluída, você será redirecionado para a página de interação com o dispositivo tátil. Aguarde.

Aguardando localhost...

**Figura - A.8:** *View* waitPinTable.jsp

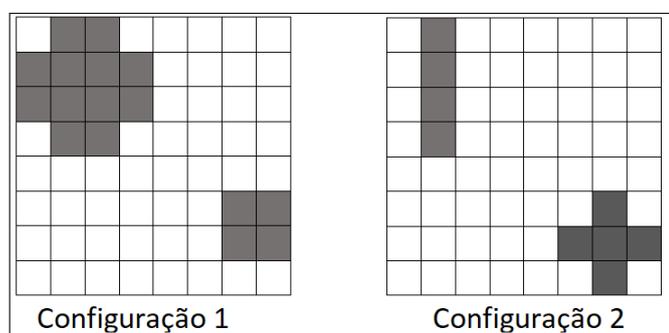


**Figura - A.9:** *View* interactTable.jsp

### A.3 Configuração da mesa de pinos nas imagens digitais utilizadas nos experimentos

A Figura - A.10 exibe a configuração da mesa de pinos considerando duas imagens digitais, cujos objetos são figuras geométricas. Cada quadrado apresentado indica um pino da mesa, sendo que os cinzas indicam pinos que devem estar levantados.

A primeira imagem é composta por um círculo na parte superior esquerda e um quadrado na parte inferior direita. Já a segunda imagem é composta por uma reta na parte superior esquerda e uma cruz na parte inferior direita.



**Figura - A.10:** Configuração da mesa de pinos para as duas imagens digitais utilizadas nos experimentos

## A.4 Questionário de avaliação de experiência de uso

- **Q1:** A primeira imagem do experimento possuía 2 figuras geométricas: um círculo no canto superior esquerdo e um quadrado no canto inferior direito. Você conseguiu identificar estes objetos?
  - Sim.
  - Não.
  
- **Q2:** A segunda imagem do experimento possuía 2 figuras geométricas: uma reta no canto superior esquerdo e uma cruz no canto inferior direito. Você conseguiu identificar estes objetos?
  - Sim.
  - Não.
  
- **Q3:** Qual o grau de ajuda que você necessitou para conseguir utilizar o sistema, isto é, carregar o arquivo da imagem e tocar os pinos?
  - Não precisei de nenhum tipo de ajuda.
  - Precisei de ajuda parcialmente, para contato inicial com o sistema.
  - Precisei de ajuda durante todo o experimento.
  
- **Q4:** Com relação aos contatos com os pinos, como você considera que estava a representação das figuras geométricas, no geral?
  - A figura percebida pelo toque correspondia com o conhecimento que eu tinha sobre ela.
  - A figura correspondia vagamente com o conhecimento que eu tinha sobre ela.
  - A figura não correspondia em nada com o conhecimento que eu tinha sobre ela.
  
- **Q5:** Como você considera a interação realizada pelo toque e a resposta auditiva obtida, no geral?
  - A interação foi rápida e adequada: assim que eu toquei numa determinada figura representada pelos pinos, obtive resposta auditiva.
  - A interação aconteceu, porém, houve um atraso considerável para resposta auditiva após o toque.

- Não houve resposta auditiva após o toque.
- **Q6:** O tamanho da mesa de pinos foi, para você, algo que prejudicou a experiência de uso da ferramenta?
  - Não.
  - Para este experimento não, mas caso utilizasse a ferramenta no dia-a-dia, isso claramente seria um problema.
  - Sim. A mesa definitivamente deveria ser menor.
- **Q7:** O espaço entre os pinos foi, para você, algo que prejudicou a experiência de uso da ferramenta?
  - Não.
  - Para este experimento não, mas caso utilizasse a ferramenta no dia-a-dia, isso claramente seria um problema.
  - Sim. O espaço definitivamente deveria ser menor.
- Neste espaço, faça as considerações e comentários gerais sobre a utilização do sistema que julgar necessárias.

## A.5 Questionário de avaliação de usabilidade, segundo as heurísticas de Nielsen

Cada questão foi respondida considerando uma escala de 1 a 5, na qual: 1 o avaliador discorda totalmente da afirmação; 2- discorda parcialmente; 3 - Indiferente; 4 - concorda parcialmente; 5 - concorda totalmente. Caso o avaliador julgasse que a questão não se aplicava ao sistema, respondia com o valor 0.

- **Q1:** O sistema informa ao usuário o que está acontecendo antes, durante e após a interação.
- **Q2:** O sistema possui uma linguagem próxima ao usuário, sem utilizar jargões técnicos ou de difícil compreensão.
- **Q3:** O sistema permite ao usuário navegar livremente pelo sistema, podendo desfazer suas ações e retornando para pontos anteriores de interação.
- **Q4:** O sistema mantém uma consistência em seus meios de comunicação e interação.
- **Q5:** Em caso de ações "drásticas", como a deleção de um arquivo, o sistema sinaliza e pede a confirmação destas ações, prevenindo erros.
- **Q6:** O sistema é intuitivo e de fácil utilização, tendo ajudas contextuais e indicando o fluxo de ações a se tomar.
- **Q7:** O sistema é flexível em sua utilização para usuários experientes e novatos, ou seja, é aprimorado para usuários já habituados (provendo itens como atalhos de teclado, preenchimento automático, etc.) e informativo para os que o utilizam pela primeira vez.
- **Q8:** O sistema possui design minimalista, com conteúdo de maneira direta e simples.
- **Q9:** O sistema auxilia o usuário a corrigir erros cometidos.
- **Q10:** O sistema provê ao usuário toda a ajuda necessária para utilização.

## Anexos

---

### B.1 Parecer Consubstanciado do COPEP - UEM



## PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

### DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

**Título da Pesquisa:** Tecnologias assistivas de imagens digitais para deficientes visuais

**Pesquisador:** LINNYER BEATRYS RUIZ AYLON

**Área Temática:**

**Versão:** 2

**CAAE:** 02198318.0.0000.0104

**Instituição Proponente:** CTC - Centro de Tecnologia

**Patrocinador Principal:** Financiamento Próprio

### DADOS DO PARECER

**Número do Parecer:** 3.098.506

#### **Apresentação do Projeto:**

Trata-se de projeto de pesquisa proposto por pesquisador vinculado à Universidade Estadual de Maringá.

#### **Objetivo da Pesquisa:**

Objetivo Primário: Investigar se representações alternativas de imagens digitais para deficientes visuais contribuem para uma melhoria de sua interpretação e contextualização. Objetivos Secundários: Investigar se as representações criadas são válidas e auxiliam em disciplinas relacionadas aos cursos de Computação; Avaliar a facilidade de uso dos sistemas criados nesta pesquisa; Avaliar a aceitação e grau de satisfação dos deficientes visuais com as soluções apresentadas.

#### **Avaliação dos Riscos e Benefícios:**

Avalia-se que os possíveis riscos a que estarão submetidos os sujeitos da pesquisa serão suportados pelos benefícios apontados.

#### **Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:**

Pesquisa possui caráter exploratório e qualitativo para avaliar duas tecnologias assistivas para a interpretação de imagens digitais por parte de deficientes visuais: MannAR e MannaHap. No estudo proposto a população será constituída de voluntários que deverão possuir baixa visão profunda, cegueira parcial ou total e serem maiores de 18 anos atendidos pelo Programa Multidisciplinar de

**Endereço:** Av. Colombo, 5790, UEM-PPG, sala 4

**Bairro:** Jardim Universitário

**CEP:** 87.020-900

**UF:** PR

**Município:** MARINGÁ

**Telefone:** (44)3011-4597

**Fax:** (44)3011-4444

**E-mail:** copep@uem.br



Continuação do Parecer: 3.098.506

Pesquisa e Apoio à Pessoa com Deficiência e Necessidades Educativas Especiais da UEM (PROPÆ-UEM). Os voluntários serão divididos em dois grupos: pessoas que cursam ou cursaram graduação na área de computação, e pessoas que não cursaram e receberão um treinamento individual para utilização das tecnologias assistivas desenvolvidas, de modo a garantir que o usuário possua o conhecimento básico de manipulação de cada sistema. Após o treinamento, o usuário fará um primeiro experimento utilizando o MannAR (software que faz o reconhecimento dos objetos da imagem e das relações entre eles para que seja produzida a descrição correta do conteúdo da imagem, que ao final do processo será representada por um texto). O usuário irá submeter ao sistema 3 imagens digitais. Cada imagem enviada resultará em um texto com sua descrição que o usuário poderá ouvir por meio da leitura de tela do computador. O usuário fará um segundo experimento utilizando o MannaHap (hardware tátil que proporciona ao usuário uma forma alternativa de compreender a imagem, sendo esta por meio do toque, para que o usuário “sinta” a imagem em conjunto com uma descrição auditiva que complementa o conteúdo e contexto da mesma). Fornecer percepções táteis ao usuário por meio do toque numa mesa de pinos. A partir do toque, um informação por áudio é gerada, acometendo percepções cinestésicas que permitem ao usuário compreender o conteúdo daquela imagem. Serão submetidos ao sistema para sua apreciação 3 diferentes imagens digitais, na qual ele irá “sentí-la” e obter uma contextualização via áudio. Posteriormente será aplicado um questionário de avaliação baseado nas Heurísticas de usabilidade de Nielsen e no TAM (Technology Acceptance Model), com o objetivo de avaliar as duas tecnologias desenvolvidas. O questionário será dividido em 3 partes: 1) avaliação individual do MannAR; 2) avaliação individual do MannaHap; 3) avaliação geral das duas tecnologias; Declaram ainda que as informações serão utilizadas somente para os fins desta pesquisa, e serão tratadas com o mais absoluto sigilo e confidencialidade, de modo a preservar a identidade do participante e serão armazenados no formato digital, ficando em posse da professora coordenadora da pesquisa.

#### **Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:**

Apresenta a folha de rosto devidamente preenchida e assinada pelo responsável institucional. Apresentam autorização do PROPÆ-UEM para a realização do projeto. Descreve gastos sob a responsabilidade dos pesquisadores. O período de abrangência de projeto é de 01/01/19 a 15/02/2019. O TCLE encontra-se numa linguagem clara e contempla as garantias de sigilo e confidencialidade.

#### **Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:**

O Comitê Permanente de Ética em Pesquisa Envolvendo Seres Humanos da Universidade Estadual

**Endereço:** Av. Colombo, 5790, UEM-PPG, sala 4

**Bairro:** Jardim Universitário

**CEP:** 87.020-900

**UF:** PR

**Município:** MARINGÁ

**Telefone:** (44)3011-4597

**Fax:** (44)3011-4444

**E-mail:** copep@uem.br

Continuação do Parecer: 3.098.506

de Maringá é de parecer favorável à aprovação do protocolo de pesquisa apresentado.

**Considerações Finais a critério do CEP:**

Face ao exposto e considerando a normativa ética vigente, este Comitê se manifesta pela aprovação do protocolo de pesquisa em tela.

**Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:**

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_1238049.pdf	27/11/2018 11:25:01		Aceito
Outros	carta_comite_alteracoes.pdf	27/11/2018 11:24:14	ALISSON RENAN SVAIGEN	Aceito
Outros	autorizacao_propae.pdf	27/11/2018 11:23:39	ALISSON RENAN SVAIGEN	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	ProjetoDetalhado.pdf	27/11/2018 11:22:19	ALISSON RENAN SVAIGEN	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLÉsujeitosdapesquisa.pdf	01/11/2018 14:21:02	ALISSON RENAN SVAIGEN	Aceito
Folha de Rosto	folhaDeRosto_digitalizada.pdf	30/10/2018 09:21:02	ALISSON RENAN SVAIGEN	Aceito

**Situação do Parecer:**

Aprovado

**Necessita Apreciação da CONEP:**

Não

MARINGÁ, 20 de Dezembro de 2018

---

**Assinado por:**  
**Ricardo Cesar Gardiolo**  
**(Coordenador(a))**

**Endereço:** Av. Colombo, 5790, UEM-PPG, sala 4**Bairro:** Jardim Universitário**CEP:** 87.020-900**UF:** PR**Município:** MARINGÁ**Telefone:** (44)3011-4597**Fax:** (44)3011-4444**E-mail:** copep@uem.br

## B.2 Formulário de avaliação de acessibilidade segundo o padrão WCAG, versão 2.0 - fornecido pela W3C

- **Princípio 1 - Perceptível:** A informação e os componentes da interface têm de ser apresentados de forma a que os usuários as percebam.
  - **Diretriz 1.1 - Alternativas de Texto:** Fornecer alternativas em texto para todo o conteúdo não textual de modo a que o mesmo possa ser apresentado de outras formas, de acordo com as necessidades dos usuários.
    - \* Atendido.
    - \* Não Atendido.
    - \* Não se aplica.
  - **Diretriz 1.2 - Mídia dinâmica ou contínua:** Fornecer alternativas para conteúdo em multimídia dinâmica ou temporal. (vídeos).
    - \* Atendido.
    - \* Não Atendido.
    - \* Não se aplica.
  - **Diretriz 1.3 - Adaptável:** Criar conteúdo que possa ser apresentado de diferentes formas (por ex., um esquema de página mais simples) sem perder informação ou estrutura.
    - \* Atendido.
    - \* Não Atendido.
    - \* Não se aplica.
  - **Diretriz 1.4 - Distinguível:** Facilitar aos utilizadores a audição e a visão dos conteúdos nomeadamente através da separação do primeiro plano do plano de fundo. (cor).
    - \* Atendido.
    - \* Não Atendido.
    - \* Não se aplica.
- **Princípio 2 - Operável:** Os componentes da interface de utilizador e a navegação têm de ser operáveis.
  - **Diretriz 2.1 - Acessível por Teclado:** Fazer com que toda a funcionalidade fique disponível a partir do teclado.

- \* Atendido.
- \* Não Atendido.
- \* Não se aplica.
- **Diretriz 2.2 - Tempo Suficiente:** Proporcionar aos utilizadores tempo suficiente para lerem e utilizarem o conteúdo.
  - \* Atendido.
  - \* Não Atendido.
  - \* Não se aplica.
- **Diretriz 2.3 - Convulsões:** Não criar conteúdo de uma forma que se sabe que pode causar convulsões.
  - \* Atendido.
  - \* Não Atendido.
  - \* Não se aplica.
- **Diretriz 2.4 - Navegável:** Fornecer formas de ajudar os utilizadores a navegar, localizar conteúdos e determinar o local onde estão.
  - \* Atendido.
  - \* Não Atendido.
  - \* Não se aplica.
- **Princípio 3 - Compreensível:** A informação e a utilização da interface de utilizador têm de ser compreensíveis.
  - **Diretriz 3.1 - Legível:** Tornar o conteúdo textual legível e compreensível.
    - \* Atendido.
    - \* Não Atendido.
    - \* Não se aplica.
  - **Diretriz 3.2 - Previsível:** Fazer com que as páginas Web apareçam e funcionem de forma previsível.
    - \* Atendido.
    - \* Não Atendido.
    - \* Não se aplica.
  - **Diretriz 3.3 - Assistência na inserção de dados:** Ajudar os utilizadores a evitar e a corrigir os erros.

- \* Atendido.
- \* Não Atendido.
- \* Não se aplica.

- **Princípio 4 - Robusto:** O conteúdo deve ser suficientemente robusto para ser interpretado de forma viável por uma ampla variedade de agentes de utilizador, incluindo as tecnologias de apoio.

- **Diretriz 4.1 - Compatível:** Maximizar a compatibilidade com os agentes de utilizador atuais e futuros, incluindo as tecnologias de apoio.

- \* Atendido.
- \* Não Atendido.
- \* Não se aplica.