

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PATRIC GALERA FORCELINI

AMBIENTE INTERATIVO TANGÍVEL DE BAIXO CUSTO PARA APOIO
AO LETRAMENTO BRAILLE

CURITIBA PR

2017

PATRIC GALERA FORCELINI

AMBIENTE INTERATIVO TANGÍVEL DE BAIXO CUSTO PARA APOIO
AO LETRAMENTO BRAILLE

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Informática no Programa de Pós-Graduação em Informática, setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Ciência da Computação*.

Orientadora: Laura Sánchez García.

CURITIBA PR

2017

F697a Forcelini, Patric Galera

Ambiente interativo tangível de baixo custo para apoio ao
letramento braille / Patric Galera Forcelini. – Curitiba, 2017.
91f. : il. ; 30 cm.

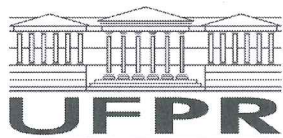
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor
de Ciências Exatas, Programa de Pós-graduação em Informática,
2017.

Orientadora: Laura Sánchez García..

Bibliografia: p. 82-87.

1. Braille – Computador (letramento). 2. Ciência da computação.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Garcia, Laura Sánchez. III.
Título.

CDD: 004



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em INFORMÁTICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PATRIC GALERA FORCELINI** intitulada: **Ambiente Interativo Tangível de Baixo Custo para Apoio ao Letramento Braille.**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 21 de Setembro de 2017.

LAURA SANCHEZ GARCIA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

ROBERTO PEREIRA

Avaliador Interno (UFPR)

JULIANA BUENO

Avaliador Externo (UFPR)

ANDRÉ LUIZ PIRES GUEDES

Avaliador Interno (UFPR)



“Por que foi que cegamos, Não sei, talvez um dia se chegue a conhecer a razão, Queres que te diga o que penso, Diz, Penso que não cegamos, penso que estamos cegos, Cegos que vêem, Cegos que, vendo, não vêem.”
(José Saramago, Ensaio sobre a cegueira)

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a todos que, de alguma forma, acompanharam a finalização desta dissertação, citados aqui ou não, pois deram-me motivação para alcançar este objetivo. Em um momento difícil, permeado por sentimentos de eminente fracasso, foram vocês que, por alguma palavra ou ação, me impediram de incorrer no erro da desistência. Após a aprovação e retornos positivos da banca examinadora, só gostaria de ser capaz de expressar minha gratidão por cada pequeno ato de apoio.

Agradeço aos meus pais pela oportunidade de me dedicar à vida acadêmica longe de casa. Agradeço não só pelo apoio material e psicológico, mas também pelos valores que me alicerçaram até aqui. Sou grato pela confiança depositada ao longo dos anos.

Agradeço à Laura, que muito além de ter sido a orientadora desta dissertação, tornou-se uma grande amiga. As reuniões de discussão sobre o objeto de pesquisa foram extremamente importantes, bem como as conversas sobre temas sociais ou pessoais. Espero que ainda possamos obter mais frutos desta parceria.

Agradeço aos colegas do grupo de pesquisa pelas conversas e dicas no decorrer do meu trabalho. Especialmente, sou grato pela valiosa contribuição do Erme para a implementação do protótipo funcional avaliado nesta pesquisa. Também reconheço os *insights* relevantes para o projeto originados das conversas com a Fran.

Agradeço às pedagogas dos centros de educação especializados que abriram as portas para conhecer seus trabalhos e realizar etapas fundamentais desta pesquisa. Igualmente agradeço aos participantes nos experimentos pelo tempo e contribuição. A oportunidade de conhecer de perto a comunidade cega de Curitiba foi uma das experiências mais humanamente edificantes que já vivenciei.

Sou grato aos membros da banca examinadora por todas as contribuições. Tanto as críticas como elogios me propiciaram um amadurecimento enquanto pesquisador.

Agradeço à Yasmin, que teve a paciência e carinho de me acompanhar ao ensaiar no último momento prévio a minha defesa. Não sei se tens a noção do tamanho da força que me deu em todos os nossos encontros no campus. Devo muito a você pelo fato de ter persistido até o fim.

Agradeço aos meus amigos que persistiram ao tempo. Mesmo com a reclusão e momentos difíceis nesta etapa de mestrado, pude contar com a presença de vocês em momentos de descontração e conversas que ressignificaram um pouco mais o dia-a-dia. Ressalto aqui os nomes de Leonardo, Kadaum, Marcelo, Juliano, Daniel, Alessandra, Isabelly, Vinicius, Luciano e Marcos, além de me desculpar por qualquer nome que não tenha sido aqui mencionado.

Resumo

O interesse pelo uso do braille e o domínio do mesmo por parte da população cega tem apresentado queda significativa, caracterizando o fenômeno de “desbraillização”. A popularização de leitores de tela facilitou o acesso à informação dos cegos mediado pela tecnologia, porém contribuiu ao mesmo tempo com a diminuição de uso do braille. Diante disso, é importante fornecer uma síntese tecnológica que alie ambos os paradigmas, tanto a manipulação do braille como a síntese de voz. Para tanto, buscou-se como objetivo especificar e instanciar uma arquitetura tangível, extensível e de baixo custo para apoiar práticas de letramento em braille. Este trabalho foi fundamentado em teorias no domínio do braille e na Interação Humano-Computador, especialmente na linha de Interfaces Tangíveis de Usuário. Foi conduzida uma revisão bibliográfica das propostas tecnológicas que podem apoiar o letramento braille e feita uma análise a partir de um método elaborado para classificar tecnologias braille com base em nove perguntas. Um protótipo funcional da arquitetura especificada foi implementado, com entrada por visão computacional de uma interface tangível com regras visuais também especificadas, para a avaliação com 4 pessoas cegas alfabetizadas em braille. As avaliações foram conduzidas com 4 cenários de tarefas pré-estabelecidos, de forma a observar um conjunto planejado de variáveis em cada contexto. Os resultados obtidos apresentaram a aceitação do conceito tangível pela amostra de participantes, indicando que o uso de um mesmo artefato tangível minimalista representando o braille, para fornecer a entrada em aplicações criativas e interativas com feedback auditivo é viável e motivador aos usuários. Tal resultado, representando uma tecnologia que une a leitura de voz sintética com a manipulação de celas braille, destaca-se como uma alternativa de baixo custo para estimular o uso do braille em contextos motivadores e, conseqüentemente, para ser apropriada no combate à desbraillização. Como conclusão, a viabilidade técnica foi mostrada pelos resultados, abrindo oportunidade para futuros redesigns que se aproximem das necessidades de tarefas para o público cego por meio de práticas de design participativo.

Palavras-chave: braille, interface tangível, letramento, IHC.

Abstract

The interest in the use of braille and the domain of the same by the blind population has presented a considerable drop, characterizing a phenomenon of braille literacy crisis. The rise of screen readers facilitated the access to information, mediated by technology, by the blind, but at the same time contributed to the decrease on braille usage. It is important to provide a technological synthesis that aligns both paradigms, braille manipulation and speech synthesis. To do so, it was tried to specify and instantiate a tangible, extensible and low-cost architecture to support braille literacy practices. We looked for theoretical foundations in the fields of braille and Human-Computer Interaction, specially in the area of tangible user interfaces. A literature review was conducted on the technological proposals that can support Braille literacy and an analysis based on a method developed to classify braille technologies based on nine questions. It was implemented a functional prototype of the specified architecture, with input by computer vision of a tangible interface with also specified visual rules, for the evaluation with 4 blind people literate in braille. Evaluations were conducted with 4 pre-set task scenarios, in order to observe a planned set of variables in each context. The results showed acceptance of the tangible concept by the sample of participants, indicating that the use of a minimalist tangible artifact representing braille, to provide input in creative and interactive applications with auditory feedback is feasible and motivating to the users. This result, representing a technology that links synthetic speech reading with the manipulation of Braille cells, stands out as a low-cost alternative to stimulate the use of Braille in motivating contexts and, consequently, to be appropriated in the fight against braille literacy crisis. As a conclusion, technical feasibility was shown by the results, opening up opportunity for future redesigns that approach the task needs of the blind public through participatory design practices.

Keywords: braille, tangible interface, literacy, HCI.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Problema: Desbraillização	16
1.2	Objetivos	17
1.3	Justificativa	18
1.4	Estrutura do Trabalho	18
2	Fundamentação Multidisciplinar	20
2.1	Cegos e Acesso a Leitura - Breve Panorama	20
2.2	O Código Braille	21
2.3	Letramento e Aprendizagem	22
2.4	Contexto Prático do Ensino de Braille	23
2.5	Considerações do Capítulo	24
3	Fundamentação em Interação Humano-Computador	25
3.1	Interfaces Tangíveis de Usuário - TUIs	25
3.1.1	Fundamentos Teóricos	26
3.1.2	TUIs para Educação	26
3.1.3	Exemplos de TUIs	27
3.2	Interação Multimodal	28
3.3	Jogos e Design para Crianças	29
3.4	Considerações do Capítulo	30
4	Revisão de Trabalhos Correlatos	31
4.1	Um Método Classificatório para Tecnologias Braille	31
4.2	Ponto de Partida: Tecnologias Tradicionais	33
4.3	Braille em Telas Touchscreen	34
4.4	Braille em Hardware de Baixo Custo	36
4.5	Braille Vestível	37
4.6	Blocos Braille	39
4.7	Considerações do Capítulo	39

5	Arquitetura	42
5.1	Interface Tangível de Usuário (TUI)	43
5.2	Núcleo	44
5.2.1	Log de Eventos	44
5.3	Entrada	44
5.3.1	Entrada por Visão Computacional	45
5.4	Saída	47
5.5	Extensões	48
5.6	Considerações do Capítulo	49
6	Método	50
6.1	Seleção de Participantes	50
6.2	Prototipação	51
6.2.1	Interface Tangível Braille	51
6.2.2	Algoritmo de Visão Computacional	53
6.3	Experimentos	54
6.3.1	Variáveis para coleta e análise	54
6.3.2	Ambiente	55
6.3.3	Protocolo por Cenário de Experimento	56
6.4	Considerações do Capítulo	61
7	Resultados	63
7.1	Resultados Individuais	63
7.1.1	Resultados de P1	63
7.1.2	Resultados de P2	65
7.1.3	Resultados de P3	67
7.1.4	Resultados de P4	68
7.2	Resultados Consolidados por Variáveis	69
7.2.1	Variáveis da TUI (Percepções)	69
7.2.2	Variáveis da TUI (Ações)	69
7.2.3	Variáveis de Feedback	70
7.2.4	Variáveis de Entrada	70
7.2.5	Variáveis de Usuário	70
8	Discussão	72
8.1	Aceitação da TUI Minimalista e Baixo Custo	72
8.2	Pluralidade de Leitores Braille	73
8.3	Potencial de Apropriação da Ferramenta	73
8.3.1	Apropriação em Sala de Aula	74
8.3.2	Apropriação Autônoma	74

8.4	Contexto de Letramento e Alfabetização	74
8.5	Proposta de Diretrizes	75
8.6	Revisão pelo Método Classificatório Proposto	76
8.6.1	Comparação ao Estado da Arte	77
9	Conclusões	79
9.1	Limitações da Pesquisa	80
9.2	Trabalhos Futuros	81
	Referências Bibliográficas	82
A	Termo de Consentimento	88
B	Alfabeto em Braille	90

Lista de Figuras

1	O braille e outros alfabetos táteis propostos na história [Stadelman, 1913] . . .	20
2	A célula do sistema braille: A) pontos numerados da matriz da célula; B) caractere simples ‘c’; C) caractere composto por prefixo de caixa alta ‘C’; D) caractere composto por prefixo de numeral ‘3’	21
3	Fatores relacionados ao processo de aprendizagem com TUIs [Marshall, 2007] .	27
4	Exemplos de TUIs	28
5	Espaço de design situado deste trabalho adaptado da conceitualização de [Sobel et al., 2015]	30
6	Tecnologias tradicionais de apoio ao braille	34
7	Exemplo de tecnologia braille em touchscreen: BrailleTouch [Frey et al., 2011]	35
8	Segunda versão do BrailleTutor [Kalra et al., 2009]	37
9	Luva para aprendizagem passiva de braille [Seim et al., 2014]	38
10	Representação do Electronic Braille Blocks [Jafri, 2014]	39
11	Diagrama da arquitetura em camadas modulares proposta para o projeto	42
12	Funcionamento do processamento de imagens da TUI	46
13	Diagrama de interação padrão do sistema	48
14	Diagrama de interação de extensão de jogo de adivinhação de palavra	49
15	Exemplo de TUI virtualmente prototipada em LEGO	51
16	Primeira versão do protótipo em EVA	52
17	Versão final da TUI para o protótipo funcional	53
18	Representação gráfica do ambiente para a avaliação	56
19	Visão geral do protocolo de avaliação do protótipo	57
20	Notações utilizadas nos <i>storyboards</i> da pesquisa	57
21	<i>Storyboard</i> do cenário 1	58
22	<i>Storyboard</i> do cenário 1 com feedback automático	58
23	<i>Storyboard</i> do cenário 1 com feedback por comando de voz	59
24	<i>Storyboard</i> do cenário 2	60
25	<i>Storyboard</i> do cenário 3	60

26	Poema sobre a TUI para avaliação do Cenário 4	61
27	Log e entrada com a quinta letra, “n”, não encaixada corretamente	64

Lista de Tabelas

1	Perguntas e atribuições possíveis para o método classificatório de tecnologias braille	32
2	Consolidação das categorias revisadas de acordo com o método classificatório .	40
3	Taxa de acerto de casos de teste para 1000 iterações do algoritmo com cada letra em 3 posição na linha de entrada prototipada	46
4	Variáveis observadas no método de pesquisa	55
5	Amostra de participantes da pesquisa	63
6	Comparação pelo método classificatório da proposta desta pesquisa (destacada) com o estado da arte	78

Lista de Acrônimos

ACM	Association for Computing Machinery
AFL	Association Française pour la Lecture
APADEVI	Associação de Pais e Amigos de Deficientes Visuais
CAEE	Centro de Atendimento Educacional Especializado
CAD	Computer Aided Design
CBB	Comissão Brasileira de Braille
DINF	Departamento de Informática
E/S	Entrada e Saída
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Espuma vinílica acetinada
FACE	Fundação de Assistência à Criança Cega
GUI	Graphical User Interface
IBC	Instituto Benjamin Constant
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICF	International Classification of Functioning, Disability and Health
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IHC	Interação Humano-Computador
IPC	Instituto Paranaense de Cegos
MEC	Ministério da Educação
MDF	Medium-Density Fiberboard
NFB	National Federation of the Blind
NFC	Near Field Communication
OMS	Organização Mundial da Saúde
PPGINF	Programa de Pós-Graduação em Informática
RGB	Red, Green, Blue
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
TTS	Text To Speech
TUI	Tangible User Interface
UFPR	Universidade Federal do Paraná
VC	Visão Computacional

Capítulo 1

Introdução

Os artefatos computacionais interativos evoluíram preservando a visão como função sensorial central para a interação de humanos com computadores. Com o afloramento do debate da inserção de recursos tecnológicos na educação, o protagonismo do sentido da visão mantém-se imperceptivelmente intacto na sociedade vidente, seja na simples exposição do conteúdo em projetor até a distribuição de tablets *touchscreen* para estudantes. Nesse cenário, pessoas cegas demandam acesso às tecnologias e objetos de aprendizagem, o que é majoritariamente solucionado pelas tecnologias assistivas, ou seja, as adaptações dos artefatos dos videntes para o uso pelos cegos por meio dos sentidos remanescentes, especialmente a audição.

A partir da saída em áudio dos conteúdos visuais da tela, as tecnologias de software dos leitores de tela têm obtido sucesso na tarefa de fornecer acessibilidade computacional às pessoas cegas. No entanto, a facilidade de ouvir um livro falado não pode substituir a possibilidade da aprendizagem da leitura tátil para a pessoa cega, especialmente no caso de crianças na faixa etária da alfabetização. A leitura convencional pelos cegos é realizada a partir do sentido do tato com base no código braille¹ que, há mais de um século, propicia o desenvolvimento da aquisição da leitura e da escrita - um dos principais legados culturais da história humana - para a minoria populacional que não conta com o sentido da visão, uma vez que, todos os códigos de escrita oficialmente usados como sistemas primários nos Estados do Mundo são de origem visual.

Quanto a dimensão estatística da cegueira na população, a Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que a condição atinge 39 milhões de pessoas no mundo, com a maioria situada nos países em desenvolvimento [World Health Organization, 2014]. Das crianças abaixo dos 15 anos de idade, a estimativa é de 1,4 milhão que são irreversivelmente cegas [World Health Organization, 2014]. Por sua vez, no Brasil, o Censo de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [IBGE, 2010] descreveu que 35.774.392 de pessoas declaram ter algum grau de deficiência visual, dos quais 506.377 afirmam não conseguir enxergar de modo algum.

¹Nesta dissertação, de acordo com a Comissão Brasileira do Braille (CBB), usa-se o termo braille com inicial em caixa baixa para referência ao sistema, e com inicial em caixa alta para referência ao seu inventor, Louis Braille

1.1 Problema: Desbrailleização

O problema abordado no presente trabalho foi documentado em um relatório pela National Federation of the Blind (NFB), que descreve a existência de uma crise de iliteracia braille no contexto dos EUA [National Federation of the Blind, 2009]. A crise mencionada no relatório estima o alarmante índice de 90% de pessoas oficialmente cegas naquele país que não dominam o código braille [National Federation of the Blind, 2009]. Além disso, o relatório mostra que a crise é agravada pela falta de professores especializados e pela existência de preconceitos na sociedade civil quanto ao código braille.

No Brasil, embora não haja dados estatísticos a respeito do domínio de braille pela população cega, fenômeno similar é identificado como “desbrailleização” pelos pesquisadores [Melare, 2013, de Sousa, 2001]. Sousa [de Sousa, 2001, de Sousa, 2004] afirma que esse fenômeno foi intensificado com a evolução das tecnologias assistivas baseadas em áudio, cuja adesão, imaginando-as como substitutas de livros braille, instituiu o paradigma da “oralidade”. Na mesma linha argumentativa, Maria da Gloria de Almeida, do Instituto Benjamin Constant (IBC), também considera que há desbrailleização em escala global por causa da comodidade trazida pelas tecnologias como audiolivros ao público cego, defendendo porém que não se deve negar às pessoas não-videntes o acesso ao sistema de leitura-escrita que propicia a fruição mais refinada das obras [Melare, 2013].

A desbrailleização é um problema que demanda a investigação de possíveis soluções devido à perda de interesse da população cega pelo braille, correlacionada à maior adesão a tecnologias como leitores de tela. Embora sistemas baseados em vozes sintéticas forneçam acesso a informação, o braille é a ferramenta que fornece o aprendizado dos fatos linguísticos aos cegos, como por exemplo o conhecimento ortográfico da linguagem [Nicolaiewsky, 2016]. Nesse contexto, cabe a pesquisas tecnológicas a inquirição por sínteses criativas envolvendo o braille e as demais tecnologias assistivas existentes.

O público cego abordado por este trabalho não é restrito àquele com diagnóstico médico da cegueira total. Considera-se a cegueira como emergente de múltiplos fatores bio-psico-sociais², em consonância com a Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde (ICF) da OMS, no qual qualquer sujeito pode ter algum deficit funcional classificado em função de estruturas biológicas, atividades e influências do contexto no qual está inserido. No contexto educacional, reforça-se tal posição com aquela tomada por Almeida [Melare, 2013] ao defender que, para a eficácia do binômio ensino-aprendizagem de um aluno cego, é preciso “saber quem ele é, o que quer, a qual grupo social, cultural e econômico pertence, como é a sua família, e a partir daí fazer um planejamento que possa dar uma caminhada menos complicada e atrelada ao sucesso pessoal”.

²Fenômeno complexo da interação de variáveis biológicas, psicológicas, ambientais e sociais, em contraponto a redução da deficiência a um déficit em uma função biológica

Abordar o problema da desbrailleização situa este trabalho em uma perspectiva de pesquisa multidisciplinar [Alvargonzález, 2011], na qual busca-se fundamentação em outras disciplinas para ampliar a compreensão do objeto de pesquisa. Apesar disso, a pesquisa situa-se na subárea de Interação Humano-Computador (IHC), da grande área de Ciência da Computação, que proporciona principalmente a abordagem metodológica. Dentro da IHC, a proposta deste trabalho atua na linha de Interface Tangível de Usuário (TUI), conceito de interface que visa tornar a informação digital manipulável por meio de objetos físicos [Shaer e Hornecker, 2009, Ishii, 2008]. O valor do diálogo entre diferentes campos científicos é o princípio subjacente a este trabalho, no qual reconhece-se a necessidade de contínua busca de soluções que satisfaçam às necessidades colocadas pelo problema real, irreduzíveis a uma só área do conhecimento.

No contexto do Grupo de Pesquisa em IHC, do Programa de Pós-Graduação em Informática (PPGInf) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), este trabalho está ancorado ao trabalho de García [García, 2016], que elicitou as diretrizes para um ambiente de letramento de crianças cegas em braille. Por sua vez, o trabalho de García consistiu no mapeamento e na extensão dos requisitos definidos na tese de Bueno [Bueno, 2014] que elencou insumos conceituais de um ambiente de letramento pela via direta para crianças surdas.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é projetar e instanciar um sistema interativo, tangível, extensível e de baixo custo para apoiar educadores e educandos cegos em práticas de letramento em braille.

Como objetivos específicos, tem-se a seguinte lista:

- especificar regras visuais da Interface Tangível de Usuário (TUI) para viabilizar a processamento por visão computacional da mesma. Tais regras visam permitir a confecção da TUI em qualquer material para fins de entrada.
- especificar uma arquitetura em camadas extensíveis que permita o desenvolvimento de módulos para a realização de práticas de letramento inovadoras sobre o braille
- projetar e implementar módulos correspondentes a cenários interativos para práticas com o braille na arquitetura projetada
- avaliar, junto a pessoas cegas previamente alfabetizadas em braille, um protótipo funcional do sistema com os módulos de cenários elaborados para este fim
- elaborar um método classificatório para avaliação de tecnologias de apoio ao letramento braille e empregá-lo em avaliação comparativa do presente trabalho ao estado da arte da área

1.3 Justificativa

A principal justificativa do objetivo proposto é o alto custo das tecnologias tradicionais braille aliado à baixa oferta de tecnologias alternativas de baixo custo que explorem o sentido do tato, propiciem abordagens motivadoras para crianças³ e não determinem (no sentido de determinismo tecnológico) as práticas de ensino mediadas pelo professor. Um maior aprofundamento da justificativa central é fornecido na revisão de trabalhos correlatos do Capítulo 4.

Também é relevante posicionar este trabalho em um dos pontos que Sousa [de Sousa, 2001] considera importante na defesa do braille: “incentivo a estudos que otimizem o braille, levando em conta uma proposta de braille unificado e que **potencializem os resultados desse diálogo amigável entre o braille e as tecnologias de informática**” (grifos do autor desta dissertação).

Ademais, a importância de tecnologias para oferecer ensino de braille a crianças cegas é reforçada pela seguinte lista de justificativas multidisciplinares:

- O sistema braille tornou-se por excelência o sistema de leitura e escrita dos cegos, constituindo-se em um marco cultural dessa minoria populacional [de Sousa, 2004].
- Na oftalmologia há a defesa do papel do profissional da área indicar o sistema braille para crianças diagnosticadas com deficiência visual [RW, 2009], tendo sido o caso vivenciado pela célebre ativista cega brasileira Dorina Nowill [Nowill, 1996].
- Na neurociência há evidências de pesquisas que correlacionam o maior desenvolvimento neural, além de outros impactos neurais positivos [Sadato, 2005, Reich et al., 2011, Striem-Amit et al., 2012], à aprendizagem de braille em idade precoce [Liu et al., 2007].
- Correlaciona-se a aprendizagem de braille com maiores índices de empregabilidade de pessoas com deficiência visual quando comparadas aos seus semelhantes que não aprenderam o código [Ryles, 1996].

1.4 Estrutura do Trabalho

O restante desta dissertação está estruturada em nove capítulos principais: Fundamentação Multidisciplinar, Fundamentação em IHC, Revisão de Trabalhos Correlatos, Proposta de Arquitetura, Método, Resultados, Discussão e Conclusão. A fundamentação bibliográfica da pesquisa é apresentada no Capítulo 2, onde discorre-se sobre conceitos do sistema braille, ensino-aprendizagem de cegos, letramento e alfabetização, e no Capítulo 3, onde são abordados

³Embora o método desta pesquisa não tenha sido conduzido exclusivamente com o público infantil, a fundamentação teórica desta foi guiada com inclinação para crianças, portanto há destaque para a faixa etária no decorrer da dissertação

fundamentos de IHC como TUIs, interação multimodal e design para crianças. No Capítulo 4 é apresentado o método classificatório criado em nosso processo de pesquisa para a revisão crítica e comparativa dos trabalhos correlatos, a qual é descrita no mesmo capítulo. Por sua vez, o Capítulo 5 descreve a especificação da arquitetura da solução. No Capítulo 6, o método empregado para avaliar um protótipo dessa arquitetura é apresentado, com os resultados descritos no Capítulo 7. A discussão de resultados é feita no Capítulo 8 e as conclusões tecidas no Capítulo 9.

Capítulo 2

Fundamentação Multidisciplinar

2.1 Cegos e Acesso a Leitura - Breve Panorama

Até o fim da Idade Média não eram oferecidas oportunidades de acesso à leitura aos cegos, os quais eram comumente destinados a hospícios. No início do século XVI, o italiano Girolamo Cardano foi pioneiro em sugerir o uso de alfabeto em relevo para que cegos aprendessem a ler e escrever pelo tato, proposta que, no século seguinte, o padre Francesco Lana-Terzi esforçou-se em simplificar [Stadelman, 1913]. No entanto, apenas após um hiato histórico de pouco mais de um século, retomou-se o avanço da inclusão dos cegos na educação, no contexto da sociedade francesa.

O Instituto Real dos Jovens Cegos de Paris, fundado por Valentin Haüy, empregava uma instância de alfabeto romano em relevo (Figura 1). À época, o oficial do exército francês Charles Barbier propôs um sistema de escrita noturna, para fins militares, de pontos em relevo em células de 6 linhas por 2 colunas mapeando fonemas do idioma nativo. O sistema de Barbier foi apresentado, a convite de Haüy, na instituição em período no qual Louis Braille era seu aluno. A proposta de Barbier não encontrou lugar nem no meio militar nem na comunidade cega devido a sua complexidade. Porém, Braille a simplificou para um sistema em tamanho que permitiu a leitura na ponta do dedo (3x2 pontos) mapeando letras individuais do alfabeto romano em cada combinação distinta de pontos sobre a célula no lugar de sons da língua oral. [Baptista, 2000]



Figura 1: O braille e outros alfabetos táteis propostos na história [Stadelman, 1913]

O sistema braille difundiu-se ao redor do mundo como forma universal de leitura tátil dos cegos com a decisão feita em congresso de 1878 de Paris [Baptista, 2000]. Encontrou resistência em países de língua inglesa como os EUA, que tardaram na adoção do braille preferindo os sistemas de Howe e Wait (Figura 1), e na Inglaterra que, apesar da adoção, apresentou as alternativas de Gall e Moon (Figura 1). Hoje o braille é adotado oficialmente em 142 países e em 27 línguas de acordo com relatório de uso global da Perkins Institute [Perkins et al., 2013].

No Brasil Império, D. Pedro II fundou o Imperial Instituto dos Meninos Cegos em 1854 (atual IBC). Desde o início, o IBC adotou o sistema braille para o ensino dos alunos graças a influência de José Alvares de Azevedo que aprendeu o código na instituição de Paris [Lemos e Cerqueira, 2013]. Hoje, sob a diretriz da inclusão, 91,8% dos alunos da Educação Especial encontram-se matriculados em ambientes incluídos ao invés de especializados [INEP, 2014], fato que suscita a necessidade de crítica sobre quão apta está a educação pública na abordagem do ensino de braille como sistema de excelência para a leitura/escrita de pessoa cegas no ambiente inclusivo.

2.2 O Código Braille

Conforme Figura 2A, a cela¹ braille consiste em uma matriz de pontos disposta em 3 linhas por 2 colunas, onde cada ponto pode ser ordenado de 1 a 6 de cima para baixo, da coluna esquerda para a coluna direita. Cada ponto pode encontrar-se no estado em relevo ou “abaixado”, sendo que as letras são combinações da abstração lógico-matemática da célula dadas por subconjuntos S de acordo com a condição $S \subseteq \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, como no exemplo da Figura 2B em que a letra “c” é dada pelo subconjunto $S = \{1, 4\}$. Por fim, há também os símbolos braille compostos de mais de 1 cela, como o caso de letras em caixa alta com uso do prefixo $S = \{1, 3\}$ (Figura 2C) e numerais representados pela justaposição do prefixo $S = \{1, 4, 5, 6\}$ com a letra simples de ordem referente ao número, como exemplificado na Figura 2D ao representar o numeral 3 pela letra “c” enquanto 3^a do alfabeto.

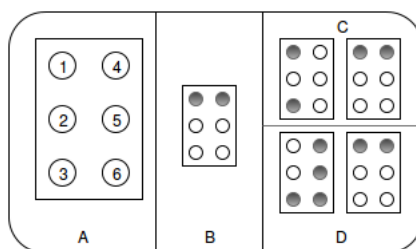


Figura 2: A célula do sistema braille: A) pontos numerados da matriz da célula; B) caractere simples ‘c’; C) caractere composto por prefixo de caixa alta ‘C’; D) caractere composto por prefixo de numeral ‘3’

¹Segundo a CBB, os termos cela e célula podem ser igualmente empregados no contexto do braille, porém o primeiro foi aqui adotado por ser o mais frequente nos documentos da mesma comissão

O braille do Brasil também dispõe de abreviaturas e estenografias mantidas pela Comissão Brasileira de Braille (CBB) [Ministério da Educação, 2017], mas seu uso é escasso no país. A estenografia permite reduzir morfemas que ocupam mais de uma cela a uma combinação em uma única cela, almejando a diminuição de espaço e aumento da velocidade de leitura. No idioma inglês, o braille de grau 2 é bastante difundido como uma instância de uso de estenografias no código, porém cria obstáculos na aprendizagem dos alunos cegos.

Por fim, o braille apresenta representações variáveis para diferentes domínios. A CBB mantém documentos referentes aos domínios da Música, Matemática e outras Ciências, Informática, além da normatização para a Língua Portuguesa.

2.3 Letramento e Aprendizagem

Uma distinção inicial de dois conceitos diferentes porém interdependentes faz-se necessária: alfabetização e letramento. Alinhado à desmistificação, promovida por Magda Soares, da falsa dicotomia entre os dois tópicos, aborda-se a alfabetização enquanto a aquisição da tecnologia de escrita (no contexto desta pesquisa, o braille) e o letramento como o uso social feito da mesma tecnologia [Soares, 2004]. Soares reforça a especificidade da alfabetização, a qual aborda as relações grafema-fonema e a ortografia, que não pode ser dissociada de um contexto de letramento, na qual a pessoa imerge na cultura escrita com seus gêneros textuais, usos e funções na sociedade [Soares, 2004].

No Grupo de Pesquisa em IHC, Bueno elicitou os insumos conceituais para uma aplicação de letramento, através do método pela via direta proposto pela *Association Française pour la Lecture* (AFL), focada no ensino bilingue de surdos, cuja língua primária é a Libras [Bueno, 2014]. No método empregado, os surdos deveriam reconhecer os léxicos da Língua Portuguesa por meio do reconhecimento e aprendizagem dos contornos globais e formatos das palavras. Embora os resultados documentados tenham sido positivos, cabe ressaltar que surdos são privados do sentido da audição e, portanto, não podem ter acesso à via dos fonemas, diferentemente dos indivíduos cegos.

Foucambert, principal autor da AFL, diferencia o saber-ler do saber-decifrar [Foucambert, 1994]. Para ele, as práticas de leitura significativa levam ao primeiro, enquanto o segundo é resultado da atividade mecânica de decodificação da fonética do texto independentemente do acesso do leitor à semântica. Nesse cenário, o autor estabelece que a escrita é, primariamente, visual, contendo vários signos visuais (índices, paginações etc.) em gêneros textuais diversos com fins sociais também distintos, e que, portanto, a leitura é a construção de estratégias de acesso ao significado pelo visual, compreendendo a aprendizagem da relação fonética como um evento posterior realizado pelo leitor-aprendiz.

Devido às necessidades físico-motoras dos sujeitos cegos, o reconhecimento do braille é necessariamente realizado das partes (morfemas) para o todo. O conjunto de habilidades motoras, cognitivas e auditivas que devem ser estimuladas para a leitura em braille é listado

sob o denominado período pré-braille [McComiskey, 1996]. Por conseguinte, o alinhamento deste trabalho ao letramento pela via direta usado no grupo de pesquisa se dá no aspecto de trabalhar com conteúdos textuais significativos nas atividades propostas, e não no princípio de reconhecimento global de natureza visual da língua escrita.

O neurocientista Stanislas Dehaene relata que as descobertas de sua área permitiram evidenciar a existência de duas vias de leitura no cérebro [Dehaene, 2012]: (1) a via fonológica, pela qual as palavras novas e regulares são pronunciadas mentalmente antes de acessar o referente valor semântico; (2) a via direta, pela qual as palavras frequentes ou irregulares têm acesso direto ao significado para depois serem pronunciadas. As duas vias da leitura coexistem e complementam uma a outra, sendo que nos leitores videntes o processo se inicia nas capacidades da retina em captar os traços, que compõem letras, que por sua vez formam morfemas e, por fim, percorrem o caminho das duas vias neurais da leitura.

A principal contribuição científica de Dehaene trata-se da identificação de uma área específica do cérebro empregada no processo de leitura: a região occípoto-temporal do hemisfério esquerdo [Dehaene, 2012]. A ativação dessa área foi estressada em experimentos com pessoas videntes e, ao ser tomada a mesma hipótese com indivíduos cegos leitores de braille, confirmou-se a mesma atividade neural pela comparação de sequências braille sem sentido com palavras significativas [Reich et al., 2011]. Posteriormente, a conversão de letras visuais em áudio demonstrou a ativação da área cerebral da leitura [Striem-Amit et al., 2012], reforçando que o desenvolvimento neuro-cognitivo independe do sentido corporal usado para entrada (percepção) do código.

2.4 Contexto Prático do Ensino de Braille

Em encontros com pedagogas de Centros de Atendimento Educacionais Especializados (CAEEs)², levantaram-se pontos da realidade das práticas de ensino para cegos em Curitiba. Os CAEEs atendem alunos cegos e com baixa visão matriculados no ensino regular (além de adultos com cegueira adquirida), de acordo com a Lei da Inclusão [Brasil, 2015], no contraturno e em horários de atendimento individualizados por aluno. O atendimento visa atender às necessidades particulares de cada educando.

Os CAEEs estruturam-se com recursos provenientes do Estado do Paraná, além de doações da sociedade civil. No entanto, os CAEEs visitados demonstram dificuldades financeiras para manutenção básica, inviabilizando a aquisição de equipamentos específicos braille de alto custo, como impressoras braille. Nesse cenário, ressalta-se o documento de apelo à consciência em que Rosa, diretor do Instituto Paranaense de Cegos (IPC) em 2014, comunica a existência de uma crise na educação de cegos no Paraná [da Rosa, 2014].

A alfabetização em braille é um serviço oferecido pelos CAEEs. Para tal, ensina-se e treina-se a sensibilidade tátil, a noção espacial da cela e, para sua escrita, exercícios repetitivos

²Encontros pessoais em dois CAEEs de Curitiba entre maio/2017 e agosto/2017

sobre o punção e reglete, numa progressão das partes para o todo. Assim como reforçado pelas vídeoaulas de Camargo [de Camargo, 2014], exercícios para treinar a direção da escrita (contrária a da leitura) e a perfuração dos pontos da cela são feitos repetindo-se uma mesma sequência sobre na linha do reglete: perfurar a sequência ordenada de pontos, do 1º ao 6º. Em seguida, avança-se pela repetição de escrita das letras, para só então trabalhar com a produção de palavras.

2.5 Considerações do Capítulo

Neste capítulo foi revisada a trajetória histórica da concepção do braille, ressaltando sua importância enquanto direito de acesso à leitura/escrita pela população cega. Também foi descrita a estrutura do código braille, a partir do conceito da cela com combinações de seis pontos. Conceitos de alfabetização, letramento e aprendizagem que permeiam a realização do trabalho também foram abordados. Por fim, também mostrou-se uma breve visão da realidade do ensino de braille, a partir de uma breve descrição do caso de Curitiba, local onde situou-se a realização desta pesquisa.

Os fundamentos multidisciplinares visam informar da melhor forma o design sobre os fatos do domínio abordado. Questões como a dificuldade financeira que vivem os CAAEs e as abordagens de letramento, reforçam os objetivos almejados neste trabalho de uma solução de baixo custo e com abordagens motivadoras. No Capítulo seguinte, abordam-se fundamentos da IHC, área que fornece a visão de mundo para atuar sobre o domínio aqui discutido.

Capítulo 3

Fundamentação em Interação Humano-Computador

O presente trabalho situa-se na área de Interação Humano-Computador (IHC), em sua essência multidisciplinar [Carroll, 2013]. Apesar da diversidade, paradigmas de interação dominantes são observados historicamente: a área de trabalho de manipulação direta, o paradigma de busca com o advento da *internet* e, atualmente, a computação pervasiva cada vez em maior número de dispositivos, de *smartphones* a eletrodomésticos, mostrando uma tendência de proliferação dos computadores “invisíveis” no cotidiano [Carroll, 2013, Grudin, 2012]. Entretanto, tal evolução tecnológica ocorreu em uma sociedade de cultura visuocêntrica [de Sousa, 2004], tornando a visão o principal sentido de acesso ao *feedback* da interação, demandando complementos, como os leitores de tela, e boas práticas dos designers de *software* para prover acessibilidade à minoria privada da visão.

3.1 Interfaces Tangíveis de Usuário - TUIs

A interface tangível de usuário (TUI) é um paradigma lavrado por Ishii e Ullmer, do MIT Media Lab, a partir do projeto pioneiro Tangible Bits, no qual os autores almejam a manipulação de informações virtuais através de qualquer objeto manipulável do dia-a-dia, empregando qualquer superfície do ambiente como espaço de interação e fazendo uso das mídias do ambiente (luz, sons etc.) [Ishii e Ullmer, 1997]. No trabalho Tangible Bits, os autores referem-se a necessidade de substituição dos bits pintados pelos bits tangíveis em uma crítica ao paradigma dominante de interação:

“A atual IHC, baseada em GUIs, exhibe toda a informação como ‘bits pintados’ em telas retangulares no primeiro plano, assim restringindo-se a canais de comunicação muito limitados. GUIs não atingem o objetivo de abranger a riqueza dos sentidos e habilidades humanas que as pessoas desenvolveram por toda uma vida de interação com o mundo físico.” [Ishii e Ullmer, 1997]

3.1.1 Fundamentos Teóricos

Da revisão de *frameworks* de TUIs realizada por [Shaer e Hornecker, 2009] tomam-se 2 classificações conceituais para aprimoramento da fundamentação deste trabalho:

- *Nível de incorporação*: (a) completa, onde o mesmo dispositivo faz a entrada e saída; (b) próximo, quando a saída é dada próxima ao objeto de entrada; (c) ambiente, quando a saída é ao redor do usuário; (d) distante, quando a saída é em outra tela ou outro recinto.
- *Metáfora de TUI*: (a) pronome, quando os atributos tangíveis da interface são análogos ao objeto real que a mesma representa; (b) verbo, quando os movimentos da interação são análogos as ações realizadas com o objeto real que a interface representa; (c) pronome-verbo, quando a analogia da TUI é tanto nos atributos tangíveis quanto nos movimentos de interação; (d) completa, quando a TUI trata-se do próprio objeto real significado.

Ishii defende uma linha evolutiva de TUIs baseada na evolução dos materiais de implementação, a qual possui duas gerações [Ishii, 2008]: Primeiramente, as TUIs representadas por objetos manipuláveis discretos, que representam uma única função computacional determinística; Em segundo as TUIs orgânicas, possibilitadas pela evolução dos materiais flexíveis, que permitem expressar interações de forma a computar num espaço contínuo, como no exemplo de o SandScape¹, TUI que permite várias possibilidades de simulação pela manipulação de areia. A partir da ideia da TUI que manipula grãos de areia, decide-se empregar o termo **granularidade** nesta dissertação para definir a propriedade das possibilidades que a TUI permite de interagir com as unidades menores que compõem o objeto. No caso do domínio abordado, a granularidade refere-se aos níveis dos pontos da cela braille, a cela braille com pontos não removíveis ou a sentenças maiores preestabelecidas.

3.1.2 TUIs para Educação

No domínio da aprendizagem, as TUIs foram aplicadas em vários designs para diferentes contextos, porém os resultados positivos e *frameworks* específicos foram criticados pela falta de testes empíricos que isolem as variáveis que definem o sucesso dessas aplicações [Marshall, 2007]. Basicamente, há diversos resultados positivos publicados sobre sucesso de transferência de aprendizagem motora [Markova, 2013], aprendizagem cognitiva [Antle et al., 2011] ou mesmo de maior diversão proporcionada quando comparadas a GUIs análogas [Xie et al., 2008], mas Marshall defende que faltam evidências rigorosas que suportem o porquê de TUIs serem benéficas no processo do aprendizagem tal como costuma ser assumido como premissa na literatura da área [Marshall, 2007]. Para mapear a complexidade do fenômeno, Marshall [Marshall, 2007] propôs o diagrama da Figura 3 com uma série de variáveis sobre TUIs na aprendizagem.

¹Projeto descrito em: <http://tangible.media.mit.edu/project/sandscape/>

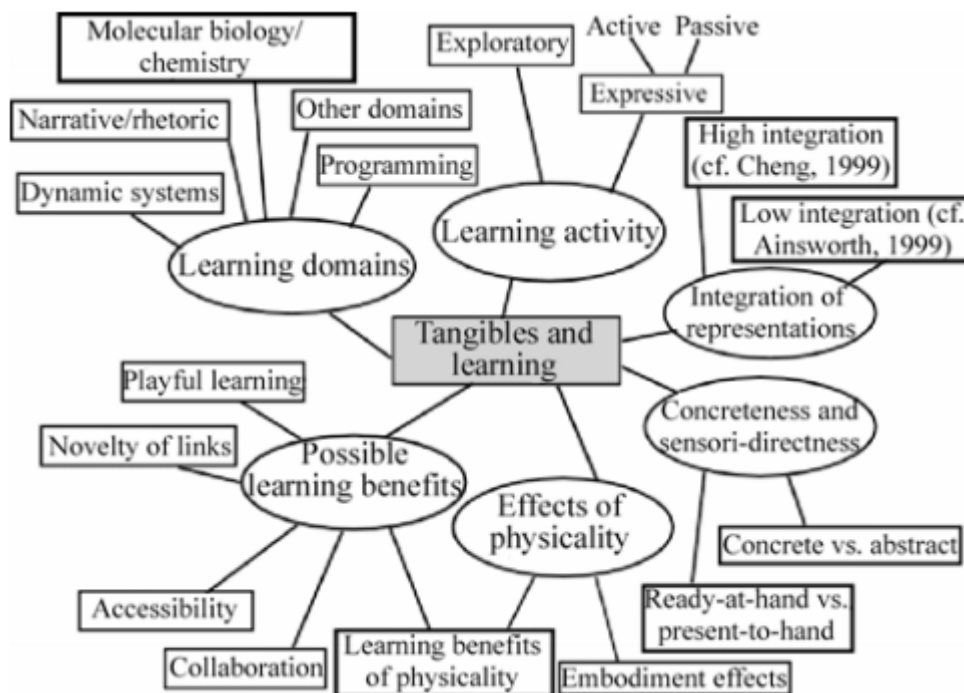


Figura 3: Fatores relacionados ao processo de aprendizagem com TUIs [Marshall, 2007]

As características elencadas na Figura 3 têm o intuito de servir de base para investigação de TUIs no campo da aprendizagem, porém o caráter incipiente não fornece um *framework* suficientemente explicativo para apoiar o *design*. Markova, Wilson e Stumpf [Markova et al., 2012] propõem uma taxonomia de classificação das TUIs para aprendizagem unindo conceitos do domínio aos conceitos técnicos de TUIs, mas a estrutura proposta estimula a classificar as características do objeto analisado dicotomicamente, como no exemplo de uma categoria para descrever o número de participantes, na qual o *framework* limita a TUI a ser julgada como colaborativa ou individual, inviabilizando o reconhecimento das diversas possibilidades híbridas no *design*. No estado recente e não conclusivo da área de TUIs, as 12 diretrizes de Antle e Wise [Antle e Wise, 2013], baseadas em perspectivas multidisciplinares de 6 embasamentos teóricos distintos (processamento de informação, construtivismo, interação incorporada, cognição distribuída e colaboratividade), informando indicações para o projeto relacionadas com os aspectos técnicos de TUIs, são consideradas alinhadas aos valores de multidisciplinaridade deste trabalho e, portanto, a mais abrangente base para projeto de TUIs no domínio de aprendizagem até então revisada.

3.1.3 Exemplos de TUIs

Dentre a diversidade de TUIs, algumas instâncias implementadas por meio de visão computacional forneceram *insight* a este trabalho. No domínio da música, o trabalho de [Costanza et al., 2010] ofertou uma TUI para livre composição musical que poderia ser impressa da internet e apropriada pelos usuários (Figura 4A). Outra TUI musical é o *reactTable*

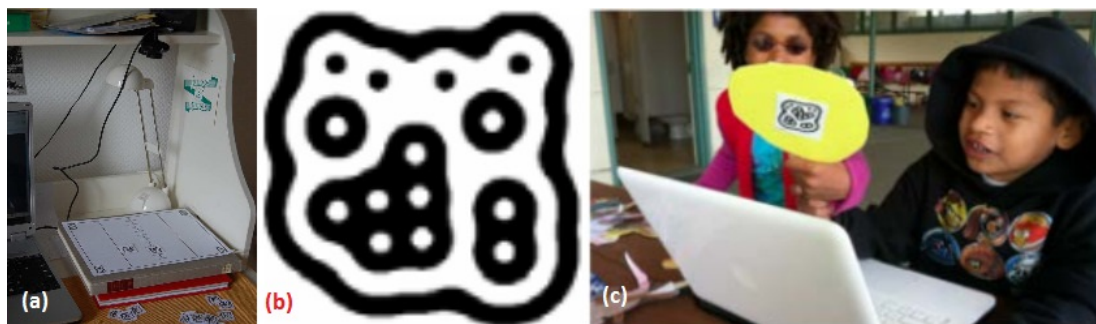


Figura 4: Exemplos de TUIs

[Jordà et al., 2007] que empregou marcadores detectáveis como os da Figura 4B. Por fim, uma apropriação dos marcadores do *reactTable* foi empregada no trabalho de [Ahearn et al., 2013] ao marcar objetos para práticas de letramento com crianças de El Salvador e Uganda que, ao manipular figuras caninas marcadas frente a uma *webcam* puderam se envolver em práticas de contação de histórias.

3.2 Interação Multimodal

A interação multimodal baseia-se na busca de uma forma de interação mais próxima da natureza humana, a qual ora é paralela ora é sequencial, ora ativa ora passiva, e emprega todos os sentidos [Turk, 2014]. Tal fundamento vem a complementar o conhecimento sobre TUIs, as quais têm grande foco na manipulação tátil dos objetos, embora não somente abordem o sentido do tato. Os cegos, desprovidos da visão, têm o tato como meio primário para o seu sistema de leitura, porém empregam o sentido da audição para uma diversidade de tarefas cotidianas, o que no ponto de vista multimodal pode vir a complementar a interação com o sistema tangível.

A relação aproximada entre TUIs e interação multimodal é documentada desde o trabalho pioneiro de Ishii e Ullmer [Ishii e Ullmer, 1997], que apontam as consequências propostas pela mudança de um paradigma de GUI para o de TUI:

“Nossa tentativa é de alterar “bits pintados” para “bits tangíveis” aproveitando dos múltiplos sentidos e da multi-modalidade da interação humana com o mundo real. Acreditamos que o uso de objetos palpáveis e mídia de ambiente nos levará a uma experiência multi-sensorial da informação digital muito mais rica.” [Ishii e Ullmer, 1997]

A maioria dos modais de interação baseiam-se na visão (computacional), como a detecção de gestos e expressões faciais [Jaimes e Sebe, 2007], porém há modais a partir de processamento de áudio e baseados em botões táteis, por exemplo. Ressalta-se como vantagens dos sistemas multimodais, o uso flexível de modais (alternar ou integrar), eficiência, redundância para evitar erros e inclusão de maior número de perfis de usuários [Turk, 2014].

Não tem-se a intenção de aprofundar a investigação sobre interação multimodal, já que a implementação na instância desta pesquisa foi introdutória. No entanto, um estudo prévio a

elaboração desta dissertação levantou um *insight* técnico que encontra espaço neste projeto. Ao investigar o padrão de livros falados acessíveis DAISY², verificou-se que a estrutura padrão para sincronização de mídia é o formato SMIL [W3C, 2008] do World Wide Web Consortium (W3C). Tal padrão permite estruturar diversos tipos de mídia (texto, imagens, sons etc.) sequencial ou paralelamente, podendo apoiar implementações de armazenamento, recuperação e processamento multimodal.

3.3 Jogos e Design para Crianças

O potencial de apropriação desta proposta é para o público infantil, em faixa etária de alfabetização ou letramento. Um desafio para o ensino desse público é mantê-lo motivado para a aprendizagem, logo foram consultadas soluções de *design* para crianças e jogos. No grupo de pesquisa, o trabalho de Canteri [Canteri, 2014] realizou uma revisão bibliográfica que justifica o potencial de jogos educativos na aprendizagem e desenvolve um projeto focado na educação de Surdos.

Um jogo é uma atividade de resolução de problemas abordada com uma atitude lúdica, diferente de um brinquedo que trata-se de um objeto com o qual você brinca, sem regras e objetivos bem delineados [Schell, 2008]. Tal distinção aproxima-se da polarização que o sociólogo Caillois estabelece entre ludus e paidia: o primeiro refere-se às regras e disciplina do jogo, enquanto o segundo é relacionado ao princípio da espontaneidade infantil em livremente envolver-se no jogo [Caillois e Barash, 1961]. A partir de tal definição, encontra-se o trabalho de [Petersen et al., 2015] que explora materiais como LEGO para ofertar experiências de jogar construindo com objetivo em aberto, ou seja, no espaço de paidia, porém os autores encontram a necessidade de delimitar um tema levantando a questão de quão aberto (ou, em outros termos, quão pertencente a paidia) pode ser um jogo.

Um outro trabalho buscou diretrizes para o design de jogos inclusivos para crianças neurodiversas [Sobel et al., 2015]. No trabalho, atenta-se ao uso de um espaço de design conceitualizado entre os polos de inclusão ou especialização, além dos polos de jogos estruturados (com objetivos e regras) e desestruturados (sem objetivos e regras). Neste cenário, a proposta deste trabalho situa-se num ponto de vista, fundamentado no objeto de domínio (braille), no espaço de *design* especializado buscando transitar para o espaço de *design* inclusivo, com apoio de atividades a princípio estruturadas, buscando explorar possibilidades de atividades desestruturadas, conforme Figura 5.

Por fim, a relação de letramento e jogos é reconhecida nas práticas linguísticas promovidas pela linguagem própria de jogos de entretenimento [Steinkuehler, 2008]. Mais que isso, a pesquisa de [Steinkuehler, 2008] elicitava práticas de letramento tradicional motivada pelos jogos *multiplayer online* jogados por crianças, tais como a leitura e escrita de tutoriais. Seja em

²<http://www.daisy.org/>

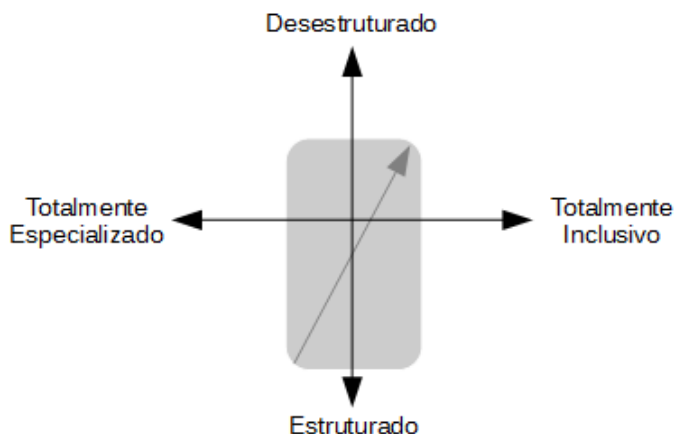


Figura 5: Espaço de design situado deste trabalho adaptado da conceitualização de [Sobel et al., 2015]

uma interação regrada ou espontânea, jogos constituem uma abordagem que permite estimular a motivação para as práticas seja de alfabetização ou letramento abordadas no Capítulo 2.

3.4 Considerações do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados conceitos teóricos da área de TUIs, a qual fornece o principal embasamento teórico da abordagem de IHC aqui empregada. Embora seja uma área específica relativamente recente na IHC, a mesma conta com intensa produção, como observável nos anais da conferência Tangible and Embedded Interaction³, filiada à Association for Computing Machinery (ACM), com 11 edições já realizadas. De forma complementar, conceitos de interação multimodal, *design* para crianças e jogos também foram apresentados como fundamentos da seção.

Os fundamentos de IHC apresentam-se como parte do método estruturado no Capítulo 4 para a revisão de trabalhos correlatos na literatura. Além disso, são fundamentos para a especificação da arquitetura do Capítulo 5.

³Disponíveis em <http://dl.acm.org/event.cfm?id=RE271>

Capítulo 4

Revisão de Trabalhos Correlatos

Para propor a solução almejada por este trabalho foi preciso conhecer as iniciativas de tecnologias que podem ser apropriadas para o letramento em braille. Uma vez conhecidas, questionou-se: como viabilizar a análise, comparação e isolamento de variáveis relevantes a este trabalho? Para tal, inicia-se este capítulo pela proposta inicial de um método classificatório, posteriormente empregado na revisão bibliográfica de tecnologias de apoio ao braille.

Não foi encontrada revisão de iniciativas correlacionadas prévias a este trabalho. Com isso, identificou-se a necessidade de elaborar uma revisão própria para: (1) dispor de uma lista mais abrangente de tecnologias de apoio ao letramento em braille; (2) decompor a complexidade em uma série de variáveis de análise. Foram consultadas assistematicamente as bases da ACM, IEEE, SpringerLink e ScienceDirect com as palavras-chave “braille literacy”, “braille technology” e “braille learning”. O critério empregado na inclusão de artigos da revisão aqui documentada é: propostas que permitam ter a experiência tátil com o braille, seja ativa ou passivamente, na forma de entrada ou saída. Por tal critério, 11 referências foram incluídas por terem resumos compatíveis com o objetivo da revisão de literatura.

4.1 Um Método Classificatório para Tecnologias Braille

A sistematização da revisão vai ao encontro do objetivo específico de “estabelecer um método classificatório para avaliação de tecnologias de apoio ao letramento braille”. O método, visando materializar uma primeira versão do objetivo citado, é apresentado na Tabela 1 compreendendo as questões do estudo e os possíveis enquadramentos em pontos-chave para guiar a análise. Tal método compreende 9 questões emergentes do arcabouço teórico desta pesquisa, sem ordem hierárquica definida até o momento, listadas e justificadas a seguir:

Q1 - Custo Qual é o custo, tanto de aquisição como reprodução, da tecnologia? Pergunta elaborada a partir da propriedade de **baixo custo** do objetivo geral descrito na seção 1.2, respaldado na revisão do contexto real de ensino de braille da seção 2.4.

Q2 - Espaço Qual é o espaço para celas braille disponível? Pergunta elaborada a partir da revisão em letramento (seção 2.3), visando o potencial de abordagem de gêneros textuais significativos na tecnologia.

Q3 - Símbolos O sistema permite o uso de estenografia braille (grau 2), pontuações, sinais compostos ou notações de outros domínios? Pergunta elaborada com base no objeto do domínio, o sistema braille, conforme apresentado na seção 2.2.

Tabela 1: Perguntas e atribuições possíveis para o método classificatório de tecnologias braille

Pergunta	Classificação
Q1 - Custo	Alto custo de aquisição e reprodução Dependente de <i>hardware</i> de baixo custo e conhecimento para replicação do projeto Definido por <i>software</i> para computadores comuns, logo de baixo custo
Q2 - Espaço	Fixo/estático Dinâmico: matriz de celas pode ser aumentada ou diminuída
Q3 - Símbolos	Grau 2 Sinais compostos Outros domínios Pontuações
Q4 - E/S	Entrada somente Saída somente Entrada e saída Nenhum
Q5 - Metáfora	Pronome Verbo Pronome-verbo Completa
Q6 - Granularidade	Ponto a ponto da cela Letra completa na cela Porções maiores de texto
Q7 - Multimodal	Processamento de voz Interface gráfica complementar <i>Feedback</i> de áudio <i>Feedback</i> de motores vibratórios <i>Feedback</i> tangível
Q8 - Motivação	Jogos Colaboratividade Gêneros textuais significativos
Q9 - Professor	Nenhuma: ferramenta exclusivamente autodidata Escolher dentre opções determinadas, como níveis e tarefas Criar e personalizar objetos de aprendizagem

- Q4 - E/S** O sistema permite entrada tátil ou saída tátil de braille? Pergunta elaborada a partir da propriedade **tangível** almejada no objetivo geral descrito na seção 1.2.
- Q5 - Metáfora** Qual metáfora de TUI o sistema implementa? Pergunta fundamentada na revisão sobre a área de TUIs da seção 3.1.1, especificamente no conceito de metáfora [Shaer e Hornecker, 2009].
- Q6 - Granularidade** Qual é a granularidade de manipulação do braille na TUI? Pergunta elaborada a partir do conceito de “granularidade” proposto na fundamentação de TUIs (seção 3.1.1).
- Q7 - Multimodal** Quais opções de interação multimodal apoiam a ferramenta? Pergunta fundamentada na revisão de interação multimodal da seção 3.2.
- Q8 - Motivação** Quais abordagens motivadoras para o ensino de crianças inclui a ferramenta? Pergunta fundamentada na revisão de *design* para crianças e jogos da seção 3.3.
- Q9 - Professor** Quais possibilidades são fornecidas para o papel de ensino do professor? Pergunta baseada no objetivo geral (seção 1.2) da propriedade de **apoio aos educadores** do projeto.

Os classificadores, além de emergentes da fundamentação teórica, foram coletados a partir das características presentes nos trabalhos aqui revisados. Logo, o método trata-se da síntese de características já existentes no estado da arte e características desejadas a partir da investigação teórica correlacionada ao problema de pesquisa.

O uso do método na análise da revisão propiciou a subdivisão de 4 categorias de tecnologias braille observadas, as quais são detalhadas nas seções 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6. Ao fim do capítulo, na seção 4.7, consolida-se a análise comparativa das categorias revisadas.

4.2 Ponto de Partida: Tecnologias Tradicionais

Antes de documentar-se os projetos computacionais que a comunidade de pesquisa propôs para a leitura, escrita e aprendizagem de braille, conceituam-se aquelas tecnologias tradicionais no histórico de leitura dos cegos. Entende-se que muitas das tecnologias novas inspiram-se em metáforas não só do código braille em si, mas dessas tecnologias que apoiaram e continuam apoiando a vida de indivíduos cegos. Mostra-se aqui o porquê de elas serem custosas e demandarem novas propostas para a minimização do problema da desbrailização.

O par punção e reglete (Figura 6a) representa ao escritor cego o que a caneta, analogamente, representa ao escritor vidente. Trata-se de um meio manual no qual o reglete marca as linhas de células sobre a folha de papel como referência que o escritor usa para perfurar com o punção no sentido contrário ao da leitura (espelhado) de forma que, ao finalizar a tarefa, o texto possa ser lido normalmente no verso da folha. O sentido da escrita espelhado e a coordenação

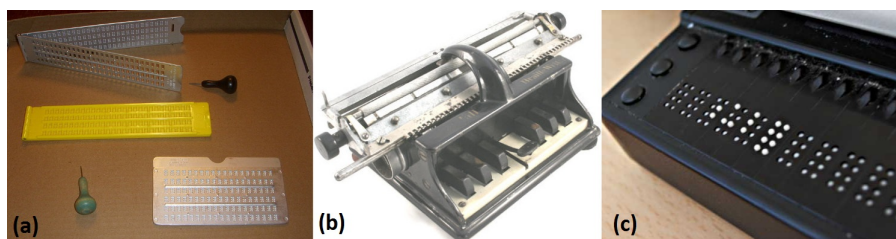


Figura 6: Tecnologias tradicionais de apoio ao braille

motora compõem a complexidade do domínio de uso da ferramenta, fato minimizado pela criação da reglete positiva [Alisson, 2013], que minimiza o problema permitindo a escrita no sentido natural da leitura. No entanto, a reglete tradicional ainda é a forma mais comum da ferramenta.

A primeira máquina de escrever braille (Figura 6b) foi inventada pelo americano Frank Hall em 1892, composta de 7 teclas das quais as 3 de cada lado definem o mapeamento dos dedos intermediários das mãos para os pontos da coluna da célula braille na coluna do respectivo lado, e a tecla do meio serve para escrever espaços entre as palavras. Tal mapeamento persiste até hoje nas máquinas produzidas pela empresa Perkins, que são encontradas a preços de cerca de R\$ 4.500,00¹, bem como é uma abstração que inspira outras tecnologias.

Outra tecnologia encontrada por valores altos no mercado são os *displays* braille (Figura 6c). Basicamente, um *display* braille consiste de uma linha de celas com pinos que levantam ou abaixam como saída a uma interação em um computador. Por outro lado, o uso de uma saída de áudio é totalmente definida por *software* executado sobre dispositivos computacionais comuns, de computadores pessoais a *smartphones*, fato que propagou os leitores de tela como alternativa menos custosa para a acessibilidade computacional dos cegos. A questão-chave é que, comparado às tecnologias braille, o leitor de tela tornou-se muito barato, com algumas opções em *software* livre (NVDA², Orca³ etc.) e estímulo promovido por normas do W3C [W3C, 2017], contribuindo, mesmo que não intencionalmente, com a crise de desbrailleização corrente.

4.3 Braille em Telas Touchscreen

De todas as tecnologias revisadas, 45,5% correspondem a implementações de *softwares* que permitem escrita ou leitura de braille explorando as características presentes em telas de *smartphones* altamente utilizados na sociedade. O V-Braille [Jayant et al., 2010] é uma das primeiras instâncias dessa categoria, originalmente para leitura braille de surdocegos, ele não possui *feedback* de áudio e apenas vibra (globalmente no dispositivo) ao se tocar um ponto levantado da cela, a qual é representada dividindo-se a extensão total da tela em 6 blocos. A experiência proporcionada é, em termos de tangibilidade, muito limitada e distante do braille real

¹Orçamento solicitado via email com revendedor de Curitiba em Dezembro/2015

²<http://www.nvaccess.org/>

³<https://wiki.gnome.org/Projects/Orca>

por causa da superfície lisa da tela, fato agravado pela possibilidade de o usuário poder apenas perceber o conteúdo da cela explorando-a ponto a ponto.

Outras implementações em touchscreen têm as mesmas limitações básicas dos dispositivos centrados nas respostas visuais em vez de táteis, embora sejam mais refinados que o V-Braille. O BrailleType [Oliveira et al., 2011] é um exemplo que, além de ter a saída em áudio do conteúdo escrito, permite a entrada braille por meio de toques mais eficientes, dividindo a tela em 2 colunas de interação onde a quantidade de dedos (1 a 3) usados para tocar a coluna, preenche um padrão distinto. A ideia de “toques atalhos” pode tornar a entrada mais eficiente para usuários que já aprenderam o código braille, mas para a aprendizagem do sistema impõe uma nova abstração que aumenta a complexidade do processo.

Uma outra instância implementada é o BrailleTouch [Frey et al., 2011], que tem um projeto que destaca-se dos anteriores pela maior facilidade de manipulação do *smartphone* para entrada braille, realizada com o dispositivo segurado com as duas mãos na horizontal em mapeamento idêntico às máquinas de escrever braille (Figura 7). Seguindo a mesma característica de manipulação, o HoliBraille [Nicolau et al., 2015] visa acoplar motores vibrotáteis individuais para cada uma das 6 partes da tela touchscreen que compõem a representação da cela braille.

No HoliBraille [Nicolau et al., 2015], a individualização dos pontos permite a melhor experiência de percepção total da cela braille dentre as tecnologias *touchscreen* revisadas, uma vez que os pontos independentes vibram em paralelo para a saída braille na ponta de cada dedo posicionado na tela. Apesar disso, o projeto apresenta limitações técnicas que criam dificuldades de percepção de caracteres que fazem uso de 3 ou mais pontos nos leitores testados, pois o usuário confunde-se a respeito de quais foram os pontos retornados. Ademais, o perfil de usuários participantes da pesquisa foi de leitores fluentes em braille, distantes de um contexto de ensino-aprendizagem.



Figura 7: Exemplo de tecnologia braille em touchscreen: BrailleTouch [Frey et al., 2011]

Por fim, o BraillePlay [Milne et al., 2014] é um projeto que usa o mesmo mecanismo de entrada do V-Braille, acrescentando alguns gestos para entrada e saídas de áudio, para fornecer jogos para crianças cegas exercitarem o código braille. Três jogos foram testados com crianças, sendo o primeiro para identificar a letra lida em braille, outro para escrever em braille a letra ouvida e o terceiro um jogo de forca, os quais foram considerados “divertidos” de acordo com as entrevistas dos autores. No entanto, os autores reconhecem o pouco tempo de uso (em média

2,6h) nas semanas de testes em campo, fato que pode ser deduzido pela falta de incrementos de níveis de desafios nos jogos. Ademais, todas as possibilidades de desafio dos jogos são determinadas no *design*, não permitindo-se o papel de um tutor em trabalhar palavras motivadoras ao contexto e nível de conhecimento prévio da criança.

De modo geral, os trabalhos revisados e mencionados nesta categoria estão limitados à natureza plana das telas de *smartphones* ou *tablets*, tendo de recorrer aos motores de vibração no esforço de propiciar uma experiência mais próxima da realidade do braille em alto relevo lido pelo tato. Outro problema encontrado deve-se a comum limitação de espaço para apenas uma célula de entrada ou saída por vez, fato que impede a leitura de textos, palavras e até mesmo de caracteres compostos por duas celas, como numerais e letras maiúsculas. Por outro lado, destaca-se como aspecto positivo que os trabalhos são majoritariamente definidos em *software* para execução em dispositivos comuns, baixando o custo de aquisição e reprodução das soluções como almejado no objetivo desta dissertação. O trabalho de [Milne et al., 2014] é o único levantado na revisão que explora o potencial de jogos computacionais educativos como modalidade motivadora para o ensino-aprendizagem de braille.

4.4 Braille em Hardware de Baixo Custo

A segunda categoria comum para a implementação de tecnologias que apoiam escrita/leitura de braille identificada foi o projeto baseado em *hardware* de baixo custo, uma vez que tecnologias tradicionais apresentam alto valor de aquisição. Um exemplo precursor é o BrailleTutor [Kalra et al., 2009], que teve o objetivo de fornecer uma solução acessível (estimativa dos autores: US\$30 em 2009) para o letramento em braille de crianças cegas da Índia. O *design* do dispositivo é uma metáfora do punção e reglete em versão eletrônica, no qual a própria interação reflete a prática das habilidades motoras da ferramenta representada, bem como a escrita no sentido contrário ao da leitura, grande desafio da ferramenta tradicional que na solução dos autores é apoiado pelo *feedback* sonoro da ferramenta computacional.

A segunda versão do BrailleTutor [Kalra et al., 2009], baseada nos aprendizados dos estudos de campo de sua primeira versão, funciona dependente de conexão USB com um computador e permite usar punções tradicionais para escrever na reglete eletrônica. Uma característica que chama a atenção, de acordo com os critérios desta pesquisa, é a possibilidade de o professor definir um dos 3 níveis de *feedback* sonoro conforme a etapa na alfabetização do aluno: saída em nível de ponto tocado, em nível de letra escrita ou em nível de frase completa. Outra característica interessante é a proposta de *redesign* para a criação de uma biblioteca que comunica-se com o *hardware*, permitindo que programadores criem outras formas de interação com o dispositivo.

Outro trabalho existente é o MUDRA [Srivastava e Dawle, 2015], focado em fornecer interação multimodal para aprendizagem de braille por meio de uma única cela tangível implementada com Raspberry Pi. A interação com o dispositivo permite aprender (receber

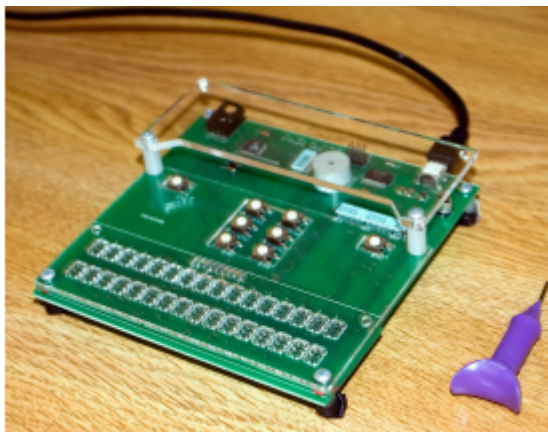


Figura 8: Segunda versão do BrailleTutor [Kalra et al., 2009]

instruções na cela braille e áudio paralelamente), consultar a forma braille de uma letra (por voz) e fazer avaliações (usuário lê a letra na célula braille e a fala). Embora o projeto explore diferentes modos de interação, ele possui o mesmo problema de limitação de espaço dos aplicativos para *smartphones*, limitando as representações possíveis, além de não fornecer nenhuma prática análoga à escrita e reduzir a aprendizagem do aluno à memorização do código para letras minúsculas (maiúsculas são caracteres compostos por duas celas).

Um terceiro trabalho revisado [Aizawa e Watanabe, 2014] apresenta similaridade com o BrailleTutor, uma vez que propõe uma reglete eletrônica, embora com apenas uma linha e seis celas. O diferencial de [Aizawa e Watanabe, 2014] encontra-se no fato de ser auto-contido, ou seja, não depende de ligação com o computador (como no caso de [Kalra et al., 2009]) e o *feedback* de áudio é dado no próprio *hardware*. Por fim, o trabalho, excluído da revisão por complementar os caros *displays* braille, possui características similares aos projetos aqui analisados: interação multimodal com uma entrada de reglete eletrônica e processamento de voz do usuário [Aizawa e Watanabe, 2014].

Esta categoria representa positivamente trabalhos que buscam objetos tangíveis para manipulação fornecidos a um valor aquisitivo mais acessível. Por outro lado, uma vez que tais projetos limitam-se a pesquisa e não tornam-se produção disponível no mercado, a reprodução das implementações requer conhecimentos mais avançados e acesso aos detalhes de baixo nível do *hardware*, possivelmente inviabilizando a adesão comparado a facilidade da categoria anterior. Tal fato aponta para uma oportunidade de “caminho do meio” entre as duas categorias até aqui revisadas.

4.5 Braille Vestível

A terceira categoria observada na revisão refere-se a aplicações diferenciadas empregando a percepção passiva do código braille. Aqui foi denominada de “braille vestível” em analogia à linha de pesquisa em computação vestível existente na IHC [Preece et al., 2013]. Por não

propiciarem uma experiência de leitura/escrita ativa e próxima da realidade tangível do braille, esta categoria é a mais distante dos objetivos da presente dissertação, porém os trabalhos da mesma passam nos critérios da revisão e aumentam o ponto de vista aqui defendido de questionar quais tecnologias são mais apropriadas para o ensino-aprendizagem de braille.

Um artigo propõe o uso de luvas para receber estímulos (Figura 9), seguindo o padrão de relação ponto da cela para dedo das máquinas braille, para que a aprendizagem do código ocorra de forma passiva [Seim et al., 2014]. Os autores realizaram um experimento pelo qual notaram a aprendizagem de algumas letras braille pelos participantes e, portanto, chegaram a conclusão de que o método pode ser factível para aprender braille [Seim et al., 2014]. Entretanto, deve-se criticar dois pontos fundamentais de como o experimento foi conduzido: 1) foram selecionados 16 participantes videntes e alfabetizados em língua inglesa; 2) enquanto o grupo principal recebeu estímulos passivos durante a participação em uma atividade de distração, o grupo de controle somente se dedicou à atividade de distração. Portanto, embora o experimento científico apresente resultados iniciais interessantes sobre aprendizagem passiva, de forma alguma permite a generalização como uma boa forma de ensino-aprendizagem para crianças cegas em fase de alfabetização sem experimentos com o devido rigor contextual.



Figura 9: Luva para aprendizagem passiva de braille [Seim et al., 2014]

Uma outra proposta, para ser usada em qualquer outra parte do corpo, é a implementação do body-braille [Ohtsuka et al., 2013], que são dois motores de vibração representando as colunas direita e esquerda da célula braille. Basicamente, os autores propõem um sistema de aprendizagem autodidata incremental, do estágio da percepção dos pontos ao estágio da leitura das palavras, para que um potencial usuário surdocego aprenda as abstrações propostas (ex.: vibração longa na esquerda, seguida de vibração longa na direita, terminada em vibração longa na esquerda representa os pontos da letra O em braille) e usufrua da tecnologia para comunicar-se com outras pessoas. O trabalho representa uma oportunidade de pesquisa para a comunicação mais eficiente de surdocegos, porém o braille nesse contexto é um pré-requisito para a aprendizagem da abstração em body-braille, o que não vem ao encontro do foco de letramento de crianças cegas da dissertação.

Os trabalhos analisados nesta categoria são de caráter experimental e não foram comparados com outros métodos para aquisição do sistema braille. Ademais, ambos sustentam uma defesa da percepção passiva do braille por meio de motores de vibração, fato que impede abordagens tangíveis, exercícios de exploração ativa, dentre outras possibilidades de um contexto

de aprendizagem mais diversificado e análogo à realidade do objeto ensinado. Por fim, as tecnologias expostas apresentam-se como possíveis complementos às outras em vez de substitutas.

4.6 Blocos Braille

A última categoria apresenta apenas um trabalho, o Electronic Braille Blocks [Jafri, 2014], o único dentre os revisados que foi diretamente fundamentado no campo de TUIs. O projeto consiste em cubos com a representação tátil de uma letra braille em uma das faces e, na face oposta, uma *tag Near Field Communication* (NFC) para detecção do sistema, o qual é composto de um leitor de *tags* NFC plugado a um computador pessoal. A representação gráfica do sistema está na Figura 10. A interação foi projetada de forma que a criança consiga manipular o cubo, colocá-lo sobre a superfície de detecção que, por sua vez, pode retornar o áudio referente à letra, exemplos de palavras que iniciam com a letra, dentre vários possíveis cenários, como o sistema desafiar a criança a retirar da superfície de detecção a letra que inicie a palavra falada.

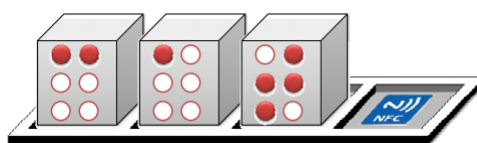


Figura 10: Representação do Electronic Braille Blocks [Jafri, 2014]

O projeto, apesar de incipiente, apresenta tangibilidade simples, tornando a manipulação dos cubos análoga a de brinquedos de alfabetização. Além disso, outro ponto positivo é a projeção dos autores para a flexibilização de diferentes e criativas formas de interação, proporcionando a possibilidade de adaptação de práticas motivadoras para as crianças. Já do ponto de vista negativo, deve-se atentar ao fato de que as letras pré-definidas em cubos não permitem a exploração do braille ponto a ponto, nem o limite do *hardware* da superfície de detecção permite a escrita de palavras ou sentenças significativas, comprometendo a granularidade de exploração do braille.

4.7 Considerações do Capítulo

O uso do método classificatório permitiu gerar a visualização das 4 categorias de implementação exibida na Tabela 2. A consolidação ocorreu de acordo com o potencial acumulado de todos os trabalhos revisados em cada categoria.

As principais barreiras das categorias classificadas na Tabela 2 que pretendeu-se superar no presente trabalho foram: o custo (P1) e o tamanho limitado da área de conteúdo (P2). A categoria de aplicações em dispositivos *touchscreen* (seção 4.3) é a única com baixo custo, já que a solução é baseada em *software* para a plataforma desses dispositivos, porém apresenta uma barreira forte por ser simulada em tela plana, e não possuir de fato tangibilidade (P5). Quanto

Questão	<i>touchscreen</i>	<i>app</i> para	<i>hardware</i> de baixo custo	vestível	<i>braille blocks</i>
Q1 - Custo	Baixo custo (<i>smartphones</i>)		Custo médio (dependente de implementação de <i>hardware</i>)	Alto custo	Custo médio (dependente de detector e <i>tags NFC</i>)
Q2 - Espaço	Fixo		Fixo	Fixo	Fixo
Q3 - Símbolos	N/A		Sinais compostos e pontuações	N/A	Sinais compostos
Q4 - E/S	Entrada e Saída		Entrada somente	Saída somente	Entrada somente
Q5 - Metáfora	N/A		Pronome-verbo	N/A	Pronome
Q6 - Granularidade	Ponto-a-ponto		Ponto-a-ponto	Ponto-a-ponto	Cela
Q7 - Multimodal	Áudio e <i>vibracall</i>		Processamento de voz e retornos de áudio e tangível	Áudio e <i>vibracall</i>	Áudio
Q8 - Motivação	Jogos		N/A	N/A	N/A
Q9 - Professor	Autodidata		Escolher níveis/desafios	Autodidata	Escolher níveis/desafios

Tabela 2: Consolidação das categorias revisadas de acordo com o método classificatório

ao tamanho da área, todas as tecnologias revisadas apresentam limitações determinadas pelo *hardware* a respeito da quantidade de celas possíveis na área de manipulação do usuário.

Capítulo 5

Arquitetura

O projeto de arquitetura constitui a base de *software* dentro da qual tem-se o ponto de partida para a implementação do protótipo avaliado nesta pesquisa. A arquitetura, conforme exibida na visão geral da Figura 11, consiste na modularização do sistema alinhada ao objetivo central da dissertação. Com a separação de camadas entre núcleo (processamento principal do braille), entradas, saídas e extensões, busca-se propiciar o potencial para novas implementações que alterem a dinâmica em nível de interação.

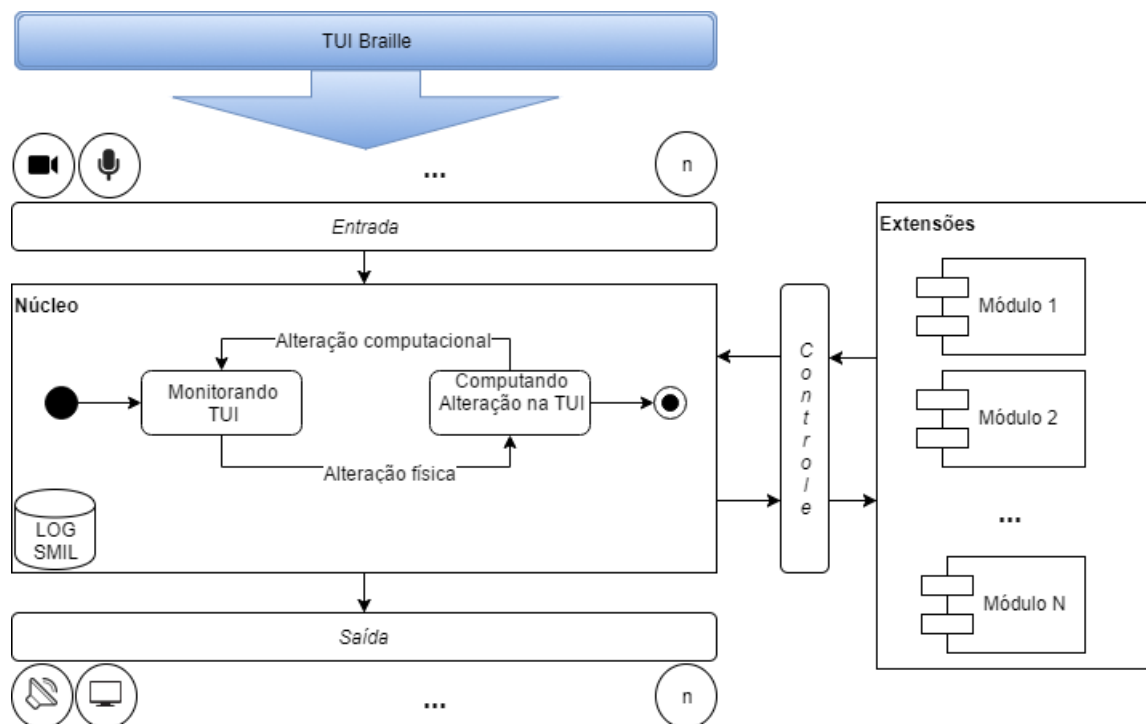


Figura 11: Diagrama da arquitetura em camadas modulares proposta para o projeto

As camadas apresentadas na Figura 11 são descritas individualmente nas seções a seguir. Primeiramente, o conjunto de regras da TUI é especificado na seção 5.1. Depois, a camada de núcleo, com o *log* de eventos e representação de dados do braille na arquitetura, é explicada na seção 5.2. Na sequência, são detalhadas as camadas de entrada (seção 5.3) e saída (seção

5.4), com os detalhes das implementações dos modos de visão computacional e *feedback* TTS, respectivamente. Por fim, a camada de extensões é descrita na seção 5.5, exemplificando-se modelagens que estendem a interação básica da arquitetura.

5.1 Interface Tangível de Usuário (TUI)

A TUI é o artefato que media a interação do usuário em sua experiência de manipulação do braille com a computação da arquitetura computacional. Inicialmente, foi tomado o LEGO como material de inspiração do projeto, mas teve de ser substituído por materiais menos custosos e livres, conforme detalhado na seção “Prototipação” (seção 6.2). No contexto de desenvolvimento dessa pesquisa, dada a incerteza do material que seria empregado, resolveu-se estabelecer os requisitos visuais da TUI, para uma implementação passível de generalização em qualquer material. Todos os requisitos da TUI foram estabelecidos de forma *ad hoc*, para minimizar a complexidade da implementação de entrada por visão computacional, e são elencados a seguir:

1. A TUI deve conter um plano de fundo base em cor preta
2. A TUI deve ter um número de colunas de celas braille $n \geq 1, n \in \mathbb{Z}$
3. A TUI deve ter um número de linhas de celas braille $n \geq 1, n \in \mathbb{Z}$
4. A TUI deve ter uma medida fixa de lado para todo ponto braille
5. A TUI deve ter o espaço de intervalo igual a medida do ponto braille entre todas as celas
6. A TUI deve ter pontos na cor verde para minimizar interferências de ruídos de luminosidade do ambiente
7. A TUI deve permitir celas braille de tamanho flexível, desde que respeitada a relação $largura = 2x$ e $altura = 3x$, onde x representa o tamanho do ponto braille
8. A TUI deve conter a matriz de celas braille dentro de um retângulo maior, com margem interna de medida de 1 ponto braille das celas, em cor clara (preferencialmente próximo ao branco, RGB #FFFFFF)

Além dessas propriedades, a TUI deveria apresentar qualidades de manipulação, uma vez que era destinada a pessoas cegas. Essas propriedades não foram elicitadas na forma de requisitos, pois necessitavam de avaliação com o público-alvo. No entanto, foi importante garantir estabilidade da base (encaixe e fixação), tamanho aceitável das celas e segurança dos usuários, evitando materiais que poderiam causar cortes acidentais ou ser engolidos por crianças.

5.2 Núcleo

A proposta tem como base central a necessidade de processar uma representação tangível do braille, logo tal função foi atribuída à camada de núcleo. O diagrama de estados localizado na Figura 11 representa a dinâmica entre os dois únicos estados que o núcleo compreende: ou está aguardando a manipulação da TUI pelo usuário ou está computando a última ação do usuário. As demais camadas da arquitetura operam de forma a fornecer dados para o núcleo (entrada) ou manipular o resultado da entrada processada e transformada em texto (saída e extensões).

Em termos de estrutura de dados, o núcleo opera com a tradução dos pontos da cela braille física para uma representação numérica em base decimal. Como exemplo, toma-se a letra "u", que contém o subconjunto de pontos $\{1, 3, 6\}$, portanto obtém-se a soma das potências na base 2 com o expoente dos valores respectivos dos pontos. O resultado dessa somatória é mapeado como a chave de consulta à representação do caractere correspondente, dentro de uma estrutura de dicionário. O mapeamento de todo o alfabeto é apresentado no Apêndice B.

$$u = \begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{matrix} = \{1, 3, 6\} = 2^1 + 2^3 + 2^6 = 74$$

Neste trabalho há grande foco para a implementação de uma instância baseada em visão computacional, pois dessa forma o baixo custo buscado no objetivo é maximizado. No entanto, cabe destacar a separação das camadas de entrada e núcleo aqui proposta, uma vez que o núcleo trabalha com representações numéricas do braille. Dessa forma, futuras implementações poderão usar outras formas de entrada, inclusive baseadas em interação multimodal.

5.2.1 Log de Eventos

Como todo evento de manipulação passa na camada de núcleo, torna-se conveniente o componente de um gerenciador de *logs* embutido na mesma. O *log* registra eventos associados ao tempo de execução com o estado do sistema, incluindo eventuais erros computacionais. Tal registro permite análises para a avaliação de interação, bem como para avaliar fatores computacionais do sistema.

5.3 Entrada

A camada de entrada tem como objetivo fornecer a estrutura de dados braille fundamental ao processamento do núcleo, além de entradas adicionais computáveis por extensões. Essa camada é modular, porém deve haver pelo menos um módulo para fornecer a entrada proveniente da TUI. No contexto desta pesquisa, a entrada foi realizada por visão computacional como previamente justificado no argumento do baixo custo.

5.3.1 Entrada por Visão Computacional

De forma a processar o conteúdo braille da TUI, alinhado ao objetivo de baixo custo da pesquisa, a elaboração de um módulo de entrada por visão computacional tornou-se necessário. O uso de outras implementações foi avaliado, porém *tags* NFC e marcadores fiduciais apresentaram-se como soluções mais custosas e limitadas ao tamanho dos mesmos (ex.: uma cela braille precisaria ter o tamanho estabelecido a partir do tamanho da *tag* NFC). A solução por visão computacional demandou apenas o desenvolvimento de um algoritmo que computasse as regras enunciadas na seção 5.1. O conjunto de passos básicos do programa principal, descritos em pseudolinguagem, a partir da captação da imagem encontra-se no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 Pseudo-Código ParseBraille

```

bp ← nova instância de BrailleParser()
detectouAmbiente ← Falso
Enquanto não detectouAmbiente faça:
    ambiente ← bp.capturarFrame()
    Se bp.ambienteValido(ambiente) :
        detectouAmbiente ← Verdadeiro
    Fim se
Fim enquanto
bp.configurarAmbiente(frame)
Loop infinito:
    ambiente ← bp.capturarFrame()
    Se bp.ambienteValido(ambiente) :
        bp.analisar(ambiente)
    Fim se
    Se requisição do usuário :
        frase ← bp.toString()
        fm ← nova instância de FeedbackManager(frase)
        fm.tratarFeedback()
    Fim se
Fim loop

```

O Algoritmo 1 basicamente mostra a divisão em duas etapas para o funcionamento do sistema: (1) a predefinição do ambiente e (2) a captação de frames após iniciado o algoritmo. Na predefinição, o algoritmo fica em um laço de espera até que a câmera capte um ambiente válido (segundo as regras visuais), sendo um passo necessário para estabilizar os ruídos que possam estar presentes no ambiente de execução antes de iniciar a computação do conteúdo de fato. Após isso, o sistema fica em um laço infinito (até que haja notificação de parada de aplicação) verificando se a imagem do *frame* da câmera trata-se de um ambiente válido, analisando-a e extraindo o conteúdo braille de entrada, que, por sua vez, é transformado em uma string e passado como parâmetro para o tratamento de *feedback* do sistema.

A forma como o algoritmo abstraído no método “analisar()” processa a imagem é apresentada na Figura 12. Os passos apresentados na figura são: (a) com a imagem de entrada

já binarizada e na posição correta, é detectado o retângulo maior referente ao contorno MDF, validando o ambiente; (b) na subimagem do contorno maior, são detectados os contornos dos retângulos referentes a celas ou espaços para celas; (c) por fim, são detectados os círculos referentes aos pontos dentro de cada subimagem de cela, momento no qual é decidido, pela posição do círculo, o código numérico da cela a ser passado à cama de núcleo (seção 5.2). Quando (d) o contorno externo não é validado por presença de algo obstruindo a captação, o algoritmo aguarda o retorno do ambiente válido.

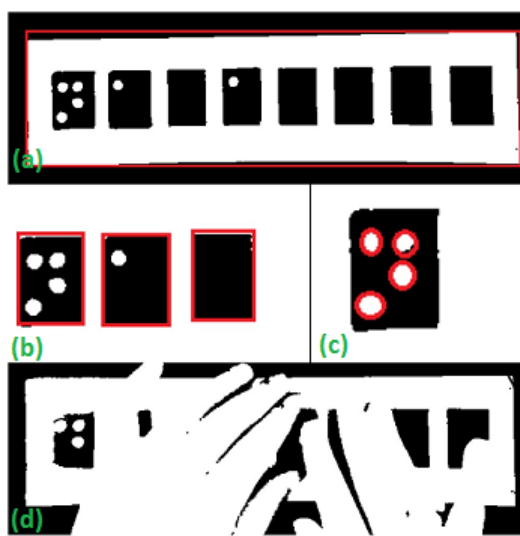


Figura 12: Funcionamento do processamento de imagens da TUI

Para a elaboração do algoritmo, a linguagem de programação Python e a biblioteca de visão computacional OpenCV, ambas livres, mostraram-se eficazes para o fim de implementação. Além disso, a característica multiplataforma de Python facilitou a mudança de computador, independente de sistema operacional, para execução. No entanto, as limitações emergiram da qualidade da webcam, limitando a distância de alcance da entrada, e dos ruídos do ambiente, podendo provocar interpretações erradas do conteúdo.

Para controlar a aplicação com a entrada de visão computacional, a captação da *webcam* foi limitada com um suporte de 34cm de altura. O algoritmo inicial apresentou ruídos nos casos de 1000 iterações em posições diferentes da TUI para cada letra. Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos testes, sendo enfatizados os casos com taxa de acerto inferior a 95%.

Tabela 3: Taxa de acerto de casos de teste para 1000 iterações do algoritmo com cada letra em 3 posição na linha de entrada prototipada

Letra	Na 1ª casa	Na 4ª casa	Na 8ª casa
a	996	998	999
b	998	996	998
c	993	994	1000
d	995	996	1000
e	996	998	904

Letra	Na 1ª casa	Na 4ª casa	Na 8ª casa
f	996	998	996
g	997	996	996
h	996	994	999
i	889	996	996
j	997	997	998
k	997	995	996
l	996	998	978
m	998	996	938
n	993	997	991
o	995	997	997
p	996	996	996
q	995	996	997
r	945	962	984
s	862	995	627
t	995	996	790
u	997	996	997
v	995	997	990
w	749	996	997
x	995	996	990
y	995	998	997
z	997	996	993

No entanto, como observado na Tabela 3, o algoritmo, mesmo nos piores casos, acertou mais de 50% das vezes. Com isso, um controle estatístico foi acrescentado para realizar a decisão da letra computada a partir de um sistema de votação. A letra com maior incidência na computação de *frames* de imagens, seria a decidida como resultado. Com tal atualização, a confiabilidade do algoritmo foi maximizada para próximo do ponto ótimo nos testes controlando os ruídos do ambiente.

5.4 Saída

A camada de saída, assim como a de entrada, é modular de modo a permitir implementações de extensões que façam uso de diversas formas de saída, num paradigma de interação multimodal. No entanto, o módulo de saída padrão foi definido como o áudio com síntese de voz, devido a seu baixo custo e presença massiva nos computadores e dispositivos móveis. Além disso, a pesquisa assume como pressuposto a complementaridade do braille com tecnologias de leitores de tela, reforçando o potencial do uso das últimas com a preservação do sistema braille.

Para a implementação da síntese de voz foi empregada a biblioteca Google Text to Speech (gTTS). Embora proprietária, o uso da mesma para a prototipação e prova de conceito se mostrou eficaz. Oportunamente, uma alternativa de biblioteca livre terá de ser encontrada para manter o sistema inteiro apenas com componentes de *software* livre.

5.5 Extensões

A camada de extensões tem como objetivo permitir o desenvolvimento de módulos que tratem a interação do usuário reconhecida na entrada de forma a propiciar a saída desejada para estabelecer um cenário de atividade pré-determinado. Com isso, pretende-se permitir o desenvolvimento simples de *plugins* que tragam significado na narrativa de interação do usuário com o sistema. Tais extensões permitem trabalhar abordagens motivacionais de ensino (ex.: jogos) como elencado nos objetivos do trabalho.

Pode-se assumir como a interação padrão do sistema a manipulação da TUI que retorna o *feedback* de áudio com a leitura do braille inserido. Tal cenário mínimo pode ser representado pelo diagrama MoLIC [Da Silva e Barbosa, 2007] da Figura 13, o qual é análogo ao diagrama de estados do núcleo da Figura 11. Nele o usuário inicia o contato com o sistema manipulando os signos presentes na área tangível (letras, espaços etc.) e, ao solicitar retorno, um processo computacional retorna o áudio da leitura ou, em caso de problema pra captar a entrada (ex.: mão obstruindo a câmera), o sistema retorna uma mensagem informando o problema.

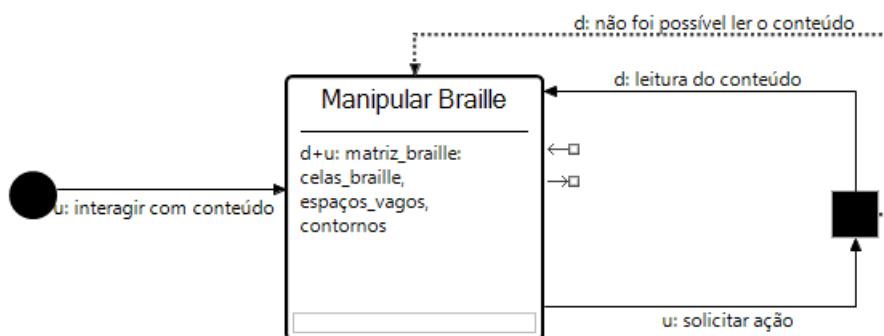


Figura 13: Diagrama de interação padrão do sistema

Uma extensão consiste no tratamento do *feedback* repassado a outro processo computacional, mantendo-se a interação do usuário exatamente igual à interação padrão conforme Figura 14. No exemplo da figura, tem-se uma extensão de jogo de adivinhação, que possui uma palavra a ser descoberta pelo usuário. Caso o usuário acerte, recebe os parabéns, caso o usuário erre ou não insira nada na entrada, recebe uma dica nova por áudio. Porém, se o mesmo não acertar a palavra após a última dica, o fim do jogo é anunciado informando qual era a palavra oculta.

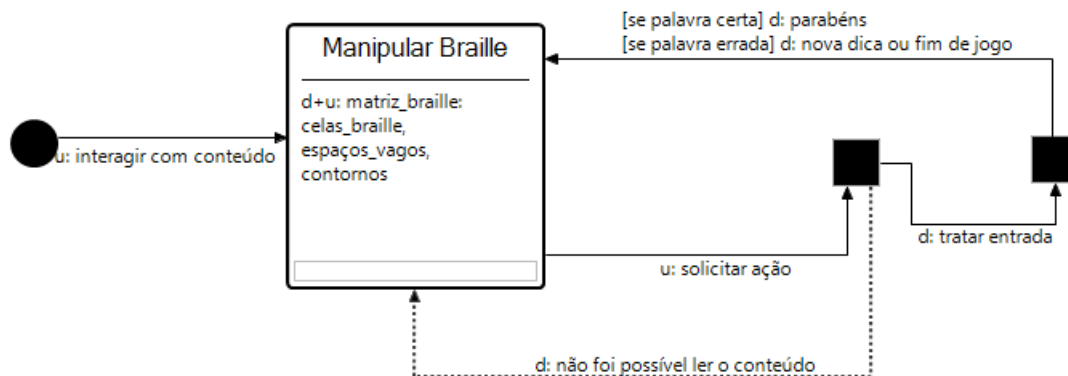


Figura 14: Diagrama de interação de extensão de jogo de adivinhação de palavra

5.6 Considerações do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a proposta de arquitetura para o ambiente de letramento braille, contribuição base dessa dissertação. As camadas de núcleo e as demais modulares foram definidas. Na camada de entrada, o módulo de visão computacional usado no protótipo avaliado neste trabalho foi descrito. Já na camada de extensões, foi mostrado o modelo de definição de um módulo que será usado para derivar-se as aplicações executadas nesta arquitetura.

Dada a natureza de primeira iteração no desenvolvimento dessa proposta, não foi ainda especificado um componente de interface de autoria. Tal componente visaria reconhecer o papel do professor em criar e adaptar os objetos de aprendizagem sobre a área braille. Para tanto, um processo de coleta de requisitos específico para o componente será necessário.

As extensões propostas para a camada descrita na seção 5.5 já preveem o uso de dados provenientes de atividades associadas ao papel do professor. No entanto, uma interface unificada para configurar os parâmetros de *feedback* das extensões torna-se necessária em uma futura versão distribuída. O foco da avaliação dessa pesquisa é centrado no perfil de usuário do educando, porém reconhece-se a demanda de expansão dos resultados desta para a apropriação do binômio educando-educador.

Capítulo 6

Método

Neste capítulo é apresentado o método utilizado para alcançar os resultados da presente dissertação, o qual foi subdividido em 3 seções principais. Na primeira, seção 6.1, é descrita a forma de captação de participantes que participaram na pesquisa. Na sequência, é apresentada a trajetória de elaboração do protótipo funcional na seção 6.2. Por fim, na seção 6.3.3 é explicado o protocolo de avaliação do protótipo com os participantes da pesquisa.

6.1 Seleção de Participantes

Em um primeiro momento, tentou-se contato com 4 centros de atendimento educacional especializados (CAEE) para pessoas com deficiência visual, todos localizados na cidade de Curitiba. Duas dessas instituições, representadas por suas respectivas coordenadoras pedagógicas, dispuseram-se a reunir-se com o autor desta pesquisa. Nas reuniões, mapeou-se o perfil dos alunos atendidos nos centros, o que possibilitou planejar a captação de voluntários de forma situada nas restrições do contexto.

Baseando-se na informação de que os CAEEs visitados trabalham com uma diversidade de perfis de alunos, variando de crianças a idosos, optou-se pela redução a dois critérios de inclusão e participantes na pesquisa: (1) a cegueira como condição *sine qua non* deste trabalho, não selecionando alunos de baixa visão; (2) o domínio básico do sistema braille, definido aqui como a alfabetização básica na forma de conhecer as combinações de letras na cela braille. Essas duas condições justificam-se como suficientes para conseguir participar dos experimentos propostos neste método.

O perfil desejado foi informado às coordenadoras, de forma que elas pudessem indicar e convidar alunos para a participação voluntária. Com isso, almejou-se a seleção de um número par de 4 pessoas, a fim de haver dois grupos de duas pessoas para cada sequência do protocolo (seção 6.3.3). Ao fim, foi selecionada apenas uma aluna no CAEE A e a pedagoga do CAEE B, além de duas pessoas cegas externas. A dificuldade de agendar com alunos surgiu devido à necessidade de uma série de fatores: autorização da pedagoga, consentimento do responsável

(para menores de idade) e tempo do aluno e da pedagoga disponível em paralelo. Mais detalhes dos participantes são descritos nos resultados do Capítulo 7.

6.2 Prototipação

Alinhado ao objetivo do trabalho, foi necessária a elaboração de um protótipo como objeto a ser avaliado pelos participantes cegos. O protótipo deveria representar a interface de usuário tangível, propiciando a manipulação do braille. Em vista de uma avaliação com um objeto de maior fidelidade, também decidiu-se tornar o protótipo funcional por meio de visão computacional. Os detalhes de especificação da arquitetura foram apresentados no Capítulo 5, enquanto aqui descreve-se o processo de elaboração dos artefatos do método que foram usados para avaliação com os participantes.

6.2.1 Interface Tangível Braille

O projeto da TUI foi inicialmente idelizado em LEGO, uma vez que tal material apresenta qualidade de precisão tanto de medidas, para o processamento computacional, como de encaixe, para a manipulação humana. A ideia do uso de LEGO surgiu na fonte de partida desse trabalho [García et al., 2016]. Os primeiros protótipos foram imagens virtuais produzidas a partir do *software* LEGO Designer, como exemplificado na Figura 15. Com essas imagens, pôde-se realizar os primeiros experimentos em computador de processamento do braille de imagens estáticas do projeto LEGO.

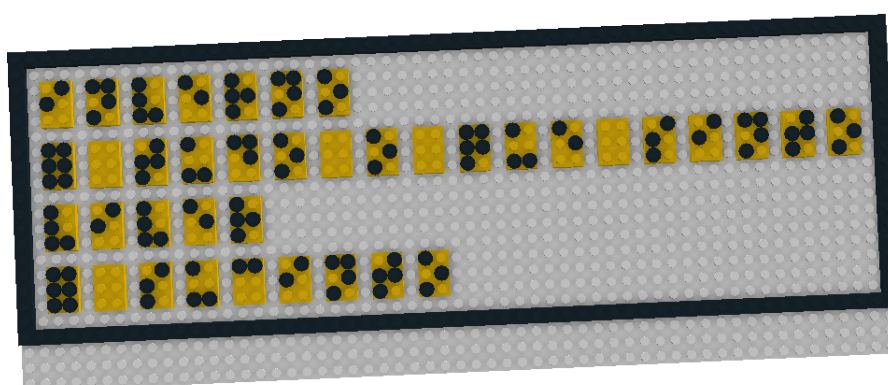


Figura 15: Exemplo de TUI virtualmente prototipada em LEGO

A partir das medidas da LEGO, foram extraídas regras de medidas proporcionais, porém flexíveis. Um bloco LEGO 1x1 apresenta as dimensões de 8mm², portanto uma cela braille 3x2 teria o tamanho 1,6cm x 2,4cm no mesmo material. Com isso, se em um outro material a medida

de base de um ponto da cela tiver 1cm^2 , logo a cela terá $2\text{cm} \times 3\text{cm}$ e deverá ser aceita pelo mesmo algoritmo do protótipo. O conjunto de regras gerais na especificação final permaneceu inspirado no LEGO conforme descrito na seção 5.1.

No decorrer desta pesquisa, surgiu a iniciativa Braille Bricks da Fundação Dorina Nowill para Cegos [Fundação, 2016], a qual consistia de uma campanha publicitária para incentivar a LEGO a produzir celas braille representadas nos tijolos de brinquedo da mesma. Com isso, tentou-se obter uma cópia dos materiais utilizados pela Fundação na campanha para o fim de usar como TUI avaliada neste método de pesquisa. No entanto, a obtenção do material não foi possível e teve-se de migrar para materiais mais acessíveis, conforme a propriedade de generalização dos materiais de acordo com regras visuais no algoritmo, partindo-se para o uso de uma TUI de confecção artesanal.

Inspirado no fato de muitos brinquedos utilizados no ensino de braille serem elaborados em EVA, tal material foi usado na primeira versão material da TUI. Em um primeiro momento, fez-se uma versão apenas com folhas de EVA de 1mm de espessura, recortando as celas como retângulos de $2\text{cm} \times 3\text{cm}$, sem atenção a qualidade de manipulação do material, para validação da possibilidade de processamento de imagem das mesmas. Após isso, passou-se a utilizar EVA de maior espessura, com 6mm, para tornar as celas melhor manipuláveis, e os pontos das celas passaram a ser cortados com perfurador de papel, além de o encaixe das celas ser feito com base em velcro sobre uma base de madeira conforme Figura 16.

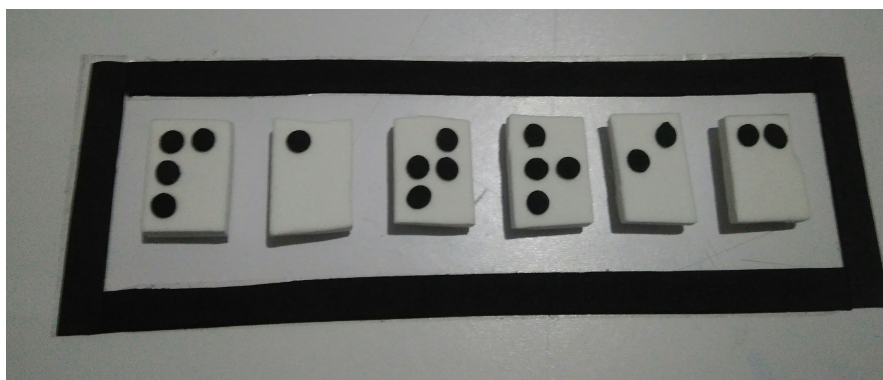


Figura 16: Primeira versão do protótipo em EVA

A versão da TUI da Figura 16 foi levada nas reuniões para a seleção de participantes relatadas na seção 6.1. A coordenadora do primeiro CAEE visitado é uma pessoa cega, que observou que o tamanho das peças era adequado e de fácil identificação, escrevendo uma palavra de exemplo sem dificuldade. Entretanto, o autor observou que o uso de encaixes baseados em velcro ou ímã poderiam causar o posicionamento de celas em ângulos arbitrários pelo participante, exigindo-se uma espécie de tabuleiro com encaixes bem delimitados, podendo propiciar um material com a qualidade de posicionamento de celas similar ao que poderia ser feito no LEGO.

Diante da necessidade de uma base de encaixe de celas com determinada precisão, recorreu-se a possibilidade de corte a *laser* do material da TUI. Uma base de madeira MDF de 3mm de espessura foi cortada em máquina disponibilizada pela maquetaria do Curso de

Arquitetura e Urbanismo da UFPR. Com isso, foram desenhadas em software CAD bases de uma linha por 8 colunas de celas, e de 5 linhas por 11 colunas, as quais respeitavam as medidas de precisão dos requisitos estabelecidos para a TUI.

A madeira excedente dos espaços cortados com 2cm x 3cm para cada cela foi empregada como base para as próprias, uma vez que tais objetos encaixariam de onde foram originalmente recortados. Assim, o EVA de 6mm na cor preta foi usado para ser colado sobre as celas, invertendo-se o esquema de cores especificado originalmente. Os requisitos da TUI foram especificados e apresentados na seção 5.1. A Figura 17 mostra a versão final da TUI para o protótipo avaliado na pesquisa.

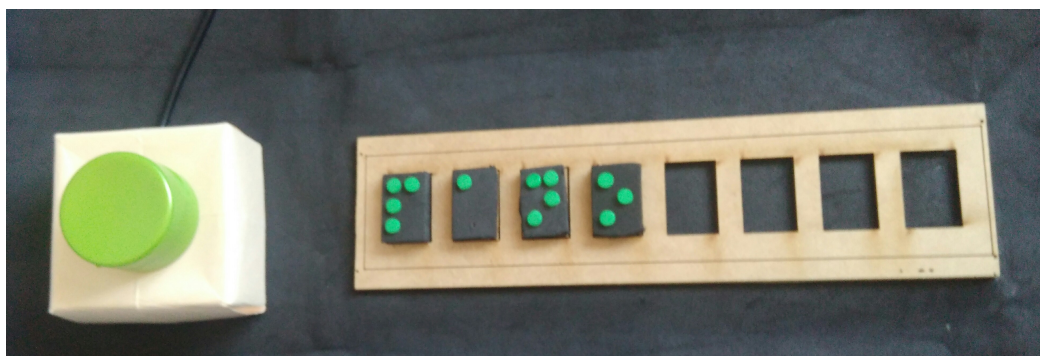


Figura 17: Versão final da TUI para o protótipo funcional

6.2.2 Algoritmo de Visão Computacional

O uso de um programa de visão computacional (VC) como instrumento para tornar funcional a interface tangível foi inspirado na revisão de algoritmos de [Isayed e Tahboub, 2015]. Com a disponibilidade da biblioteca livre OpenCV, pôde-se trabalhar em uma tecnologia de baixo custo para um algoritmo com capacidades de generalizar o material da TUI de acordo com um conjunto de regras visuais base. Cabe ressaltar que este trabalho apenas apropriou-se de técnicas de VC como meio para avaliação, não como fim de contribuir nesse campo específico do conhecimento.

Na primeira versão da TUI em LEGO, elaborada virtualmente, as medidas eram claramente precisas devido à natureza do material. Com isso, o algoritmo foi estabelecido de forma a computar a área braille a partir dos intervalos de espaços previstos. O algoritmo apresentou sucesso, detectando a área, porém as mudanças posteriores na TUI determinaram a necessidade de adaptações.

Com a primeira versão da TUI feita em EVA, o encaixe de peças deixou de ser uma propriedade precisa em medidas. Diante dessa adversidade, o algoritmo foi adaptado de forma a detectar as formas retangulares das celas braille independente de posição, discriminando o fundo de sua cor. Nesse contexto, o algoritmo passou a fazer interpretações com regras mais “relaxadas”, propiciando a continuidade de adaptações na TUI sem perder a eficácia.

Uma vez com a versão de base em MDF da TUI confeccionada, o algoritmo passou a ser resolvido pela detecção da forma do MDF sobre um fundo preto. Dentro dessa forma, encontrando os retângulos pretos (celas). Por fim, dentro desses retângulos menores, encontrando os pontos verdes (cor que absorveu menos luz nos testes). A especificação final do algoritmo foi descrita na seção 5.3.1.

6.3 Experimentos

O objeto de avaliação da presente dissertação é um sistema baseado em uma TUI. Na revisão da área de TUIs de Shaer e Hornecker, é descrito que nesta linha de pesquisa não há métodos de avaliação próprios estabelecidos, o que resulta na apropriação de métodos da IHC em geral [Shaer e Hornecker, 2009]. No entanto, um tipo de método comumente empregado é o estudo comparativo entre paradigmas diferentes, uma TUI e uma GUI para a mesma solução, ou de diferentes designs de TUIs, normalmente investigando-se variáveis específicas (taxas de erro etc.).

A abordagem comparativa entre TUIs e GUIs foi revisada em um outro trabalho [Zuckerman e Gal-Oz, 2013]. Os autores identificaram os objetos comparados, design do método e variáveis dependentes analisadas de 11 pesquisas. É possível, por meio dessa revisão, notar que as variáveis investigadas em cada instância de pesquisa são sensíveis ao domínio de estudo e os objetivos das mesmas.

O protótipo deste trabalho não pode ser comparado com uma GUI, já que o domínio do braille para o público-alvo cego está necessariamente amarrado ao paradigma tangível. Já a comparação da TUI aqui elaborada com as tecnologias revisadas na revisão bibliográfica (Capítulo 4) seria relevante, porém há dificuldades de acesso às mesmas para o planejamento de uma avaliação comparativa. Portanto, nesta pesquisa analisou-se um conjunto de variáveis (seção 6.3.1) exclusivamente para o protótipo elaborado, posteriormente buscando-se uma comparação qualitativa com o estado da arte por meio do método classificatório da revisão de trabalho correlatos (Tabela 2).

6.3.1 Variáveis para coleta e análise

Em ordem para decompor a complexidade da síntese representada pelo sistema, o conjunto de variáveis passíveis para coleta e análise dos resultados foram identificadas e elencadas na Tabela 4. Basicamente, as variáveis podem ser referentes a fatores tangíveis (TUI), auditivos (*feedback*), computacionais (visão computacional) ou referente ao usuário.

Cada cenário de interação proposto no método visou identificar e analisar um subconjunto das variáveis da Tabela 4. Variáveis da categoria de entrada foram controladas na etapa de prototipação. Já algumas variáveis, principalmente as da categoria usuário, precisou do uso de perguntas diretas aos participantes para complementar o registro da observação dos experimentos.

Tabela 4: Variáveis observadas no método de pesquisa

Categoria	Variáveis
TUI (percepções)	Localização das celas Identificação das celas Identificação dos espaços para celas Leitura do conteúdo corrente Identificação de botão
TUI (ações)	Encaixe de cela Desencaixe de cela Modo de chamada de <i>feedback</i> ¹
Feedback	Volume de áudio Clareza da leitura da voz Suporte a recuperação de erros Tempo entre ação e <i>feedback</i> Proximidade do áudio com a TUI
Entrada (visão computacional)	Acurácia do algoritmo Ruídos do ambiente Qualidade da câmera Ângulo da câmera
Usuário	Intenção Motivação Aprendizagem da TUI Fatores cognitivos Fatores motores

Cada conjunto (categoria) de variáveis buscou abordar elementos diferentes do protótipo, exceto pela categoria de variáveis de usuário. As duas categorias de TUI, ações e percepções, buscaram isolar o conjunto de ações que compõem a interação completa na interface proposta. A categoria de entrada buscou os fatores que afetam a mediação, por VC, entre TUI e *feedback*, que por sua vez constituiu uma categoria própria pra avaliar as ações da voz sintética como partes da interação.

Por fim, a categoria de variáveis de usuário contém as principais unidades dependentes de análise do fenômeno da interação: a aprendizagem da TUI e a motivação no uso. Também engloba a intenção do usuário, variável manipulada em cada cenário do protocolo (seção 6.3.3) pelo autor desta pesquisa. Além disso, inclui fatores cognitivos e motores como variáveis antecedentes, assumidas como pressupostos na seleção de participantes. O conjunto analisado não envolve medidas de eficiência, mas sim de aprendizagem da interface e satisfação, situando o método em parte das metas de usabilidade e experiência de usuário da IHC [Preece et al., 2013].

6.3.2 Ambiente

Para a realização dos experimentos, o ambiente foi organizado de forma que a base da TUI estivesse sobre uma mesa, ao alcance das mãos do participante sentado de frente para

a mesma. Por sua vez, 3 celas braille para as vogais e 2 celas braille para as consoantes (apenas 1 para as menos recorrentes na Língua Portuguesa), representando as 26 letras do alfabeto romano, foram disponibilizadas em grade ao lado direito, dispostas em ordem alfabética. Já a câmera do computador foi colocada imediatamente por cima da TUI, sobre um suporte localizado no *notebook* utilizado pelo avaliador. Também foi colocado um botão de ação ao lado esquerdo da área de conteúdo. A representação gráfica do ambiente encontra-se na Figura 18, observando-se acima os elementos dispostos da interface tangível e abaixo a posição do avaliador e do participante no ambiente.

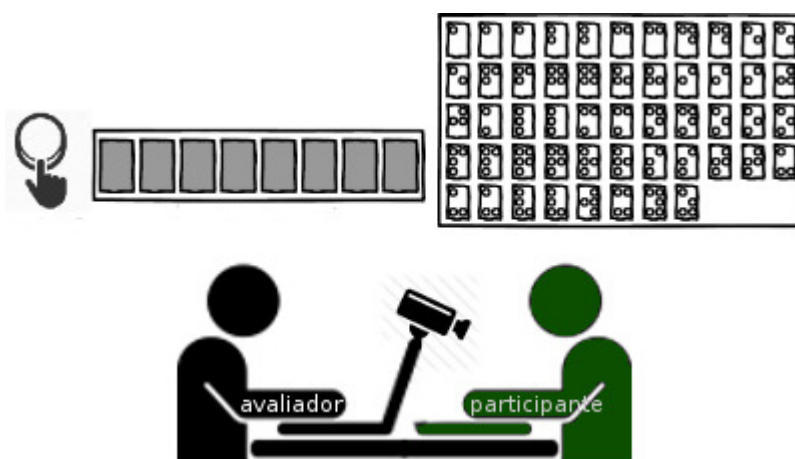


Figura 18: Representação gráfica do ambiente para a avaliação

De acordo com a versão final do algoritmo do protótipo (seção 5.3.1), o ambiente precisou ser validado antes de iniciar o processamento das entradas. Assim, após o estabelecimento físico do ambiente, o algoritmo era instanciado para controlar qualquer possível ruído na captação da câmera. Uma vez validado, o protocolo de avaliação era iniciado.

6.3.3 Protocolo por Cenário de Experimento

Cada participante foi recepcionado e, na sequência, foi apresentado o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) ao mesmo (Apêndice A), explicando os fins da pesquisa e garantindo a confidencialidade dos dados e a preservação do anonimato do participante. Como trata-se de pessoas cegas, o TCLE foi disponibilizado tanto em formato digital, para ser lido por leitor de tela, como em braille, podendo cada participante optar qual versão leria. Em caso de concordância, o participante assinou o documento para voluntariar-se na participação desta pesquisa.

Quatro cenários de tarefas curtos foram aplicados, de forma a não tomar muito tempo dos participantes da pesquisa, conforme visão geral da Figura 19. Metade da amostra foi atribuída, de forma randomizada, a um grupo que seria, antes dos quatro cenários, expostos a um cenário de livre interação com o ambiente, sem instrução prévia, a fim de observar se isso influenciaria na aprendizagem da interface/interação mais adiante. Todas as sessões foram realizadas nos

horários individuais disponíveis de cada pessoa, com a presença do autor no papel de observador, anotando as ocorrências dos experimentos de cada participante.

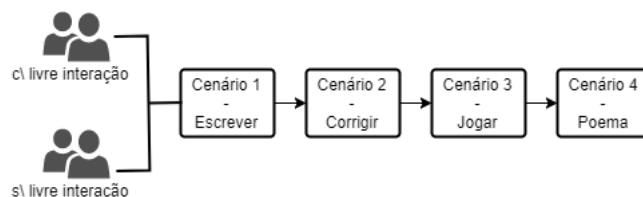


Figura 19: Visão geral do protocolo de avaliação do protótipo

Além da observação de cada participante na execução do protocolo de pesquisa pelo autor, outras duas formas de coleta de dados foram empregadas de maneira complementar: *logs* e entrevistas semi-estruturadas. Os logs gerados pelo sistema, conforme definido na seção 5.2.1 da arquitetura do sistema, apresentam a sequência exata de mudanças de estados no sistema, propiciando a busca de detalhes de interação. Já as entrevistas semi-estruturadas foram baseadas nos tópicos elencados pelas variáveis de análise, quando necessário discuti-las com o participante ao fim da execução do cenário.

Nas próximas subseções são apresentadas as descrições de cada cenário de experimento acompanhadas pela visão da interação esperada em forma de *storyboard*. As notações criadas a fim de representar os elementos da TUI nos storyboards são apresentadas na Figura 20. Com tal recurso, mostra-se a visão geral com cada passo de interação esperado.

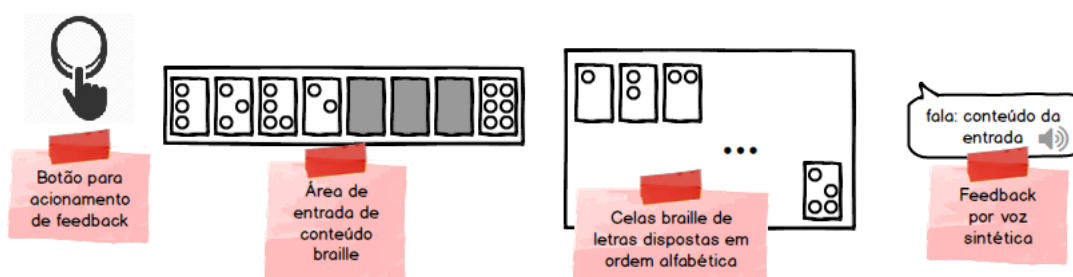


Figura 20: Notações utilizadas nos *storyboards* da pesquisa

Cenário 1 – Escreva seu Nome

Como primeiro cenário, solicitou-se a escrita do nome de cada participante na TUI conforme *storyboard* da Figura 21. Dessa forma, o participante deveria encontrar as células braille correspondentes, no contexto da distribuição do ambiente, e escrever seu nome, solicitando o *feedback* de áudio sob demanda. Tal cenário busca avaliar os detalhes de interação no envolvimento com uma tarefa de escrita ativa dentro da proposta da interface.

Uma variável avaliada nesta etapa foi o modo de chamada para o *feedback*. Após a primeira instância sob demanda, foi alterada a forma de *feedback* do sistema para áudio em tempo real (a cada modificação de conteúdo) e repetida a mesma tarefa do participante (*storyboard* da

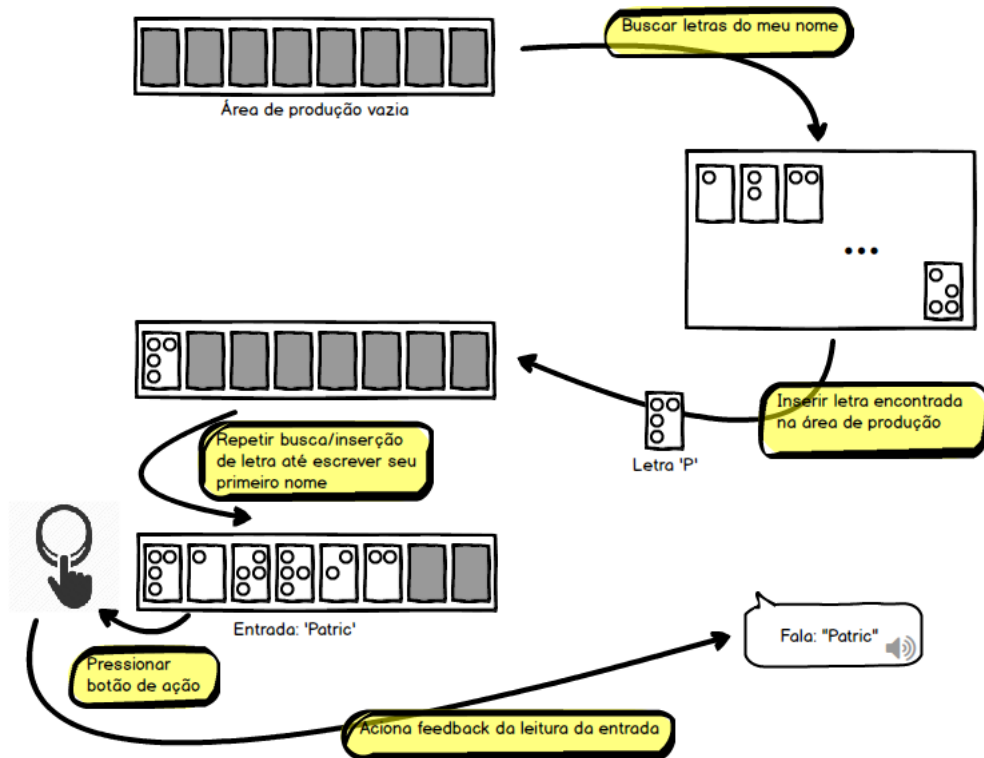


Figura 21: *Storyboard* do cenário 1

Figura 22). Outra simulação realizada foi pelo comando de voz “Leia” (*storyboard* da Figura 23). Ao fim, perguntou-se diretamente qual das versões foi preferível e suas justificativas.

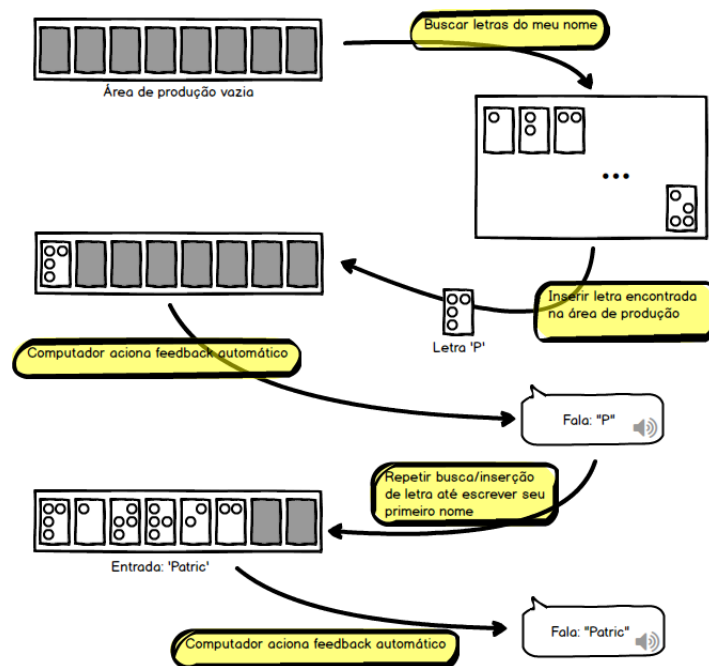


Figura 22: *Storyboard* do cenário 1 com feedback automático

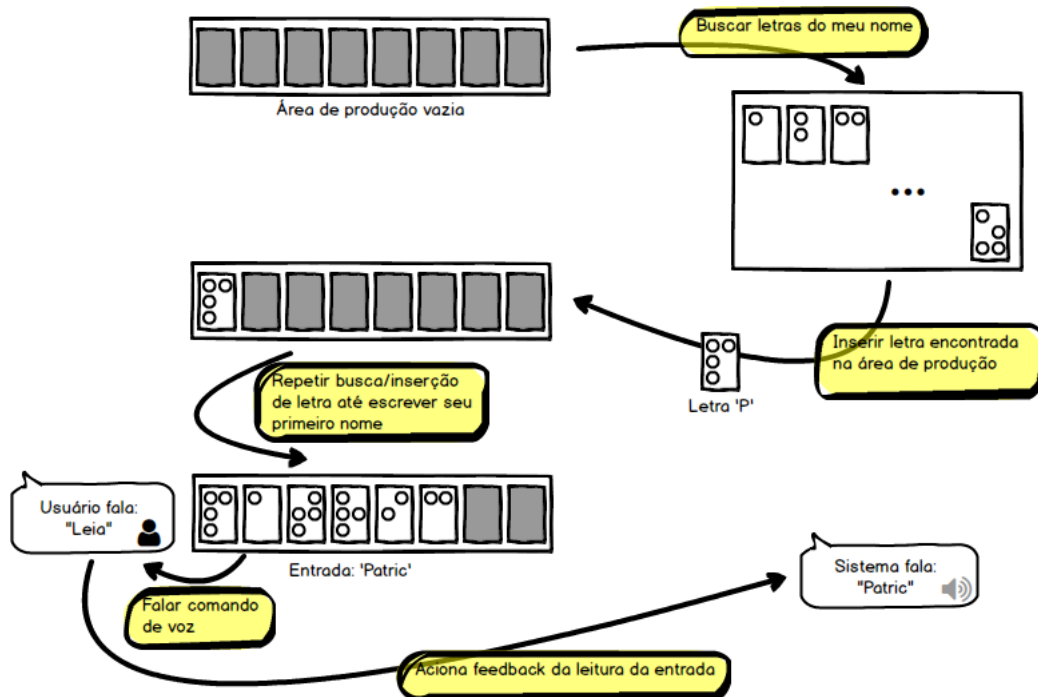


Figura 23: *Storyboard* do cenário 1 com feedback por comando de voz

Cenário 2 – Corrija a Palavra

O segundo cenário apresentou uma palavra simples (“bola”) sobre a TUI, escrita com erro de grafia (“borla”). Solicitou-se a correção da palavra pelo participante, com a confirmação do computador de seu acerto após a solicitação do *feedback*, conforme o *storyboard* da Figura 24. Neste cenário, foi avaliada a variável de suporte a recuperação de erros que o *feedback* fornece na interação com a ferramenta.

Cenário 3 – Adivinhe a Palavra

O terceiro cenário consistiu da TUI vazia, solicitando-se ao usuário que adivinhasse a palavra descrita por dicas em áudio. Num primeiro momento, as dicas foram apresentadas solicitando a escrita da resposta ao desafio. Caso o usuário acertasse ou errasse, o sistema informaria o resultado e a palavra almejada. Independente de resultado negativo ou positivo, o sistema progredia para o nível seguinte da lista. A interação desse cenário é apresentada no *storyboard* da Figura 25.

O uso do cenário permitiu explorar, por meio de um exemplo no tema “animais”, a possibilidade de abordagens motivadoras de jogos educativos sobre a arquitetura proposta. Todos os participantes foram convidados a falar o que acharam da experiência do jogo. Nesse cenário, buscou-se avaliar se a mudança de intenção de “concluir uma tarefa” para “jogar” tinha efeito sobre a motivação do participante.

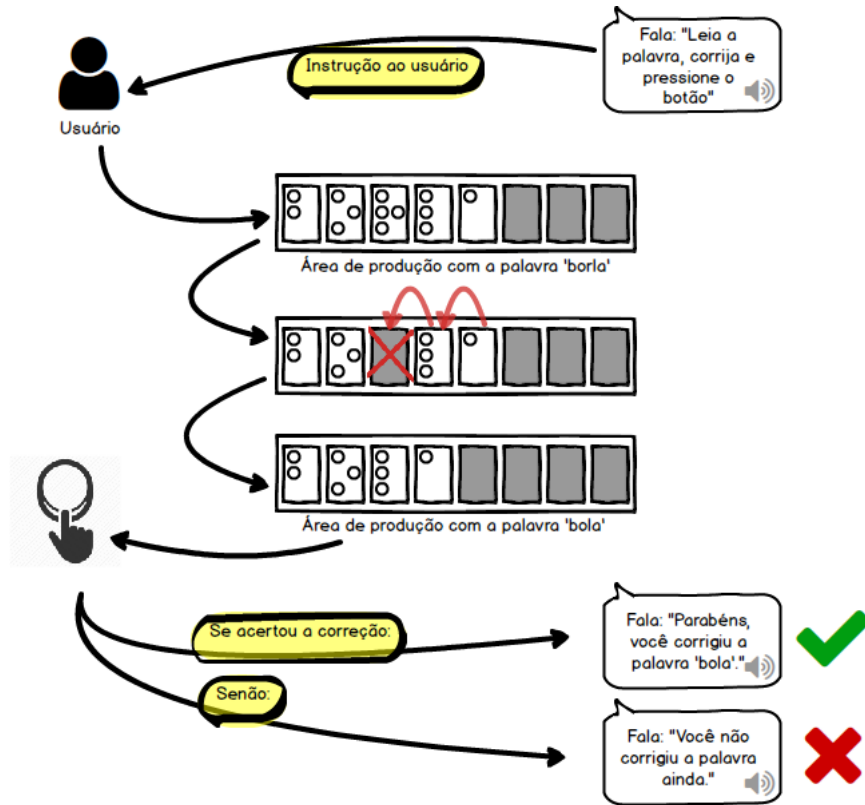


Figura 24: Storyboard do cenário 2

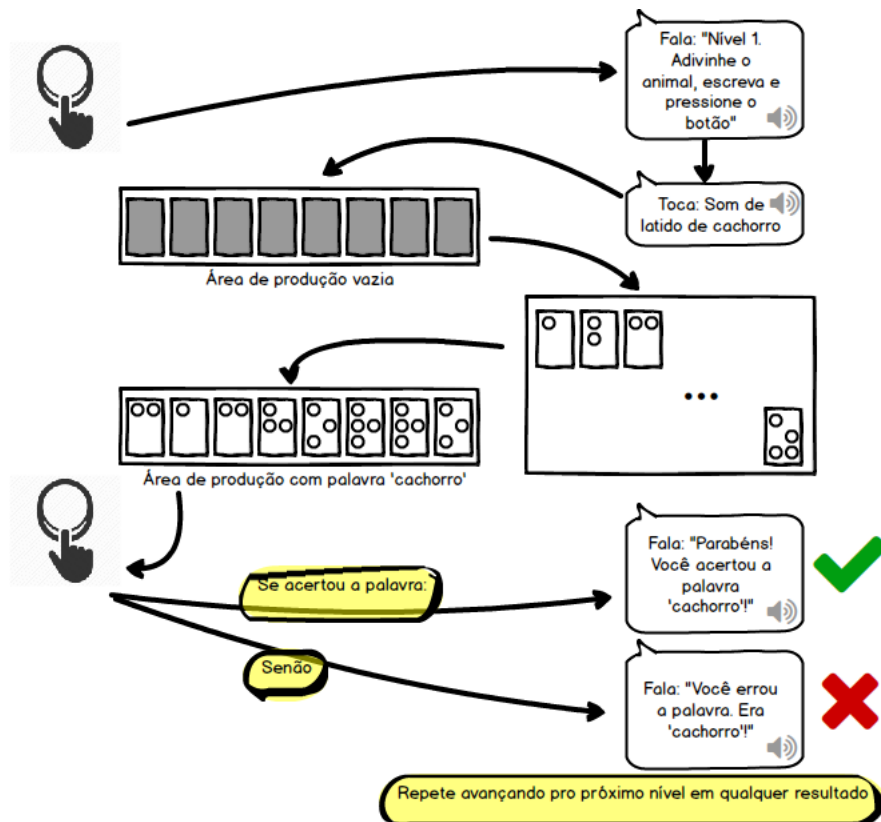


Figura 25: Storyboard do cenário 3

Cenário 4 – Leia e Interaja com o Poema

O último cenário apresentou um poema curto (*haikai*) de autoria de Paulo Leminski previamente escrito sobre a TUI, como exibido na Figura 26, de forma a avaliar as possibilidades e limitações do uso da mesma para gêneros textuais significativos. Foi solicitado que o participante livremente lesse e alterasse algo na TUI, conforme seu livre fluxo. Esse cenário foi apenas simulado sem *feedback* computacional, pois o protótipo funcional limitou-se à entrada de uma linha. Com isso, buscou-se extrair avaliar a persistência das variáveis de leitura na TUI em uma área maior, bem como a motivação para manipular esse tipo de conteúdo.

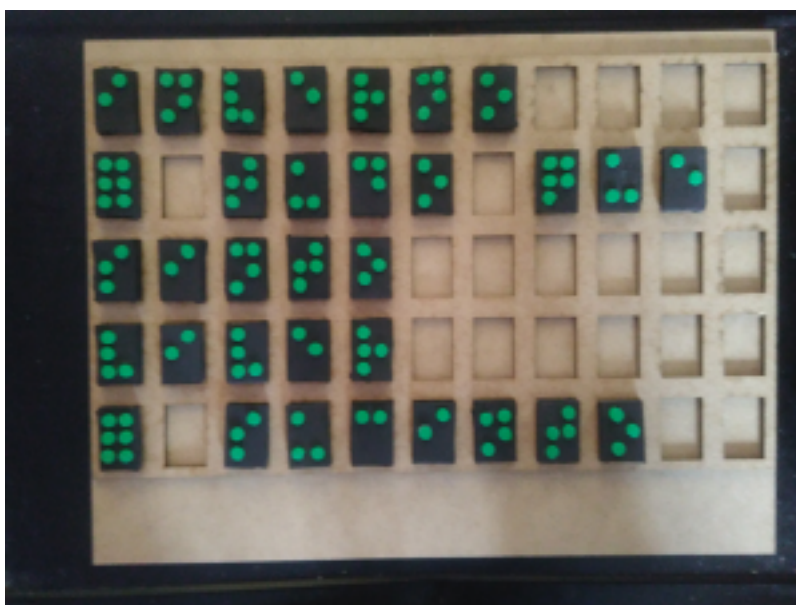


Figura 26: Poema sobre a TUI para avaliação do Cenário 4

O poema curto exibido em braille na Figura 26 corresponde à representação, na Língua Portuguesa, escrita a seguir.

“Inverno
É tudo que sinto
Viver
É sucinto”. [Paulo Leminski]

6.4 Considerações do Capítulo

Neste capítulo foi apresentando o método elaborado para a realização desta pesquisa. Numa visão geral, ele é composto de três fases: seleção dos participantes cegos e que alfabetizados em braille (quem avaliou o objeto), prototipação (o objeto avaliado), o método de avaliação em si (como foi avaliado o objeto pelos participantes). O método de avaliação foi composto por variáveis avaliadas e cenários de tarefa passados aos participantes.

O método de avaliação foi planejado para o fim específico do contexto de uma tecnologia braille. Para tanto, foram levantadas as variáveis a serem investigadas e compostos 4 diferentes cenários de tarefas, de forma a observar subconjuntos específicos de variáveis em cada um deles. Os participantes também foram divididos em dois subgrupos, de forma que metade da amostra passaria por uma livre exploração do protótipo, enquanto a outra começaria direto no primeiro cenário de tarefa.

Capítulo 7

Resultados

Neste capítulo são descritos os resultados obtidos pela execução do protocolo apresentado no Capítulo 6. O protocolo foi replicado com quatro participantes distintos que compartilham da condição da cegueira e dominam o código braille, porém indicando uma pluralidade de perfis (coluna 2 da Tabela 5) em suas atividades. Devido a tal pluralidade, os resultados encontram-se reportados individualmente em relatos descritivos e, ao final, consolidados em síntese de principais pontos-chave por variáveis investigadas.

Tabela 5: Amostra de participantes da pesquisa

Participante	Perfil qualitativo	Livre interação
P1	Pedagoga de CAAE	Sim
P2	Professor/Pesquisador em Educação	Não
P3	Criança (9 anos) Aluna de CAAE, 3º ano do Fundamental	Sim
P4	Funcionário em acervo de braille de biblioteca	Não

7.1 Resultados Individuais

7.1.1 Resultados de P1

A participante integrou o grupo de controle para o qual foi solicitado um momento de **livre interação** e reconhecimento do sistema antes da execução de cada cenário individual. P1 apresentou plena compreensão de que ao centro encontrava-se a linha para escrita e que a grade de celas à esquerda consistia do alfabeto ordenado para uso na TUI. Entretanto, P1 não identificou o botão à sua direita, precisando de intervenção do autor. Ainda no decorrer dessa etapa, a participante tateou o suporte e a câmera, o que poderia causar distorções no ângulo de captação, fato que não ocorreu no experimento.

Cenário 1

No Cenário 1 (escrita do próprio nome), a participante manteve a facilidade de localizar as letras na grade ordenada, em consistência com a etapa anterior. Encaixou todas as letras apropriadamente na base, exceto uma que ficou desencaixada e inclinada (Figura 27). Apesar disso, após chamar o *feedback* e receber alerta de erro, a participante conseguiu rapidamente acertar o encaixe da letra, solicitando o *feedback* com sucesso. Dessa forma, a variável de recuperação de erros do cenário seguinte já foi verificada em cenário prévio.

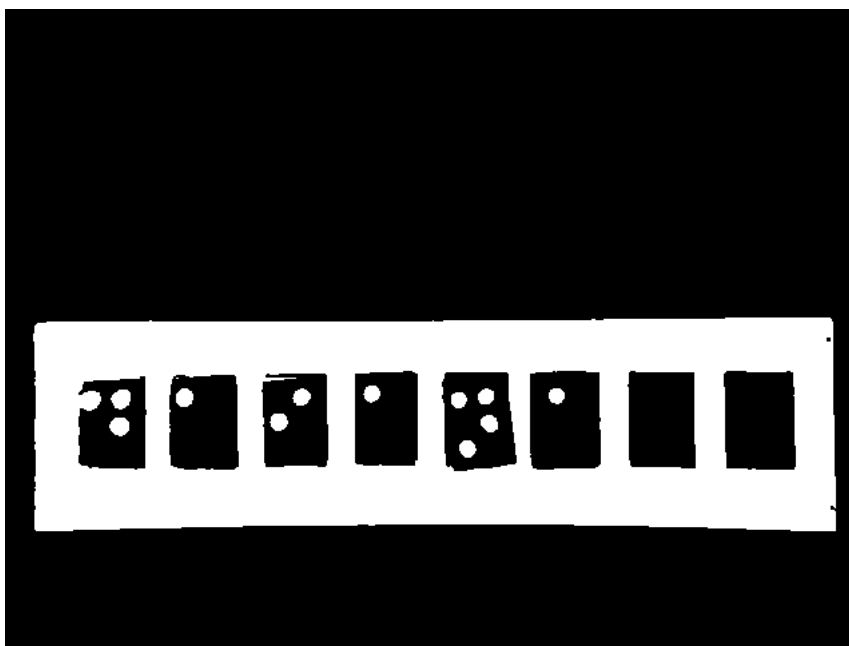


Figura 27: Log e entrada com a quinta letra, “n”, não encaixada corretamente

Em conversa complementar, P1 afirmou que a falta de fixação da grade de letras atrapalhou a execução. A grade solta à esquerda da TUI facilitava a mudança espacial não só da própria grade, mas das celas que poderiam soltar-se da mesma e serem perdidas sobre o espaço da mesa.

Na sequência, foram simulados os modos alternativos de chamada do *feedback*: automático e por comando de voz. No primeiro, a participante achou invasivo, causando sobrecarga de informação. Já no segundo, ela considerou uma alternativa possível, porém o botão tátil dá maior sensação de controle.

Cenário 2

No Cenário 2 (correção da palavra 'borla'), P1 novamente se recuperou do erro de escrita sem dificuldade. No entanto, como os comandos desse cenário retornavam mensagens binárias, “você ainda não corrigiu a palavra” ou “você acertou a palavra”, a participante achou importante o retorno de mensagens mais significativas (ex.: “há uma letra sobrando na palavra”).

Outra sugestão, foi que o comando inicial da interação fosse na forma de ditado, porém com algum pontuação em formato de jogo, em vez de “corrija a palavra”.

Cenário 3

No Cenário 3 (jogo de adivinhação de animais), P1 se deparou com a mecânica de jogo após comentário feito no cenário anterior. No entanto, como o jogo só iniciava a instrução auditiva após o botão ser acionado a primeira vez, essa informação teve de ser passada pelo autor por intervenção. Após isso, P1 considerou a interação simples, motivadora e apropriada para práticas pedagógicas, porém sentiu falta de um sistema de pontuação para reforçar o engajamento na progressão de níveis.

Em conversa posterior, P1 definiu, baseado em sua experiência no ensino, que o sistema apresentado nesse cenário seria apropriado para alunos em letramento do 2º e 3º anos do fundamental. Além disso, também encontraria aplicação para adultos com cegueira adquirida em fase de realfabetização. Ademais, afirmou que se usadas temáticas de conteúdos diferentes (ex.: geografia, matemática), o formato de jogo de quiz teria aplicação em mais contextos na prática de ensino para alunos cegos.

Cenário 4

No Cenário 4 (manipulação de poema), a grade de 5 linhas por 11 colunas foi apresentada com os versos pré-definidos no protocolo. A participante considerou possível a leitura, porém desagradável. Ela descreveu a experiência como uma “poluição tátil em analogia a poluição visual vivenciada por indivíduos videntes”.

Tanto o excesso de informação, bem como o fato de que, para trabalhar com textos maiores, a área precisaria aumentar ainda mais, foram enfatizados como limitações desse cenário por P1. A participante considera que o volume máximo adequado de texto para trabalhar na TUI proposta seja com sentenças curtas de 3 ou 4 palavras.

7.1.2 Resultados de P2

Cenário 1

O participante teve facilidade em localizar as letras na ordenação alfabética proposta, e escreveu seu nome, obtendo o *feedback* e o entendendo sem nenhuma ruptura na interação. No decorrer da tarefa, alegou que, embora fossem de fácil identificação, as letras com a dimensão proposta (3cm x 2cm) tornam a leitura um pouco mais lenta. Apesar disso, ressaltou que a velocidade de leitura não é a meta mais importante que deve ser buscada pelo leitor cego.

O participante observou que o fato de haver peças soltas na estrutura montada (na grade com as celas de letras ordenadas), ocasionando a mudança de padrão de manipulação espacial ao usuário, poderia causar a perda de elementos durante a interação. Apesar do possível problema,

ressaltou que a organização do aluno e o estímulo motor no arranjo apresentado pode direcionar a perspectiva desses problemas como desafios ao usuário. Também encontrou fragilidade na colagem dos pontos ao ler uma cela e descolar dois pontos da mesma.

P2 considerou a proposta do *feedback* em tempo real apropriada, e que poderia ser uma opção alternativa disponível no ambiente, uma vez que leitores de tela também dispõem desse modo de operação. Quanto ao comando de voz, o participante considerou ser algo que instiga a curiosidade da pessoa no uso do sistema. Em suma, P2 apresentou entusiasmo com o potencial de interação multimodal no ambiente, sugerindo também alguma forma de detecção do movimento das mãos do leitor.

Cenário 2

O cenário de correção foi facilmente resolvido por P2. Como sugestão, indicou mais mensagens situadas para possíveis interações com a ferramenta, tais como “Você está indo bem”, “Você faz boa leitura tátil”, “Você é organizado”. Dessa forma, haveriam mensagens motivacionais que poderiam ser empregadas em diferentes cenários de interação.

Cenário 3

No cenário de jogo, após instrução de apertar o botão para iniciar, P2 resolveu facilmente o primeiro desafio e o sistema prosseguiu para o segundo da lista. Ao notar pelo *feedback* auditivo que haveria mais 7 níveis, resolveu parar por entender que seria a mesma mecânica no restante do processo. Comentou que considera a proposta interessante, porém deve-se atentar a forma de apresentar conteúdos que um aluno (especialmente criança) ache desafiador e motivador para sua idade e conhecimento de mundo.

Cenário 4

No cenário do poema, P2 leu o conteúdo na área sem problemas. Ele voltou a mencionar a menor velocidade de leitura nas dimensões da TUI, acrescentando que nada substitui a leitura tátil no braille perfurado no tamanho oficial. No entanto, ressaltou mais uma vez sua visão de que a possibilidade do desafio, dessa vez em uma área maior, é algo válido ao educando cego.

P2 retornou a comentar a questão das dimensões das celas apontando que, nesse caso, a dimensão maior pode ser positiva para facilitar para o toque em dias de adversidades climáticas. Segundo P2, a sensibilidade de leitura do cego pode ser diminuída em dias de temperaturas mais frias. Além disso, ressaltou que a cegueira adquirida por causa de diabetes pode acompanhar uma sensibilidade tátil menor do sujeito, como sintoma da doença.

7.1.3 Resultados de P3

P3 foi a segunda participante do grupo de controle e a única criança da amostra. A pedagoga do CAAE no qual P3 é aluna acompanhou a sessão de avaliação. Na etapa de livre interação, P3 bateu as letras, as percebeu, assim como a linha de entrada ao centro, porém permaneceu sem reação. A pedagoga interveio sugerindo que a aluna escrevesse uma palavra, para a qual prontamente localizou as celas que desejava, percebendo a ordem alfabética as letras, e escreveu a palavra “Koda” referente ao nome de sua cachorra de estimação. O botão para a obtenção do *feedback* de áudio teve de ser informado.

Cenário 1

Após a exploração inicial, P3 escreveu e solicitou o *feedback* de seu nome sem dificuldades, uma vez que já conhecia o funcionamento do protótipo. Escreveu outra palavra para avaliar o *feedback* em tempo real, mas ao final demonstrou que preferiu usar o botão. Na hipótese do comando de voz para obtenção do *feedback*, também mostrou preferência pelo botão por aparente inibição de solicitar em voz alta a ação do ambiente.

Cenário 2

O cenário de correção foi facilmente resolvido por P3. Como pouca novidade apareceu no cenário, resolveu avançar imediatamente ao Cenário 3.

Cenário 3

No cenário de jogo, a participante manteve facilidade e observável agilidade na localização das celas, como nos cenários anteriores. P3 respondeu os animais correspondentes a cada nível de desafio, e mostrou motivação em continuar acertando. O cenário foi interrompido após o terceiro nível por causa do tempo limitado da participante, que teria aula após a avaliação.

Cenário 4

No cenário de poema, P3 manteve a eficácia de leitura mesmo na área maior. A participante afirmou que, mesmo com o tamanho maior da letra do que no braille convencional, achou fácil realizar a leitura.

Comentários da Pedagoga

Após o término da sessão, a pedagoga do CAAE de P3 ainda conversou com o autor do trabalho. A pedagoga mostrou considerar o cenário mais instigante à criança aquele com mecânica de jogo, o qual poderia abranger outros temas. Ela ainda demonstrou perceber mais potencial para a criação de uma tecnologia para treino autônomo em casa do que para uso do

professor em sala de aula, já que crianças sentem-se instigadas pela interação com tecnologia e professores, por sua vez, nem sempre enxergam vantagens diante das práticas que já empregam na escola.

7.1.4 Resultados de P4

Cenário 1

No cenário de escrita do próprio nome, P4 levou um tempo para reconhecer a ordem das letras e sentir suas dimensões. Passado seu reconhecimento inicial, escreveu sem dificuldade a palavra na linha de conteúdo e solicitou o *feedback*, combinando o áudio com a escrita braille. P4 descolou os pontos numa cela no primeiro contato e sentiu falta também de um indicador tátil para o lado de cima da cela a fim de não confundir uma letra com seu caractere correspondente ao virar a cela em 180°.

O participante considerou todos os modos de acionar o *feedback* válidos. Ele posicionou-se quanto à necessidade de avaliação do que cada indivíduo prefere ou sente-se mais confortável no momento de interação, logo ter mais opções é algo que definiu como “bom”.

Cenário 2

No cenário de correção, P4 corrigiu a palavra na linha e solicitou o *feedback*, sem nenhuma ruptura no processo. O participante alegou que uma opção para soletrar o que está na entrada pode auxiliar a pensar possíveis erros de escrita.

Cenário 3

P4 iniciou o jogo pressionando o botão após instrução do avaliador, envolveu-se resolvendo os dois primeiros níveis. Após isso, parou com a sequência e começou a comentar que acharia conveniente poder usar o sistema para avaliar um aluno em desafios temáticos como “Qual é o oceano que banha o Brasil?” (exemplo dado pelo participante). P4 ainda viu potencial para motivação nas mensagens apresentadas como “Parabéns!”.

Cenário 4

O cenário e interação de poema foi lido facilmente por P4. O participante considerou que a opção de ter mais espaço de entrada do que a linha com capacidade de 8 celas traz potencial para não limitar o uso da ferramenta a palavras, proporcionando trabalhar com sentenças mais elaboradas.

7.2 Resultados Consolidados por Variáveis

Os resultados são descritos por categoria de variáveis na Tabela 4. A síntese de cada variável foi realizada pelo acúmulo das 4 avaliações, seguindo o protocolo, conforme relatado na seção anterior.

7.2.1 Variáveis da TUI (Percepções)

A disposição física do ambiente teve seus principais elementos bem identificados pelos participantes. As celas foram elementos legíveis para todos os envolvidos, constando indícios de que poderia ter suas dimensões diminuídas sem perda de compreensão (variável “Identificação das celas”). A localização das celas na grade ordenada alfabeticamente também mostrou-se de simples realização (variável “Localização das celas”). Da mesma forma, os orifícios da área de entrada de conteúdo foram identificados em sua ordem e dimensão por todos nas avaliações (variável “Identificação dos espaços para celas”).

A leitura tátil das celas dispostas na entrada foi de fácil realização pela amostra (variável “Leitura do conteúdo corrente”). No entanto, a identificação do botão de *feedback* mostrou-se ineficaz sem a presença de instrução clara de sua função no ambiente (variável “Identificação do botão”).

Além das variáveis previstas, a firmeza do material foi um ponto que rendeu observações. Em algumas ocasiões, os pontos foram descolados das celas no ato de realizar a leitura tátil. Além disso, os elementos que compõem a TUI precisam estar todos fixados, como no caso da grade de letras que, por estar solta, poderia mudar o padrão de manuseio espacial do ambiente ou causar a perda de algumas celas pelo usuário.

7.2.2 Variáveis da TUI (Ações)

As operações de encaixar e desencaixar celas braille na TUI não apresentaram barreiras aos participantes (variáveis “Encaixe de cela” e “Desencaixe de cela”). Entretanto, houve objeção quanto ao fato de não haver um identificador tátil do lado de cima da cela, para evitar a confusão sobre qual caractere a mesma representava. A troca pode ocorrer em casos que uma letra, colocada de ponta cabeça, representa um sinal de pontuação no domínio braille.

Dentre os modos para chamar o *feedback* (variável “Modo de chamada de *feedback*”), o botão, mantido como padrão, foi considerado apropriado por todos, mantendo o controle literalmente na mão do usuário, apesar de, por vezes, terem faltado instruções auditivas para ativar o botão (ex.: Início do cenário 3). Por sua vez, os modos alternativos de leitura em tempo real e acionamento por comando de voz dos usuários foram considerados boas propostas por parte dos participantes. Tal divergência aponta o indício de que mantê-los como itens opcionais no ambiente pode satisfazer a maior abrangência de perfis de usuário.

7.2.3 Variáveis de Feedback

As características técnicas da voz sintética do Google, no ambiente em que foi reproduzida, não produziu nenhuma ruptura ou reclamação verbal dos participantes quanto ao volume (variável “Volume de áudio”), clareza ou velocidade (variável “Clareza da leitura da voz”). O uso dessa voz mostrou-se apropriado para a entrada pequena de conteúdo, uma vez que leitores de tela são utilizados pelos cegos em velocidade mais rápida que a voz empregada no experimento.

O tempo entre o acionamento do botão e do *feedback* tornou-se transparente na interação, sem nenhum atraso que tenha deixado os usuários perdidos (variável “Tempo entre ação e *feedback*”). O retorno de áudio do *notebook*, próximo à área da TUI, pareceu algo pertencente ao objeto para os participantes (variável “Proximidade do áudio com a TUI”). Por fim, o auxílio do *feedback* na recuperação de erros foi eficaz, embora o experimento tenha mostrado que possa apresentar mensagens mais refinadas e situadas de acordo com o contexto e a entrada (variável “Suporte a recuperação de erros”).

7.2.4 Variáveis de Entrada

As questões de ruídos possíveis no processamento de imagens foram percebidas ao configurar-se o ambiente em locais diferentes para cada avaliação. No entanto, as variáveis puderam ser controladas com os recursos implementados nesse primeiro protótipo.

7.2.5 Variáveis de Usuário

A intenção estabeleceu-se como variável independente comum a todos os cenários do método, uma vez que houve uma tarefa pré-definida em cada um deles. Na metade da amostra que realizou o pré-cenário exploratório, onde a intenção foi reduzida a “explore o ambiente”, a aprendizagem da TUI demonstrou-se direta nos elementos de celas e área de produção. Entretanto, a identificação autônoma do botão de acionamento não ocorreu em nenhum caso sem instrução.

Já a motivação esteve presente em todos os cenários de avaliação, já que os participantes apresentaram curiosidade em interagir para ver “como funcionava a proposta”. Períodos mais longos de exposição teriam de ser avaliados para relacionar motivação a tempo de uso. No entanto, a relação entre intenção e motivação apresentou-se forte no cenário de jogo, devido a como a amostra de participantes interagiu e manifestou-se, uma vez que a proposta conceitual de “jogar” tem relação direta com “diversão”.

Um fato de motivação espontânea surgiu na inesperada intervenção da pedagoga, na avaliação com P3, que sugeriu que a aluna escrevesse uma palavra qualquer. A reação de P3 ao escrever o nome de seu animal de estimação, usando seu conhecimento particular e afetivo de mundo, apresentou indícios de necessidade de suporte à interação com essa categoria de conhecimento. Além disso, a intervenção espontânea da pedagoga acabou produzindo um

cenário acidental de integração do papel do professor no uso da ferramenta, fato que carece de investigação no presente trabalho.

Por fim, as variáveis de fatores motores e fatores cognitivos foram atribuídas como antecedentes à avaliação. Tal decisão ocorreu porque a amostra de participantes selecionada já apresentava as pré-condições de domínio do sistema braille, abarcando os fatores.

Capítulo 8

Discussão

8.1 Aceitação da TUI Minimalista e Baixo Custo

Na realização das avaliações foi observada a aceitação da execução de atividades diferentes sobre o mesmo objeto empregado como TUI. Os participantes se envolveram com interesse e conseguiram realizar as tarefas de cada cenário. Quando manifestaram-se, observaram o potencial de uso do conceito de uma arquitetura extensível, pois deram ideias de aplicações em diferentes domínios.

Alguns ajustes necessários apontados, relativos ao material empregado no protótipo, permitem extrair algumas lições. Primeiramente, toda a estrutura da TUI, no caso o arranjo de área de conteúdo, grade de celas e botão, devem estar firmes sem possibilidade de mudança de posição ou queda no decorrer da interação. Em seguida, os pontos precisam também seguir o princípio de estarem bem colados nas celas, evitando alguns acidentes observados. Por fim, metaindicadores táteis para a identificação do lado de cima da cela, evitando o medo de inserir a cela ao contrário são outra melhoria no artefato tangível.

De maneira geral, a proposta conceitual de TUI foi aceita, despertou motivação dos participantes e foi fácil de aprender. Um conjunto mínimo de instruções, de modo a não sobrecarregar o usuário, poderia dar indicações de como usar a ferramenta em cada cenário, já que o botão foi um item que só foi compreendido após a explicação de sua função. Além disso, explorar alternativas de tamanhos, materiais e a possibilidade de uma cela modular, que possa ser modificada ponto-a-ponto, pode alimentar melhorias no redesign que torne o conceito ainda mais minimalista e de fácil uso pelos interessados.

Com isso, tem-se a satisfação das propriedades, elencadas no objetivo geral dessa dissertação, de um projeto **tangível e extensível**, materializado e com conceito provado junto a uma amostra de *stakeholders*. No entanto, resta a discussão da propriedade do **baixo custo**, que visa situar o projeto de forma a minimizar a barreira socioeconômica da população cega e suas instituições de ensino públicas. Por tratar-se de um protótipo e não de um produto, o baixo custo tornou-se uma realidade pelo uso apenas de materiais baratos (EVA, MDF, câmera VGA),

executados em um computador utilizando um *software* desenvolvido fazendo uso de bibliotecas de *software* livre. Considerando-se a especificação de regras visuais para a TUI, o material para a confecção de uma instância do artefato tangível pode ser qualquer um que respeite tais regras, de acordo com o que estiver financeiramente acessível no contexto do autor.

A entrada por visão computacional permitiu o uso de uma *webcam* simples (não de alta definição), necessitando de um computador para execução do *software* do protótipo. O computador pode ser alegado como barreira econômica para o baixo custo, porém a estrutura de *software* pode vir a ser adaptada para o uso em *smartphones*, por exemplo, que são dispositivos computacionais cada vez mais massificados [Rodrigues et al., 2015]. Ademais, a arquitetura específica a entrada modularizada, podendo futuramente substituir o mecanismo de entrada por visão computacional, para o qual terá de ser analisado o seu custo, pensando-se no potencial de apropriação pelos cegos. Dentro do documentado nesta dissertação, a busca pelo baixo custo permeou todas as fases do trabalho e foi outro objetivo atingido.

8.2 Pluralidade de Leitores Braille

A seleção de participantes para a realização das avaliações previstas no método teve de ser adaptada pela dificuldade de obtenção de uma amostra de apenas crianças cegas. Com isso, houve a participação de 3 adultos cegos leitores de braille além de 1 criança. Como todos apresentavam ocupações diferentes em suas vidas, a pluralidade de opiniões sobre algumas proposições do trabalho foi observada, reforçando o valor de grupos multidisciplinares na IHC [Carroll, 2013].

O uso de opções diferentes de acionamento do *feedback* ou uma área maior de produção textual, permitindo conteúdos significativos, gerou algumas divergências entre os participantes. Entretanto, uma alternativa é manter a versão minimalista como padrão e permitir como módulos adicionais, conforme a arquitetura específica, as características que satisfaçam aos leitores que encontrem mais facilidade, vontade ou necessidade em lidar com situações mais complexas. Além disso, uma fundamentação teórica na área de *design* adaptativo/adaptável torna-se necessária para complementar a fundamentação em IHC de uma nova fase da pesquisa.

8.3 Potencial de Apropriação da Ferramenta

Nesta pesquisa, validou-se o protótipo inicial de uma solução que, futuramente, possa vir a ter um formato de ferramenta distribuível para ser prontamente usada. Os resultados das avaliações, alicerçados nas conversas com participantes, levantaram as hipóteses de apropriação em sala de aula e de apropriação autônoma.

8.3.1 Apropriação em Sala de Aula

Uma limitação especificada na arquitetura para a primeira instância do protótipo foi a falta de uma interface para o professor ajustar o cenário de interação. Tal camada deve ser especificada de forma a, futuramente, avaliar o projeto com o par educador-educando. Entretanto, nos resultados da avaliação do protótipo nesta pesquisa, os pedagogos de CAEEs opinaram com ressalvas a respeito do uso prático da ferramenta.

Para os pedagogos, a ferramenta pode ter aplicações complementares, em contexto de alfabetização e letramento, com atividades específicas para os alunos. No entanto, muitas atividades do processo de ensino são realizadas com simplicidade e sem apoio tecnológico computacional trazendo os resultados esperados. Ademais, há perfis de professores que podem ter mais resistência em aderir ao uso de tecnologias novas em sala, dada a potencial curva de aprendizagem exigida do educador. Diante disso, o *design* da proposta para esse fim de apropriação precisará detectar e minimizar as barreiras que repelem o uso em sala pelo professor.

8.3.2 Apropriação Autônoma

Uma outra forma de apropriação, surgida das conversas com alguns participantes, seria do aluno com a ferramenta sem a presença de um professor. Tal uso da ferramenta seria uma forma de o aluno complementar sua aprendizagem, com exercícios ou jogos, em horário fora de sala. Tal proposta de treinamento autônomo é um paradigma presente em alguns trabalhos revisados na pesquisa [Kalra et al., 2009, Milne et al., 2014].

Essa forma traz um desafio de design quanto a como permitir a transição entre cenários de interação, níveis e conteúdos diretamente na mão do aluno. Assim como no paradigma de apropriação em sala de aula, o pedagogo teria de integrar o processo de design participativo a fim de definir como a ferramenta guiaria o aluno em suas práticas complementares fora dos momentos de aula.

8.4 Contexto de Letramento e Alfabetização

A pesquisa foi inicialmente proposta para o contexto de letramento, fato empregado ao selecionar participantes já alfabetizados no braille. Esses participantes destacaram, com foco no cenário de aplicação de jogos, o potencial de usar o sistema para práticas de letramento envolvendo conteúdos de outras disciplinas, como no exemplo apontado do *quiz* com perguntas de geografia. A presença da mesma visão em vários participantes, bem como a motivação observada da criança na interação com o jogo, enaltece o direcionamento do trabalho para apropriar-se de conceitos de gamificação no contexto de letramento.

Apesar do contexto inicial, não pode-se descartar a possibilidade de aplicação dos resultados em um contexto de alunos em fase de alfabetização. Pela modelagem de cenários

interativos relevantes junto ao pedagogo, é possível avaliar o uso do ambiente como ferramenta complementar também ao processo de alfabetização.

O diálogo incipiente com o letramento pela via direta é presente em outros trabalhos do grupo de pesquisa. Neste trabalho, apenas foi proposto um cenário para avaliar a hipótese de manipular conteúdos maiores e significativos (na avaliação, um poema curto) na TUI. Os resultados apontaram que foi possível trabalhar na área proposta, porém foram inconclusivos quanto ao uso de áreas maiores devido a possíveis limitações da criança para manipulação de uma área muito grande. Ademais, o método de letramento pela via direta precisaria ser avaliado em pesquisa de caráter pedagógico, em comunidades de letramento de crianças cegas, para investigar sua eficiência ao se apropriar do ambiente proposto nessa dissertação.

8.5 Proposta de Diretrizes

A partir do conhecimento obtido da análise dos resultados de pesquisa, foram extraídas 6 diretrizes para orientar o *redesign* do trabalho apresentado. São elas:

1. Todos os itens que compõem a TUI devem permanecer firmes, de forma a manter uma noção espacial estática para o cego, exceto as celas braille que são os elementos dinâmicos da parte tangível.
2. Uma cela em material que pode ter seus pontos alterados (removidos ou acrescentados) em tempo de interação é o ideal para tornar a granularidade de manipulação do braille possível no nível dos pontos.
3. Os modos alternativos de *feedback* devem ser disponibilizados como opcionais, com ativação ao alcance do usuário que considera apropriado usá-los, abrangendo maior pluralidade de perfis de usuário.
4. A elaboração de extensões para novos cenários interativos deve contar com a participação de especialista em educação de cegos, de forma a criar módulos significativos para fins de aprendizagem.
5. Recursos de gamificação, como pontuações e progressão de níveis, devem ser acrescentados às extensões para maximizar a motivação para o progresso do usuário.
6. Mensagens de motivação situadas e inteligentes devem ser inseridas onde possível.
7. O conhecimento de mundo do aluno deve ser apropriado como conteúdo trabalhado nas extensões, na medida do possível.

8.6 Revisão pelo Método Classificatório Proposto

O método proposto e empregado para a análise de trabalhos na revisão bibliográfica (Capítulo 4) é aqui empregado para revisão do protótipo avaliado com usuários na dissertação. As nove questões do método são colocadas e discutidas abaixo.

[Q1] Qual é o custo, tanto de aquisição como reprodução, da tecnologia?

Como observado na seção 8.1, o baixo custo de aquisição foi mantido pelo uso de materiais de baixo custo para a TUI captados por uma webcam também de baixo custo e processados em protótipo desenvolvido com *software* livre. Já o custo de reprodução também é baixo, pois requer uma cópia do *software*, execução em computador com webcam e a confecção da TUI em qualquer material conforme as regras visuais especificadas na seção 5.1.

[Q2] Qual é o espaço para celas braille disponível?

A especificação prevê um espaço flexível, de quantas linhas por colunas de cela for necessário. No entanto, o protótipo funcional contou com uma linha de 8 colunas. Já a grade de 5 linhas por 11 colunas foi usada para avaliar um cenário de poema sem a funcionalidade computacional. A limitação do protótipo deve-se ao alcance de captação da câmera de baixa resolução. Uma reavaliação com câmera de alta definição seria necessária para reavaliar o potencial de entrada do protótipo.

[Q3] O sistema permite o uso de estenografia braille (grau 2), pontuações, sinais compostos ou notações de outros domínios?

O protótipo funcional incluiu processamento de expressões compostas de números e letras em caixa alta. No entanto, nas avaliações do método, apenas conteúdos com letras simples foram abordados. No caso dos símbolos compostos, assim como da apropriação para outros domínios, as hipóteses de problemas referem-se principalmente à área necessária.

[Q4] O sistema permite entrada tátil ou saída tátil de braille?

Apenas entrada tátil, na forma das celas sobre a base da TUI. A saída foi trabalhada apenas pelo modo auditivo, embora a arquitetura especificada preveja a possibilidade de acréscimo de outros modais de saída.

[Q5] Qual metáfora de TUI o sistema implementa?

Apenas pronome, pois o sistema representa uma metáfora dos objetos (celas braille). A metáfora de verbo não se aplica, pois a ação de escrita não segue o padrão manual de ferramentas tradicionais dos cegos como punção e reglete.

[Q6] Qual é a granularidade de manipulação do braille na TUI?

Em nível de cela. No entanto, uma diretriz (seção 8.5) foi levantada a partir da análise de resultados para informar o redesign da cela de forma a fornecer também a manipulação em nível de ponto.

[Q7] Quais opções de interação multimodal apoiam a ferramenta?

Na avaliação do protocolo da pesquisa foi simulado apenas o processamento de comandos de voz do usuário como alternativa ao acionamento de *feedback*.

[Q8] Quais abordagens motivadoras para o ensino de crianças inclui a ferramenta?

Foram incluídos cenários de jogos e manipulação de poemas (gênero textual significativo).

[Q9] Quais abordagens motivadoras para o ensino de crianças inclui a ferramenta?

A arquitetura é extensível, permitindo o desenvolvimento de cenários de interação variados para tratar a entrada e retornar *feedback* ao usuário. No entanto, uma limitação dessa instância foi a falta de uma interface do professor para que o mesmo selecionasse cenários, conteúdos, níveis ou uma ferramenta de autoria de extensões.

8.6.1 Comparação ao Estado da Arte

A análise com o método classificatório foi disposta na Tabela 6, lado a lado com a classificação obtida na revisão bibliográfica (Tabela 2).

Pode-se observar na Tabela 6 que a proposta defendida nesta pesquisa é a única com tamanho da área de conteúdo que pode ser alterado (Q2). Somado a isso, o conjunto de baixo custo (Q1) e o fornecimento de mais opções motivadoras para a interação (Q8) situou este trabalho como diferenciado frente ao estado da arte.

Questão	Esta dissertação	touchscreen	hardware de baixo custo	vestível	braille blocks
Q1 - Custo	Baixo custo (<i>software</i> e materiais simples)	Baixo custo (<i>app</i> para <i>smartphones</i>)	Custo médio (dependente de implementação de <i>hardware</i>)	Alto custo	Custo médio (dependente de detector e <i>tags</i> NFC)
Q2 - Espaço	Variável	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
Q3 - Símbolos	Sinais compostos	N/A	Sinais compostos e pontuações	N/A	Sinais compostos
Q4 - E/S	Entrada somente	Entrada e Saída	Entrada somente	Saída somente	Entrada somente
Q5 - Metáfora	Pronome	N/A	Pronome-verbo	N/A	Pronome
Q6 - Granularidade	Cela	Ponto-a-ponto	Ponto-a-ponto	Ponto-a-ponto	Cela
Q7 - Multimodal	Áudio e processamento de voz	Áudio e <i>vibracall</i>	Processamento de voz, retorno de áudio e tangível	Áudio e <i>vibracall</i>	Áudio
Q8 - Motivação	Jogos e gêneros textuais	Jogos	N/A	N/A	N/A
Q9 - Professor	Escolher desafios e criar novos	Autodidata	Escolher níveis/desafios	Autodidata	Escolher níveis/desafios

Tabela 6: Comparação pelo método classificatório da proposta desta pesquisa (destacada) com o estado da arte

Capítulo 9

Conclusões

Neste trabalho foi projetado e instanciado, na forma de protótipo funcional, um sistema que apóia práticas com o braille. O sistema manteve como propriedades centrais ser interativo, tangível, extensível e de baixo custo. Logo, o objetivo geral da pesquisa foi atingido.

Em ordem para atingir o fim do trabalho, uma arquitetura em camadas foi especificada. Nesta arquitetura, um módulo para entrada por visão computacional foi elaborado a partir da definição de um conjunto de regras visuais para a TUI. Seguindo-se tal conjunto, uma nova TUI de entrada pode ser confeccionada empregando-se quaisquer materiais físicos. No caso desta pesquisa, a TUI do protótipo foi produzida com EVA e MDF.

Na arquitetura, uma camada para extensões foi definida, possibilitando a elaboração de aplicações interativas que se apropriem da entrada e retornem *feedbacks* contextualizados no *design* da extensão. Para o protocolo de avaliação deste estudo, 4 cenários de tarefas foram determinados, buscando-se observar um conjunto de variáveis, sendo tais cenários transferidos para extensões executadas no sistema.

A avaliação com participantes contou com uma amostra de 4 pessoas cegas que dominam o sistema braille, incluindo 1 criança. A aplicação do protocolo de avaliação levantou uma série de problemas em certas variáveis que, após análise, foram transformadas em diretrizes para o *redesign* a partir das lições aprendidas. No entanto, a proposta geral de interação, um mesmo artefato tangível minimalista de entrada para diferentes cenários com diferentes mensagens auditivas de *feedback*, apresentou aprovação de todos os participantes. Em especial, a motivação foi dado observável na forma como a manipulação do protótipo instigou os participantes, com ênfase ao manifestarem-se após o cenário de jogos.

Por fim, um método classificatório foi elaborado para a revisão bibliográfica da dissertação. O mesmo método foi utilizado para classificar a proposta avaliada nesta pesquisa, em comparação ao estado da arte. Neste aspecto, a mesma posiciona-se como a única com suporte a tamanho de área de conteúdo dinâmica, permitindo conteúdos mais significativos como entrada, além de ser de baixo custo de aquisição/replicação e propiciar o uso de abordagens motivadoras.

Neste percurso de pesquisa foi possível mostrar a viabilidade técnica da proposta, além de seu potencial de generalização para outras formas de implementação na arquitetura estabelecida.

O protótipo com um conjunto elementar de funções foi aprovado pelos usuários, com algumas ressalvas, desejadas na perspectiva de IHC, para a melhora da usabilidade e experiência de usuário nos próximos *redesigns*. Observado tal resultado, a aproximação maior do público-alvo, e o subsequente maior conhecimento sobre o mesmo, nas diversas etapas do projeto maximizará a tomada de decisões para a elaboração de uma tecnologia efetivamente aplicável ao problema da desbrailização.

O usuário potencial de implementações baseadas no conhecimento aqui produzido apresenta perfis plurais. As formas de apropriação em seus contextos específicos não podem estar restritas pelo *design*, o que foi observado neste trabalho ao elaborar-se uma arquitetura o mais modular e extensível possível. Dessa forma, a arquitetura especificada na pesquisa propiciará a derivação de implementações para lados opostos do espectro de necessidades e desejos dos usuários: individual ou colaborativo, em contexto de alfabetização ou letramento, para entretenimento ou repetição de exercícios etc.

Em uma perspectiva epistêmica, este estudo consistiu de uma pesquisa tecnológica fundamentada em teorias científicas multidisciplinares, com base metodológica derivada da área de IHC. O trabalho não buscou uma explicação de causa-efeito acerca de um fenômeno, mas a realização de experimentos com um protótipo do objeto proposto a fim de descrever as experiências de uma amostra de pessoas cegas com o mesmo. A partir dessa pesquisa descritiva, há grande potencial de extração de novas questões e hipóteses para a realização de pesquisas sequenciais de caráter descritivo ou, até mesmo, explicativo.

9.1 Limitações da Pesquisa

Algumas limitações da pesquisa são inerentes à primeira versão do projeto. Por ter sido implementado na forma de protótipo funcional e com uma câmera de baixo custo, maximizando esta característica na pesquisa, o cenário com entrada em uma área maior, compreendendo o conteúdo de um poema, não pôde ser captado computacionalmente. Portanto, a avaliação desse cenário foi realizada de forma simulada apenas pela manipulação do artefato tangível, com áudios pré-gravados, limitando a observação da interação de forma mais realista.

Os módulos, referentes aos cenários de tarefas do método de pesquisa, foram desenvolvidos para observar-se um conjunto de variáveis estipulado orientado por fundamentos teóricos do domínio e da IHC. Entretanto, não houve práticas de design participativo com pedagogos do meio da educação para cegos a fim de apoiar o projeto desses módulos. Tal limitação incide na menor aplicabilidade prática, para uso no contexto educacional, dos cenários avaliados.

A amostra de participantes na avaliação do protótipo também apresentou limitações. Primeiramente, a quantidade de apenas 4 pessoas limitou a generalização, embora tenha fornecido um bom nível de coesão de resultados entre os envolvidos. Em seguida, o perfil qualitativo idealizado inicialmente foi o de crianças cegas alfabetizadas, porém houve barreiras não previstas para o agendamento com pessoas desse perfil (autorização da pedagoga da escola, consentimento

dos responsáveis e tempo livre da criança, responsáveis e pedagogo em paralelo). Diante disso, apenas 1 dos 4 participantes foi uma criança. No entanto, a participação de adultos, incluindo 2 especialistas no campo da educação, trouxe *insights* para a pesquisa.

Outra questão referente ao método é a observação da variável de “motivação”, que apresentou resultados que reforçaram o alcance do objetivo do estudo. A observação foi limitada a um período de tempo curto e único. A motivação, para ser observada com mais rigor, demanda um método longitudinal de pesquisa.

Por fim, as limitações a respeito da forma de apropriação pelo público cego da ferramenta aqui proposta não pode ser discutida em profundidade no contexto desta dissertação. De modo igual, limita-se a discussão das maneiras de uso do sistema no processo de letramento ou alfabetização, e o respectivo impacto na aprendizagem. A abordagem de tais temas, de relevância direta na aplicação do conhecimento aqui obtido, requer pesquisas específicas em parceria com especialistas em letramento.

9.2 Trabalhos Futuros

Baseado nas conclusões e limitações da pesquisa recém expostas, lista-se uma série de trabalhos futuros:

- A replicação do protocolo de pesquisa deste trabalho com uma amostra apenas de crianças cegas.
- O *redesign* de uma segunda iteração do protótipos guiado pelas diretrizes levantadas na discussão de resultados.
- O envolvimento de especialistas da educação de cegos em práticas de design participativo para a produção de módulos que sustentem práticas significativas ao letramento de cegos, com foco em jogos.
- A elaboração de uma pesquisa de avaliação longitudinal, em parceria com pedagogos, para observar resultados mais próximos do uso real.

Referências Bibliográficas

- [Ahearn et al., 2013] Ahearn, A., Kizza, V. e Martinez, J. D. (2013). Puppetplay: Testing interactive puppets to promote reading comprehension in uganda & el salvador. Em *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children, IDC '13*, páginas 317–319, New York, NY, USA. ACM.
- [Aizawa e Watanabe, 2014] Aizawa, F. e Watanabe, T. (2014). A braille writing training device with voice feedback. Em *Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility, ASSETS '14*, páginas 243–244, New York, NY, USA. ACM.
- [Alisson, 2013] Alisson, E. (2013). Novo instrumento reduz tempo de aprendizado de braille. *Agência FAPESP*.
- [Alvargonzález, 2011] Alvargonzález, D. (2011). Multidisciplinarity, interdisciplinarity, transdisciplinarity, and the sciences. *International Studies in the Philosophy of Science*, 25(4):387–403.
- [Antle e Wise, 2013] Antle, A. N. e Wise, A. F. (2013). Getting down to details: Using theories of cognition and learning to inform tangible user interface design. *Interacting with Computers*, 25(1):1–20.
- [Antle et al., 2011] Antle, A. N., Wise, A. F. e Nielsen, K. (2011). Towards utopia: Designing tangibles for learning. Em *Proceedings of the 10th International Conference on Interaction Design and Children, IDC '11*, páginas 11–20, New York, NY, USA. ACM.
- [Baptista, 2000] Baptista, J. A. L. S. (2000). *A invenção do Braille e a sua Importância na Vida dos Cegos*. Gráfica 2000, Lisboa.
- [Brasil, 2015] Brasil (2015). Lei brasileira de inclusão da pessoa com deficiência (estatuto da pessoa com deficiência). Acessado em 14/07/2017.
- [Bueno, 2014] Bueno, J. (2014). *Pesquisa-Ação na Construção de Insumos Conceituais para Uma Plataforma de Apoio ao Letramento Bilíngue de Crianças Surdas*. Tese de doutorado, UFPR.
- [Caillois e Barash, 1961] Caillois, R. e Barash, M. (1961). *Man, play, and games*. University of Illinois Press.

- [Canteri, 2014] Canteri, R. d. P. (2014). Diretrizes Para o Design de Aplicações de Jogos Eletrônicos para Educação Infantil de Surdos. Dissertação de Mestrado, UFPR.
- [Carroll, 2013] Carroll, J. M. (2013). Human Computer Interaction - brief intro. Em Soegaard, M. e Dam, R. F., editores, *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction*, capítulo: Human Comp. The Interaction Design Foundation, Aarhus, Denmark, 2nd edition.
- [Costanza et al., 2010] Costanza, E., Giaccone, M., Kueng, O., Shelley, S. e Huang, J. (2010). Tangible interfaces for download: Initial observations from users' everyday environments. Em *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, páginas 2765–2774, New York, NY, USA. ACM.
- [da Rosa, 2014] da Rosa, E. (2014). A crise da educação das pessoas com deficiência visual no paraná. Acessado em 30/06/2017.
- [Da Silva e Barbosa, 2007] Da Silva, B. S. e Barbosa, S. D. J. (2007). Designing human-computer interaction with molic diagrams—a practical guide.
- [de Camargo, 2014] de Camargo, E. P. (2014). Aula 2 - como ensinar o braille. <https://youtu.be/eP3oMzkDUG4>. Acessado em 15/08/2017.
- [de Sousa, 2001] de Sousa, J. B. (2001). As novas tecnologias e a “desbrailização”: mito ou realidade? *II SENABRAILLE - Anais do Seminário Nacional de Bibliotecas Braille*.
- [de Sousa, 2004] de Sousa, J. B. (2004). *Aspectos comunicativos da percepção tátil: a escrita em relevo como mecanismo semiótico da cultura*. Tese de doutorado, PUC-SP.
- [Dehaene, 2012] Dehaene, S. (2012). *Os Neurnios da Leitura*. Penso, Porto Alegre.
- [Foucambert, 1994] Foucambert, J. (1994). *A leitura em questão*. Artes Médicas, Porto Alegre.
- [Frey et al., 2011] Frey, B., Southern, C. e Romero, M. (2011). *Universal Access in Human-Computer Interaction. Context Diversity: 6th International Conference, UAHCI 2011, Held as Part of HCI International 2011, Orlando, FL, USA, July 9-14, 2011, Proceedings, Part III*, capítulo: BrailleTouch: Mobile Texting for the Visually Impaired, páginas 19–25. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Fundo, 2016] Fundo, D. N. p. C. (2016). Braille bricks. <http://www.braillebricks.com.br/>. Acessado em 30/06/2017.
- [García, 2016] García, L. S. (2016). Diretrizes de ambiente de letramento para cegos. Relatório técnico.
- [García et al., 2016] García, L. S., de Siqueira, J. H. S., Bueno, J. e Forcelini, P. G. (2016). A Tangible Interaction Platform as a Concrete Support for Blind Children Literacy in Braille.

- Em *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction*. Springer International Publishing.
- [Grudin, 2012] Grudin, J. (2012). A Moving Target—The Evolution of Human-Computer Interaction. *Human-Computer Interaction Handbook (3rd Edition)*.
- [IBGE, 2010] IBGE (2010). Características Gerais da População, Religião e Pessoas Com Deficiência. Relatório técnico.
- [INEP, 2014] INEP (2014). Censo Escolar da Educação Básica 2013 Resumo Técnico. Relatório técnico, Ministério da Educação.
- [Isayed e Tahboub, 2015] Isayed, S. e Tahboub, R. (2015). A review of optical braille recognition. Em *Web Applications and Networking (WSWAN), 2015 2nd World Symposium on*, páginas 1–6.
- [Ishii, 2008] Ishii, H. (2008). The tangible user interface and its evolution. *Communications of the ACM*, 51(6):32–36.
- [Ishii e Ullmer, 1997] Ishii, H. e Ullmer, B. (1997). Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits, and atoms. *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, páginas 234–241.
- [Jafri, 2014] Jafri, R. (2014). *Computers Helping People with Special Needs: 14th International Conference, ICCHP 2014, Paris, France, July 9-11, 2014, Proceedings, Part II*, capítulo: Electronic Braille Blocks: A Tangible Interface-Based Application for Teaching Braille Letter Recognition to Very Young Blind Children, páginas 551–558. Springer International Publishing, Cham.
- [Jaimes e Sebe, 2007] Jaimes, A. e Sebe, N. (2007). Multimodal human–computer interaction: A survey. *Computer vision and image understanding*, 108(1):116–134.
- [Jayant et al., 2010] Jayant, C., Acuario, C., Johnson, W., Hollier, J. e Ladner, R. (2010). V-braille: Haptic braille perception using a touch-screen and vibration on mobile phones. Em *Proceedings of the 12th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS '10*, páginas 295–296, New York, NY, USA. ACM.
- [Jordà et al., 2007] Jordà, S., Geiger, G., Alonso, M. e Kaltenbrunner, M. (2007). The reactable: Exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. Em *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction, TEI '07*, páginas 139–146, New York, NY, USA. ACM.
- [Kalra et al., 2009] Kalra, N., Lauwers, T., Dewey, D., Stepleton, T. e Dias, M. B. (2009). Design of a braille writing tutor to combat illiteracy. *Information Systems Frontiers*, 11(2):117–128.

- [Lemos e Cerqueira, 2013] Lemos, E. R. e Cerqueira, J. B. (2013). O sistema braille no brasil. *Revista Benjamin Constant*, páginas 13–17.
- [Liu et al., 2007] Liu, Y., Yu, C., Liang, M., Li, J., Tian, L., Zhou, Y., Qin, W., Li, K. e Jiang, T. (2007). Whole brain functional connectivity in the early blind. *Brain*, 130(8):2085–2096.
- [Markova, 2013] Markova, M. S. (2013). How does the tangible object affect motor skill learning? Em *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, páginas 305–308, New York, NY, USA. ACM.
- [Markova et al., 2012] Markova, M. S., Wilson, S. e Stumpf, S. (2012). Tangible user interfaces for learning. *Int. J. Technol. Enhanc. Learn.*, 4(3/4):139–155.
- [Marshall, 2007] Marshall, P. (2007). Do tangible interfaces enhance learning ? *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction (TEI'07)*, páginas 163–170.
- [McComiskey, 1996] McComiskey, A. V. (1996). The Braille Readiness Skills Grid: A Guide to Building a Foundation for Literacy. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 90(3):190–193.
- [Melare, 2013] Melare, J. (2013). Novas tecnologias facilitam a leitura e o letramento de deficientes visuais. *ComCiência*, 154.
- [Milne et al., 2014] Milne, L. R., Bennett, C. L., Ladner, R. E. e Azenkot, S. (2014). Brailleplay: Educational smartphone games for blind children. Em *Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility*, ASSETS '14, páginas 137–144, New York, NY, USA. ACM.
- [Ministério da Educação, 2017] Ministério da Educação, M. (2017). Comissão brasileira de braille. <http://portal.mec.gov.br/formacao/30000-uncategorised/19063-comissao-brasileira-do-braille>. Acessado em 30/06/2017.
- [National Federation of the Blind, 2009] National Federation of the Blind (2009). The Braille Literacy Crisis in America. Relatório técnico.
- [Nicolaiewsky, 2016] Nicolaiewsky, C. d. A. (2016). Pistas para o ensino da língua escrita em braille: análise de erros presentes na produção textual. *Revista Benjamin Constant*, 1(59):80–97.
- [Nicolau et al., 2015] Nicolau, H., Montague, K., Guerreiro, T., Rodrigues, A. e Hanson, V. L. (2015). Holibraille: Multipoint vibrotactile feedback on mobile devices. Em *Proceedings of the 12th Web for All Conference*, W4A '15, páginas 30:1–30:4, New York, NY, USA. ACM.
- [Nowill, 1996] Nowill, D. G. (1996). ... *E Eu Venci Assim Mesmo*. Totalidade, São Paulo, 1 edition.

- [Ohtsuka et al., 2013] Ohtsuka, S., Tomizawa, T., Hasegawa, S., Sasaki, N. e Harakawa, T. (2013). Introduction of a wireless body-braille device and a self-learning system. Em *Consumer Electronics (GCCE), 2013 IEEE 2nd Global Conference on*, páginas 407–409.
- [Oliveira et al., 2011] Oliveira, J., Guerreiro, T., Nicolau, H., Jorge, J. e Gonçalves, D. (2011). *Human-Computer Interaction – INTERACT 2011: 13th IFIP TC 13 International Conference, Lisbon, Portugal, September 5-9, 2011, Proceedings, Part I*, capítulo: BrailleType: Unleashing Braille over Touch Screen Mobile Phones, páginas 100–107. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Perkins et al., 2013] Perkins, on English Braille, I. C., for the Blind, N. L. S. e Handicapped, P. (2013). *World Braille Usage*. National Library Service for the Blind and Physically Handicapped, 3rd edition.
- [Petersen et al., 2015] Petersen, M. G., Rasmussen, M. K. e Jakobsen, K. B. (2015). Framing open-ended and constructive play with emerging interactive materials. *Proceedings of the 14th International Conference on Interaction Design and Children - IDC '15*, páginas 150–159.
- [Preece et al., 2013] Preece, J., Sharp, H. e Rogers, Y. (2013). *Design de interação: além da interação humano-computador*. Bookman.
- [Reich et al., 2011] Reich, L., Szwed, M., Cohen, L. e Amedi, A. (2011). A ventral visual stream reading center independent of visual experience. *Current Biology*, 21(5):363–368.
- [Rodrigues et al., 2015] Rodrigues, A., Montague, K., Nicolau, H. e Guerreiro, T. (2015). Getting smartphones to talkback: Understanding the smartphone adoption process of blind users. Em *Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility, ASSETS '15*, páginas 23–32, New York, NY, USA. ACM.
- [RW, 2009] RW, M. (2009). The role of braille in the literacy of blind and visually impaired children. *Archives of Ophthalmology*, 127(11):1530–1531.
- [Ryles, 1996] Ryles, R. (1996). The impact of braille reading skills on employment, income, education, and reading habits. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 90:219–226.
- [Sadato, 2005] Sadato, N. (2005). How the Blind "See" Braille: Lessons From Functional Magnetic Resonance Imaging. *The Neuroscientist*, 11(6):577–582.
- [Schell, 2008] Schell, J. (2008). *The Art of Game Design: A Book of Lenses*. A K Peters/CRC Press.
- [Seim et al., 2014] Seim, C., Chandler, J., DesPortes, K., Dhingra, S., Park, M. e Starner, T. (2014). Passive haptic learning of braille typing. Em *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '14*, páginas 111–118, New York, NY, USA. ACM.

- [Shaer e Hornecker, 2009] Shaer, O. e Hornecker, E. (2009). Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 3(1-2):1–137.
- [Soares, 2004] Soares, M. (2004). Letramento e alfabetização: as muitas facetas. *Revista Brasileira de Educação*, 25(1):5–17.
- [Sobel et al., 2015] Sobel, K., O’Leary, K. e Kientz, J. a. (2015). Maximizing Children’s Opportunities with Inclusive Play: Considerations for Interactive Technology Design. *Proceedings of the 14th International Conference on Interaction Design and Children*, páginas 39–48.
- [Srivastava e Dawle, 2015] Srivastava, A. e Dawle, S. (2015). Mudra: A multimodal interface for braille teaching. Em *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference, AH ’15*, páginas 169–170, New York, NY, USA. ACM.
- [Stadelman, 1913] Stadelman, J. M. (1913). Education of the Blind. Em *Catholic Encyclopedia*. 5 edition.
- [Steinkuehler, 2008] Steinkuehler, C. A. (2008). Cognition and literacy in massively multiplayer online games. *Handbook of research on new literacies*, páginas 611–634.
- [Striem-Amit et al., 2012] Striem-Amit, E., Cohen, L., Dehaene, S. e Amedi, A. (2012). Reading with Sounds: Sensory Substitution Selectively Activates the Visual Word Form Area in the Blind. *Neuron*, 76(3):640–652.
- [Turk, 2014] Turk, M. (2014). Multimodal interaction: A review. *Pattern Recognition Letters*, 36:189–195.
- [W3C, 2008] W3C (2008). Synchronized Multimedia Integration Language (SMIL 3.0).
- [W3C, 2017] W3C (2017). WAI Guidelines and Techniques.
- [World Health Organization, 2014] World Health Organization (2014). Visual impairment and blindness. *Media centre Fact Sheets*, (282).
- [Xie et al., 2008] Xie, L., Antle, A. N. e Motamedi, N. (2008). Are tangibles more fun?: Comparing children’s enjoyment and engagement using physical, graphical and tangible user interfaces. Em *Proceedings of the 2Nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction, TEI ’08*, páginas 191–198, New York, NY, USA. ACM.
- [Zuckerman e Gal-Oz, 2013] Zuckerman, O. e Gal-Oz, A. (2013). To tui or not to tui: Evaluating performance and preference in tangible vs. graphical user interfaces. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(7):803 – 820.

Apêndice A

Termo de Consentimento

Nós, Patric Galera Forcelini e Prof^a. Dr^a. Laura Sánchez García, da Universidade Federal do Paraná, estamos convidando você, pessoa cega e alfabetizada no sistema Braille, a participar do estudo intitulado “Ambiente Interativo Tangível de Baixo Custo para Apoio ao Letramento Braille”.

1. O objetivo desta pesquisa é projetar uma tecnologia de baixo custo, tangível e extensível para o letramento de pessoas cegas.
2. Caso você participe da pesquisa será necessário avaliar um protótipo mínimo funcional da proposta completa em elaboração.
3. Para tanto, o avaliador comparecerá a sua instituição de ensino e conduzirá uma avaliação, pro meio de um roteiro de atividades, que levará aproximadamente 30 minutos.
4. É possível que você tenha alguma experiência desagradável ou confusa devido a erros de desenvolvimento do, considerando que trata-se de um protótipo inicial para fins de pesquisa.
5. Os pesquisadores responsáveis por este estudo podem ser encontrados no Departamento de Informática, localizado no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, ou no telefone (41)9XXXX-XXXX para esclarecer eventuais dúvidas que você possa ter e fornecer-lhe as informações desejadas antes, durante ou depois da realização do estudo.
6. A sua participação neste estudo é voluntária e se você não quiser mais fazer parte da pesquisa poderá desistir a qualquer momento e solicitar que lhe devolvam este Termo de Consentimento Livre e Esclarecido assinado.
7. O material obtido por registros da avaliação, seja em imagens, áudio, vídeo ou outras mídias, será utilizado unicamente para essa pesquisa e será destruído ao término do estudo.
8. Quando os resultados forem publicados, não aparecerá seu nome, e sim um código, preservando-se o anonimato.

Eu, NOME, li esse Termo de Consentimento e compreendi a natureza e objetivo do estudo do qual concordei em participar. Eu entendi que sou livre para interromper minha participação a qualquer momento sem justificar minha decisão e sem qualquer prejuízo para mim.

Eu concordo voluntariamente em participar deste estudo.

[Curitiba, DD de Agosto de 2017]

[Assinatura do Participante de Pesquisa ou Responsável Legal]

[Assinatura do Pesquisador Responsável ou quem aplicou o TCLE]

Apêndice B

Alfabeto em Braille

Braille	Letra	Conjunto de pontos	Conversão em Inteiro
⠁	a	{1}	$2^1 = 2$
⠃	b	{1, 2}	$2^1 + 2^2 = 6$
⠉	c	{1, 4}	$2^1 + 2^4 = 18$
⠋	d	{1, 4, 5}	$2^1 + 2^4 + 2^5 = 50$
⠑	e	{1, 5}	$2^1 + 2^5 = 34$
⠗	f	{1, 2, 4}	$2^1 + 2^2 + 2^4 = 22$
⠗	g	{1, 2, 4, 5}	$2^1 + 2^2 + 2^4 + 2^5 = 54$
⠗	h	{1, 2, 5}	$2^1 + 2^2 + 2^5 = 38$
⠗	i	{2, 4}	$2^2 + 2^4 = 20$
⠗	j	{2, 4, 5}	$2^2 + 2^4 + 2^5 = 52$
⠅	k	{1, 3}	$2^1 + 2^3 = 10$
⠇	l	{1, 2, 3}	$2^1 + 2^2 + 2^3 = 14$
⠇	m	{1, 3, 4}	$2^1 + 2^3 + 2^4 = 26$
⠇	n	{1, 3, 4, 5}	$2^1 + 2^3 + 2^4 + 2^5 = 58$
⠇	o	{1, 3, 5}	$2^1 + 2^3 + 2^5 = 42$
⠇	p	{1, 2, 3, 4}	$2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^4 = 30$
⠇	q	{1, 2, 3, 4, 5}	$2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^4 + 2^5 = 62$
⠇	r	{1, 2, 3, 5}	$2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^5 = 46$
⠇	s	{2, 3, 4}	$2^2 + 2^3 + 2^4 = 28$
⠇	t	{2, 3, 4, 5}	$2^2 + 2^3 + 2^4 + 2^5 = 60$

Braille	Letra	Conjunto de pontos	Conversão em Inteiro
⠠⠤	u	{1, 3, 6}	$2^1 + 2^3 + 2^6 = 74$
⠠⠥	v	{1, 2, 3, 6}	$2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^6 = 78$
⠠⠦	w	{2, 4, 5, 6}	$2^2 + 2^4 + 2^5 + 2^6 = 116$
⠠⠧	x	{1, 3, 4, 6}	$2^1 + 2^3 + 2^4 + 2^6 = 90$
⠠⠨	y	{1, 3, 4, 5, 6}	$2^1 + 2^3 + 2^4 + 2^5 + 2^6 = 122$
⠠⠩	z	{1, 3, 5, 6}	$2^1 + 2^3 + 2^5 + 2^6 = 106$