

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

VICTOR MARCELO RIVERETE MONTEIRO PADIAL

Teclado *Touch* Braille para auxílio na alfabetização e navegação digital de deficientes visuais sensíveis ao toque e/ou com limitações motoras

São Carlos
2025

VICTOR MARCELO RIVERETE MONTEIRO PADIAL

Teclado *Touch* Braille para auxílio na alfabetização e navegação digital de deficientes visuais sensíveis ao toque e/ou com limitações motoras

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista

Orientador: Prof. Dr. Pedro de Oliveira Conceição Junior

São Carlos
2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R123t Riverete Monteiro Padial, Victor Marcelo
Teclado Touch Braille para auxílio na
alfabetização e navegação digital de deficientes
visuais sensíveis ao toque e/ou com limitações motoras
/ Victor Marcelo Riverete Monteiro Padial; orientador
Pedro de Oliveira Conceição Junior. São Carlos, 2025.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2025.

1. Tecnologia Assistiva. 2. Braille. 3. Teclado
Braille. 4. Máquina Braille. 5. Sensibilidade ao Toque.
6. TEA. 7. Teclado Braille. 8. Deficientes visuais. I.
Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Victor Marcelo Riverete Monteiro Padial

Título: "Teclado Touch Braille para auxílio na alfabetização e navegação digital de deficientes visuais sensíveis ao toque e/ou com limitações motoras"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 07/11/2025,

com NOTA 10 (DEZ), pela Comissão
Julgadora:

Prof. Dr. Pedro de Oliveira Conceição Júnior - Orientador
SEL/EESC/USP

Profa. Dra. Vanessa Cristina Pereira da Silva Venuto -
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. José Marcos Alves - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

À sociedade paulista, cujo esforço coletivo mantém a Universidade de São Paulo como um bem público e um motor de transformação. Que este trabalho seja uma modesta retribuição pelo investimento em minha formação e um passo em direção a um futuro mais inclusivo.

AGRADECIMENTOS

Em especial às mulheres que me trouxeram até aqui: minha mãe, avó e tia, que sempre me apoiaram e incentivaram incondicionalmente a buscar meus sonhos. Agradeço também ao meu pai, tio, irmãos, primas e demais familiares que também fazem parte dessa jornada. Agradeço aos meus amigos que foram os quais mais convivi durante este período, que me ajudaram a manter o equilíbrio entre a vida acadêmica e pessoal que poucos conseguem. Ainda, agradeço aos professores e funcionários da EESC-USP que me proporcionaram uma formação de excelência e o conhecimento diverso necessário para a realização deste trabalho. Por fim, agradeço imensamente ao grupo Topus Projetos Aeroespaciais por disponibilizar equipamentos para a manufatura dos protótipos e ao Instituto Pequeno Príncipe, em especial aos professores Sandra e Vitor, por contribuírem desde a identificação da solução até sua validação.

“A vida que vale a pena ser vivida é uma vida em que a gente se empenha, de corpo e alma, na construção de uma obra pela qual a gente tenha um profundo amor.”

Clóvis de Barros Filho

RESUMO

PADIAL, V. M. R. M. **Teclado Touch Braille para auxílio na alfabetização e navegação digital de deficientes visuais sensíveis ao toque e/ou com limitações motoras.** 2025. 65 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

O acesso à alfabetização é um pilar para a inclusão social e autonomia de pessoas com deficiência visual. O Sistema Braille, como principal ferramenta de escrita e leitura tátil, enfrenta desafios em sua aprendizagem, especialmente para indivíduos com limitações motoras ou hipersensibilidade ao toque (TEA), para os quais os dispositivos mecânicos tradicionais podem ser uma barreira. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma solução de tecnologia assistiva de baixo custo: uma Máquina Braille Touch. O projeto consiste em um dispositivo físico com uma interface de toque capacitivo que permite a escrita em Braille sem a necessidade de pressão mecânica. A metodologia de desenvolvimento foi iterativa, culminando em um protótipo robusto baseado no microcontrolador ESP32S3 com comunicação USB HID, garantindo funcionalidade Plug & Play. Desafios como a leitura de múltiplos toques simultâneos foram superados com a implementação do sistema operacional de tempo real FreeRTOS no firmware. O protótipo foi validado em colaboração com o Instituto Pequeno Príncipe de São Carlos, através de testes com professores e alunos com deficiência visual. Os resultados demonstram a funcionalidade do dispositivo, com ajustes mensuráveis de usabilidade, como o ajuste do tempo de leitura dos pontos a partir do feedback de um professor cego. A validação também revelou a necessidade de pistas táteis para a orientação espacial dos usuários e que a interface, embora sem pressão, ainda representa um desafio sensorial para a aluna com hipersensibilidade, fornecendo dados cruciais para futuras evoluções do projeto.

Palavras-chave: Tecnologia Assistiva; Sistema Braille; Deficiência Motora; Máquina Braille; Sensibilidade ao Toque; TEA (Transtorno do Espectro Autista).

ABSTRACT

PADIAL, V. M. R. M. Braille Touch Keyboard to aid in the literacy and digital navigation of visually impaired individuals with touch sensitivity and/or motor limitations. 2025. 65 p. Final Project (Trabalho de Conclusão de Curso) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2025.

Access to literacy is a cornerstone for social inclusion and autonomy for people with visual impairments. The Braille System, as the main tool for tactile reading and writing, faces learning challenges, especially for individuals with motor limitations or touch hypersensitivity (ASD), for whom traditional mechanical devices can be a barrier. This work presents the development of a low-cost assistive technology solution: a Braille Touch Machine. The project consists of a physical device with a capacitive touch interface that allows for Braille writing without the need for mechanical pressure. The development methodology was iterative, culminating in a robust prototype based on the ESP32S3 microcontroller with USB HID communication, ensuring Plug & Play functionality. Challenges such as reading multiple simultaneous touches were overcome by implementing the FreeRTOS real-time operating system in the firmware. The prototype was validated in collaboration with the "Instituto Pequeno Príncipe de São Carlos" through tests with visually impaired teachers and students. The results demonstrate the device's functionality, with measurable usability adjustments, such as reducing the dot reading time based on feedback from a blind teacher. The validation also revealed the need for tactile cues for users' spatial orientation and that the interface, although pressureless, still poses a sensory challenge for the student with hypersensitivity, providing crucial data for future project evolutions.

Keywords: Assistive Technology; Braille System; Motor Impairment; Braillewriter; Touch Sensitivity; ASD (Autism Spectrum Disorder)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Alfabeto Braille de 6 pontos	25
Figura 2 – Dimensões utilizadas para a escrita do relevo Braille	26
Figura 3 – Reglete e Puncão	26
Figura 4 – Layout de uma Máquina Braille tradicional	27
Figura 5 – Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)	32
Figura 6 – Processo de Estereolitografia (SLA)	33
Figura 7 – Diagrama da Arquitetura Geral do Sistema	39
Figura 8 – Diagrama da Arquitetura do Primeiro Protótipo	40
Figura 9 – Distribuição de pinos do microcontrolador ESP32	41
Figura 10 – Sensor de toque capacitivo TTP223B	41
Figura 11 – Diagrama da Arquitetura do Segundo Protótipo	42
Figura 12 – Distribuição de pinos do microcontrolador ESP32S3	43
Figura 13 – Placa de Circuito Impresso do Segundo Protótipo	43
Figura 14 – Case do Segundo Protótipo	44
Figura 15 – Placa de Circuito Impresso do Terceiro Protótipo	46
Figura 16 – Case do Terceiro Protótipo	46
Figura 17 – Primeiro Protótipo Montado	49
Figura 18 – Segundo Protótipo Montado	50
Figura 19 – Entrega do Segundo Protótipo ao Instituto Pequeno Príncipe	51
Figura 20 – Primeiro contato da aluna com cegueira total sensível ao toque com o dispositivo	52
Figura 21 – Terceiro Protótipo Montado	53
Figura 22 – Teclado Braille Comercial Brailliant BI 20x	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Detalhamento de custos do Protótipo 1.	47
Tabela 2 – Detalhamento de custos do Protótipo 2.	48
Tabela 3 – Detalhamento de custos do Protótipo 3.	48
Tabela 4 – Resumo dos custos por protótipo.	48
Tabela 5 – Ambiente Verificado nos Testes	54
Tabela 6 – Cobertura dos caracteres Braille pelo projeto	55
Tabela 7 – Quadro comparativo das soluções de hardware e software para escrita Braille.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FDM	Fused Deposition Modeling
HID	Human Interface Device
IDE	Integrated Development Environment
LASEL	Laboratório Aberto para a Inovação e o Empreendedorismo
MVP	Minimum Viable Product
PCI	Placa de Circuito Impresso
PLA	Polylactic Acid (Ácido Polilático)
RTOS	Real-Time Operating System
SLA	Stereolithography (Estereolitografia)
TEA	Transtorno do Espectro Autista
TTS	Text to Speech
USB	Universal Serial Bus
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	O Sistema Braille	25
2.2	O Público-Alvo	28
2.2.1	Desafios da Inclusão para Pessoas Cegas no Brasil	28
2.2.2	Usuários com Barreiras Adicionais	29
2.2.3	Tecnologia Assistiva como Ferramenta de Apoio à Alfabetização em Braille	29
2.3	Eletrônica Embarcada e <i>Firmware</i>	30
2.3.1	Microcontroladores	31
2.3.2	Detecção de Toque Capacitivo	31
2.3.3	Comunicação USB HID (Human Interface Device)	31
2.3.4	Sistema Operacional de Tempo Real (FreeRTOS)	31
2.4	Invólucro do dispositivo	32
2.4.1	Impressão 3D em PLA (Ácido Polilático)	32
2.4.2	Impressão 3D em Resina (SLA/DLP)	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Metodologia de Desenvolvimento de Projeto	35
3.1.1	Objetivo Geral	35
3.1.2	Objetivos específicos	37
3.1.3	Validação e Testes com Usuários	38
3.1.3.1	Ambiente e Critérios de Seleção dos Participantes	38
3.1.3.2	Procedimentos de Coleta de Dados	38
3.1.3.3	Análise e Utilização dos Dados	38
3.2	Arquitetura geral do sistema	39
3.3	Primeiro Protótipo	40
3.3.1	Arquitetura do Primeiro Protótipo	40
3.3.2	Construção e Hardware	40
3.3.3	Firmware e desafios	41
3.4	Segundo Protótipo	42
3.4.1	Arquitetura do Segundo Protótipo	42
3.4.2	Construção e Hardware	42
3.4.3	Firmware, Software e Desafios	44
3.5	Terceiro Protótipo	44
3.5.1	Refinamento do Firmware	45
3.5.2	Restruturação de Case e PCI	45

3.6	Custo dos Protótipos	47
4	RESULTADOS	49
4.1	Resultados do Primeiro Protótipo	49
4.2	Resultados do Segundo Protótipo	50
4.2.1	Desempenho Técnico e Funcionalidades	50
4.2.2	Resultados da Validação com Usuários	51
4.2.2.1	Ajustes durante entrega do protótipo	51
4.2.2.2	Barreiras e Desafios Observados	52
4.3	Resultados do Protótipo Final	53
4.3.1	Aprimoramentos Técnicos e Funcionais	53
4.4	A solução no Contexto das Tecnologias Assistivas	56
4.4.1	Comparação com Soluções Tradicionais	56
4.4.2	Comparação com Produtos Comerciais	56
4.4.3	Comparação com Aplicativos de Software	57
4.4.4	Comparação com Trabalhos Acadêmicos de Baixo Custo	57
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A – REPOSITÓRIO DE CÓDIGOS	67

1 INTRODUÇÃO

A inclusão de um indivíduo em seu meio social passa, fundamentalmente, pela educação e pelo acesso pleno à informação. Em uma sociedade letrada, onde o conhecimento é predominantemente transmitido por meio da escrita, a alfabetização torna-se indispensável para o desenvolvimento do pensamento crítico, da autonomia pessoal e do exercício da cidadania. No Brasil, onde mais de 6,5 milhões de pessoas declaram ter algum grau de deficiência visual (DV), sendo 528.624 cegas e mais de 6 milhões com baixa visão(CAMPOS, 2023), garantir o acesso a essa cultura escrita é um desafio e um imperativo social. Embora a legislação brasileira, como a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência), assegure o direito à inclusão e à igualdade, barreiras significativas ainda persistem, especialmente no campo educacional(DIÁRIO PCD, 2023).

Para as pessoas com deficiência visual, o Sistema Braille, um código tátil de seis pontos em relevo, representa a ferramenta mais completa e fundamental para a alfabetização e o acesso à cultura escrita(FUNDAÇÃO FEAC, 2023). A proficiência em Braille está diretamente ligada a maiores taxas de emprego, níveis mais altos de escolaridade e independência financeira(GOMES, 2022). Diferentemente das tecnologias baseadas em áudio, o Braille permite o contato direto com a estrutura dos textos, a ortografia das palavras e a pontuação, elementos cruciais para uma alfabetização completa(VIGINHESKI *et al.*, 2014).

Contudo, apesar de sua inegável importância, a alfabetização em Braille enfrenta uma crise, com seu uso em declínio(GUERREIRO *et al.*, 2013). Esse fenômeno é parcialmente atribuído à crescente popularidade de tecnologias assistivas baseadas em áudio, como leitores de tela e audiolivros, que são frequentemente percebidos como mais práticos. No entanto, estudos científicos demonstram que a leitura tátil em Braille promove um nível de compreensão superior ao da audição passiva, especialmente em textos complexos, pois exige maior engajamento físico e esforço cognitivo(DUTTON, 2021). Além disso, o próprio processo de aprendizagem do Braille apresenta barreiras significativas: é um treinamento extenso e sistemático, que exige tempo, exercícios repetitivos e um apurado desenvolvimento da discriminação tátil e da coordenação motora fina(FAÇANHA *et al.*, 2012). Para muitos, especialmente crianças, o processo pode ser lento, cansativo e desmotivador.

Essas dificuldades são ainda mais acentuadas para um público específico: pessoas com deficiência visual que também possuem limitações neuromotoras ou hipersensibilidade ao toque, como alguns indivíduos no espectro autista. Para eles, o uso de ferramentas tradicionais como a reglete e o punção, que exigem força e destreza manual, ou mesmo de telas touch screen genéricas, que demandam gestos complexos, pode ser um obstáculo intransponível(OLIVEIRA *et al.*, 2011). É nesta lacuna que o presente Trabalho de Conclusão de Curso se insere.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma solução tecnológica de baixo custo para auxiliar no processo de alfabetização e navegação digital: uma Máquina Braille Touch. O projeto visa criar um dispositivo físico com uma interface sensível ao toque que não exige pressão mecânica para o registro dos caracteres Braille, tornando-se uma ferramenta de escrita acessível e inclusiva. O objetivo é atender não apenas ao público geral de deficientes visuais, mas, sobretudo, àqueles com hipersensibilidade e limitações motoras, oferecendo um recurso que seja ao mesmo tempo funcional, motivador e que promova a autonomia no acesso à cultura escrita.

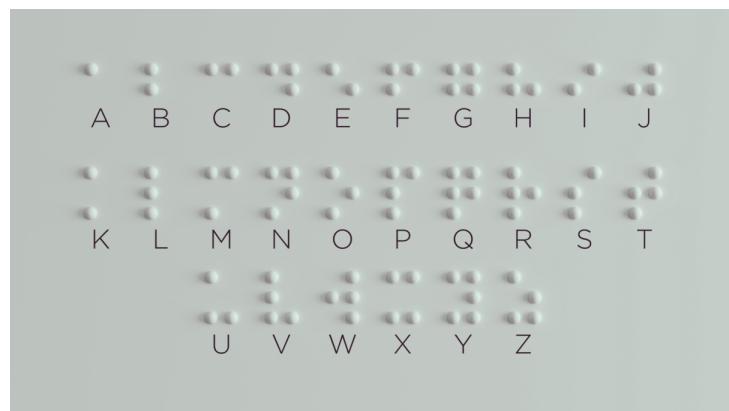
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos essenciais que fundamentam o desenvolvimento do projeto. Serão abordados os aspectos históricos e técnicos do Sistema Braille, os componentes eletrônicos e as tecnologias de fabricação digital empregadas na construção dos protótipos, e as características do público-alvo que guiaram as decisões de design do dispositivo.

2.1 O Sistema Braille

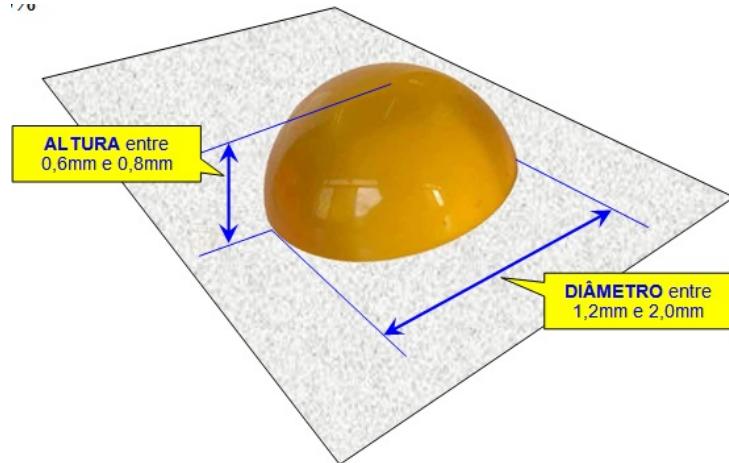
O sistema Braille, idealizado na França em 1825 por Louis Braille, é um código de escrita e leitura tátil utilizado universalmente por pessoas cegas. Este sistema revolucionou a comunicação e o acesso ao conhecimento para esse público, representando um marco para a sua educação e integração social. Sua estrutura baseia-se na "cela Braille", uma matriz de seis pontos em relevo dispostos em duas colunas de três, que permite 63 combinações distintas. Essas combinações são suficientes para representar letras, números, sinais de pontuação e simbologias complexas de áreas como a matemática e a música(VIGINHESKI *et al.*, 2014). O design da cela foi pensado para se adaptar perfeitamente à polpa do dedo, permitindo que os caracteres sejam identificados com rapidez e precisão pelo tato. Toda a padronização para o uso no Brasil está formalizada na "Grafia Braille para a Língua Portuguesa", publicada pelo Ministério da Educação(MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2018).

Figura 1 – Alfabeto Braille de 6 pontos



Fonte: (Lighthouse for the Blind and Visually Impaired, 2025)

Figura 2 – Dimensões utilizadas para a escrita do relevo Braille

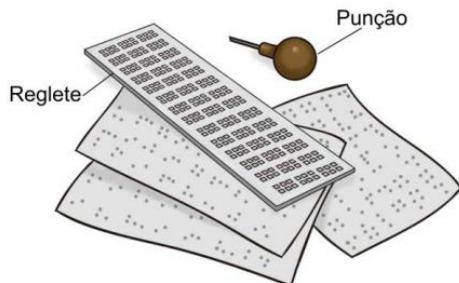


Fonte: (Ebanataw, 2025)

A leitura em Braille é um processo inherentemente tátil e sequencial. O leitor utiliza a polpa do dedo indicador para percorrer as linhas de caracteres em relevo, geralmente da esquerda para a direita. Por depender do reconhecimento de um caractere por vez, a leitura tátil é mais lenta que a leitura visual(CAPASCIUTTI, 2022). A escrita, por sua vez, pode ser realizada de duas formas principais:

- **Com reglete e punção:** Método manual em que o usuário perfura o papel da direita para a esquerda, de forma espelhada, para que o relevo fique correto no lado oposto da folha.

Figura 3 – Reglete e Punção



Fonte: (CARIZIO *et al.*, 2015)

- **Com a máquina Perkins:** Uma máquina de escrever mecânica com seis teclas correspondentes aos seis pontos da cela, que permite uma escrita mais rápida e direta.

Figura 4 – Layout de uma Máquina Braille tradicional



Fonte: (Shopping do Braille, 2025)

Apesar do avanço de tecnologias assistivas baseadas em áudio, como os leitores de tela com sintetizadores de voz, o sistema Braille continua a ser a ferramenta mais eficaz para a alfabetização plena de pessoas cegas. Estudos e especialistas apontam que, enquanto o áudio é eficiente para o consumo rápido de informação, ele não substitui a leitura tátil no que tange ao desenvolvimento do letramento(PARIDA; SINHA; BASU, 2024). A leitura em Braille é o que permite ao indivíduo cego ter contato direto com a estrutura do texto, a ortografia correta das palavras, a sintaxe e a pontuação, elementos que a escuta passiva não revela. Esse contato aprofundado com a língua escrita é um instrumento poderoso para a elaboração do pensamento e o controle consciente sobre as operações mentais(DUTTON, 2021). Por essa razão, a proficiência em Braille é consistentemente apontada como o mais forte preditor de sucesso acadêmico e de maiores taxas de empregabilidade na vida adulta para pessoas com deficiência visual(GUERREIRO *et al.*, 2013).

Contudo, nas últimas décadas, tem-se observado um declínio acentuado na alfabetização em Braille. As principais causas para esse fenômeno são a popularização dos leitores de tela e dos livros falados, que oferecem uma alternativa mais cômoda e imediata para o acesso a textos eletrônicos. Além disso, o próprio processo de aprendizagem do Braille apresenta desafios significativos: é um processo longo, que exige motivação e um desenvolvimento apurado da percepção tátil e da coordenação motora fina. O ensino tradicional, muitas vezes baseado em instrumentos como a reglete e o punção, demanda um esforço físico considerável e uma escrita espelhada (da direita para a esquerda) que pode ser complexa para o aprendiz iniciante. Some-se a isso o alto custo dos equipamentos de escrita e impressão, como a máquina Perkins e as impressoras Braille, que dificultam a prática fora do ambiente escolar.

A discussão, portanto, não reside em uma substituição do Braille pelo áudio, mas

na complementaridade de ambos os meios. Pesquisas indicam que, embora muitos usuários prefiram a conveniência do áudio, a leitura em Braille melhora a compreensão e a retenção da informação, devido ao maior engajamento físico e cognitivo que exige(BORGES, 2009). Nesse cenário, o futuro do Braille não está em seu abandono, mas em sua reinvenção e integração com as tecnologias digitais. A criação de dispositivos de baixo custo, que tornem a prática da escrita e leitura mais acessível, interativa e motivadora, é fundamental (DUTTON, 2021) para garantir que este sistema, essencial para a autonomia, competência e igualdade, continue a ser um pilar na formação das pessoas cegas na era digital.

2.2 O PÚBLICO-ALVO

O desenvolvimento de qualquer tecnologia assistiva eficaz deve partir de uma compreensão profunda das necessidades, desafios e do contexto de seu público. O Teclado Touch Braille foi concebido com um foco primário em um segmento de pessoas com deficiência visual frequentemente negligenciado por soluções tecnológicas tradicionais, ao mesmo tempo em que busca atender às dificuldades gerais encontradas no processo de alfabetização em Braille.

2.2.1 Desafios da Inclusão para Pessoas Cegas no Brasil

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil possui mais de 6 milhões de pessoas com algum grau de deficiência visual(CAMPOS, 2023). Essa parcela expressiva da população encontra obstáculos estruturais que limitam sua participação plena na sociedade(GOMES, 2022). Estatísticas demonstram que pessoas com deficiência têm menor acesso à educação, ao trabalho e à renda, um ciclo de exclusão que a tecnologia busca mitigar. No âmbito educacional e digital, o principal desafio para a inclusão de pessoas cegas é a predominância de interfaces e materiais visuais. A transição para plataformas digitais e o advento das telas sensíveis ao toque (touch screen) intensificaram esse problema(OLIVEIRA *et al.*, 2011)(ROMERO *et al.*, 2011). A ausência de feedback tátil e de pontos de referência físicos torna a navegação e a escrita em *smartphones* e *tablets* tarefas extremamente difíceis para quem não enxerga(SÎRBU; ŢERBAN; ROŞCA, 2019). As soluções tecnológicas existentes, embora eficazes, dividem-se em duas categorias problemáticas. De um lado, os leitores de tela, que convertem texto em áudio, são ferramentas essenciais, mas insuficientes para uma alfabetização completa, pois não fornecem contato com a ortografia e a estrutura textual como o Braille faz(GUERREIRO *et al.*, 2013). Do outro lado, os dispositivos de hardware dedicados, como teclados e linhas Braille, que permitem a interação tátil com o mundo digital, possuem um custo proibitivo para a realidade brasileira. Um *refreshable Braille display*, por exemplo, pode custar o equivalente a milhares de euros , e outros teclados eletrônicos

portáteis podem variar de 400 a 6000 dólares. Essa barreira financeira limita drasticamente a autonomia e a independência dos usuários cegos no ambiente digital(ROMERO *et al.*, 2011).

2.2.2 Usuários com Barreiras Adicionais

O projeto direciona-se, primordialmente, a indivíduos para os quais a interação tátil convencional representa um obstáculo significativo. Este grupo inclui:

- **Pessoas com Hipersensibilidade ao Toque:** Para alguns indivíduos, especialmente aqueles no Transtorno do Espectro Autista (TEA), o estímulo tátil de pressionar teclas mecânicas ou mesmo a textura de certas superfícies pode ser desconfortável ou aversivo. A necessidade de aplicar força para utilizar uma máquina Perkins ou a reglete pode representar uma barreira sensorial que dificulta ou impede a aprendizagem. Uma interface que responde a um simples e leve contato, sem exigir pressão, remove este obstáculo, tornando a experiência de escrita mais acessível e agradável.
- **Pessoas com Limitações Motoras:** A escrita em Braille com ferramentas tradicionais, como a máquina Perkins ou o conjunto de reglete e punção, exige destreza e força nos dedos para a correta marcação dos pontos(CAPASCIUTTI, 2022). Pessoas com dificuldades neuromotoras podem não possuir a coordenação fina ou a força necessária para utilizar esses instrumentos de forma eficaz. Uma interface capacitiva, que depende apenas da posição dos dedos e não da força aplicada, oferece uma alternativa viável para a escrita(FAÇANHA *et al.*, 2012).

Diante desses desafios, a utilização de tecnologias interativas que fornecem feedback imediato e tornem a prática mais engajadora é fundamental para estimular os estudos e favorecer a inclusão de alunos com deficiência visual(HOSKIN *et al.*, 2022). O Teclado Touch Braille busca, portanto, ser não apenas uma ferramenta de escrita, mas também um recurso pedagógico que torna a interação com o Sistema Braille mais motivadora e acessível para todos.

2.2.3 Tecnologia Assistiva como Ferramenta de Apoio à Alfabetização em Braille

A alfabetização por meio do Sistema Braille, apesar de ser fundamental para a inclusão e o desenvolvimento intelectual da pessoa com deficiência visual, é um processo com desafios intrínsecos que podem dificultar a aprendizagem e levar à desmotivação(CAPASCIUTTI, 2022). O aprendizado exige um treinamento extenso e sistemático para que o aluno alcance a capacidade de discriminação tátil dos caracteres, um processo

que se mostra lento, cansativo e que demanda apoio constante dos professores(CARIZIO *et al.*, 2015).

Estudos na área pedagógica (DUTTON, 2021) destacam que o aluno cego está, em geral, menos exposto à linguagem escrita antes de sua entrada na escola, e seu contato com o código Braille muitas vezes se restringe ao ambiente escolar. Somam-se a isso as dificuldades motoras para a leitura e a confusão na percepção de caracteres que são muito semelhantes, características inerentes ao próprio Sistema Braille. Essa complexidade pode levar o aluno a cometer mais erros e a necessitar de mais tempo para aprender a ler, quando comparado a um aluno vidente.

Neste cenário, a Tecnologia Assistiva (TA) surge como uma área do conhecimento que visa desenvolver recursos, produtos e metodologias para promover a autonomia, a qualidade de vida e a inclusão social de pessoas com deficiência(CARIZIO *et al.*, 2015). No contexto educacional, a TA oferece ferramentas que podem superar barreiras de aprendizagem, atuando como facilitadores que estimulam os estudos e favorecem a inclusão. Uma revisão sistemática sobre a eficácia da tecnologia na alfabetização em Braille (HOSKIN *et al.*, 2022) concluiu que os recursos mais efetivos são aqueles que fornecem feedback auditivo e tátil em tempo real, permitem a prática independente e são, acima de tudo, motivacionais e engajadores.

É exatamente nesta interseção que o projeto do Teclado Touch Braille se fundamenta. A proposta de um dispositivo de baixo custo, que oferece uma interface de escrita tátil-capacitiva e feedback sonoro imediato, atende diretamente às necessidades identificadas. Ao eliminar a barreira da pressão mecânica, ele se torna acessível a usuários com limitações motoras e sensoriais. Ao mesmo tempo, funciona como uma ferramenta pedagógica interativa, que permite a prática repetitiva de forma mais estimulante do que os métodos tradicionais. O objetivo não é substituir o professor ou os métodos consagrados, mas sim oferecer um recurso complementar que torna o processo de memorização e de escrita em Braille mais autônomo e motivador, contribuindo para diminuir a evasão e fortalecer a apropriação desta linguagem fundamental.

2.3 Eletrônica Embarcada e *Firmware*

A viabilidade de um dispositivo assistivo de baixo custo e alta funcionalidade está diretamente ligada às escolhas de seus componentes eletrônicos e à eficiência de seu software embarcado (*firmware*). Para o desenvolvimento de um teclado tátil, tecnologias específicas foram selecionadas por suas características de custo, desempenho e capacidade de integração.

2.3.1 Microcontroladores

O "cérebro" de um dispositivo embarcado moderno é o microcontrolador, um pequeno computador em um único chip que contém processador, memória e periféricos de entrada/saída. A família de microcontroladores ESP32, por exemplo, é amplamente utilizada em projetos de prototipagem por oferecer um excelente balanço entre baixo custo, alto poder de processamento e conectividade integrada (como Wi-Fi e Bluetooth), além de contar com um forte suporte da comunidade de desenvolvedores.

2.3.2 Detecção de Toque Capacitivo

A tecnologia de toque capacitivo é a base para a maioria das telas sensíveis ao toque e botões táteis modernos. Ela funciona detectando a alteração no campo elétrico (capacitância) causada pela proximidade de um condutor, como o dedo humano. Em projetos de hardware, isso pode ser implementado por meio de sensores externos dedicados ou utilizando microcontroladores como o ESP32 que já possuem pinos com essa funcionalidade integrada, o que simplifica o design do circuito e reduz o custo final do dispositivo.

2.3.3 Comunicação USB HID (Human Interface Device)

Para que um periférico customizado, como um teclado, seja universalmente compatível com computadores, ele deve se comunicar através de um protocolo padrão. O USB HID é o protocolo utilizado por teclados, mouses e joysticks comerciais. Um microcontrolador com suporte nativo a USB HID pode ser programado para se identificar a um sistema operacional (como o Windows) como um teclado padrão. Isso permite uma funcionalidade Plug & Play, eliminando a necessidade de drivers ou softwares de instalação e garantindo uma experiência de uso imediata e sem complicações.

2.3.4 Sistema Operacional de Tempo Real (FreeRTOS)

Em sistemas embarcados que precisam gerenciar múltiplas tarefas concorrentes com alta confiabilidade — como ler vários sensores simultaneamente e se comunicar via USB —, um Sistema Operacional de Tempo Real (RTOS) é frequentemente utilizado. O FreeRTOS, por exemplo, permite que o firmware seja estruturado em tarefas independentes com prioridades definidas. Essa arquitetura garante que operações críticas (como a leitura de um toque) não sejam interrompidas ou atrasadas por outras, resultando em um sistema mais estável, responsivo e previsível, o que é crucial para uma experiência de escrita fluida.

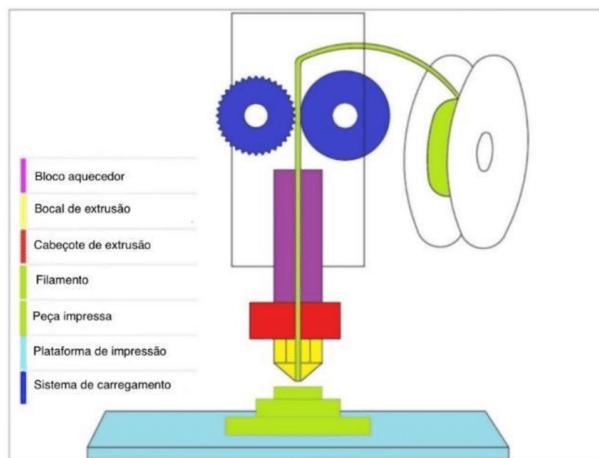
2.4 Invólucro do dispositivo

A materialização de um protótipo funcional e ergonômico é tão crucial quanto a eletrônica embarcada. O invólucro do dispositivo, ou case, não apenas protege os componentes internos, mas também define a interface física entre o usuário e a tecnologia. No contexto da prototipagem rápida e de baixo custo, a fabricação digital, especialmente a impressão 3D, oferece flexibilidade e a capacidade de criar geometrias complexas e customizadas.

2.4.1 Impressão 3D em PLA (Ácido Polilático)

Esta é a tecnologia de impressão 3D mais comum e acessível. Ela funciona depositando um filamento termoplástico derretido, como o PLA (Ácido Polilático), camada por camada, até construir o objeto. O PLA é um material popular por sua facilidade de uso e por ser biodegradável. Embora seja excelente para a prototipagem rápida de formas gerais e caixas estruturais, a tecnologia FDM(Modelagem por Fusão e Deposição) possui limitações na resolução de detalhes finos e geralmente resulta em uma superfície com as linhas das camadas visíveis, o que pode não ser ideal para interfaces que exigem um acabamento tátil muito suave.

Figura 5 – Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)



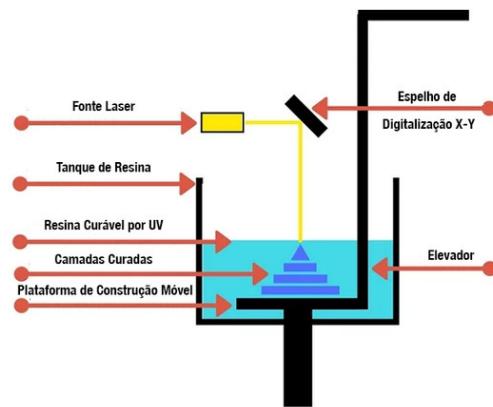
Fonte: (Kunkel, Maria Elizete et al., 2020)

2.4.2 Impressão 3D em Resina (SLA/DLP)

A tecnologia de estereolitografia(SLA) utiliza uma fonte de luz, como um laser UV, para curar (solidificar) uma resina líquida fotossensível, também camada por camada. Este método é conhecido por sua capacidade de produzir peças com altíssima resolução e precisão. Para dispositivos tátteis, a impressão em resina oferece vantagens significativas,

como a criação de superfícies extremamente lisas e a possibilidade de fabricar pequenos detalhes com grande definição, como o relevo de caracteres Braille. O resultado é um acabamento de qualidade superior, que proporciona uma experiência tátil mais confortável e receptiva, fator crucial para a ergonomia de um dispositivo assistivo.

Figura 6 – Processo de Estereolitografia (SLA)



Fonte: (Engiprinters, 2025)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve em detalhes o processo de desenvolvimento e construção do Teclado Touch Braille, desde a arquitetura do sistema até a fabricação e métodos de validação dos protótipos pelos usuários. A metodologia de prototipagem iterativa, descrita anteriormente, é aqui detalhada através da apresentação da evolução do projeto, das tecnologias empregadas e dos desafios técnicos superados.

3.1 Metodologia de Desenvolvimento de Projeto

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste projeto foi a de pesquisa e desenvolvimento com prototipagem iterativa, centrada nas necessidades do usuário final. A abordagem foi dividida em fases sequenciais e interdependentes, permitindo que os aprendizados de uma etapa informassem e guiassem a construção da seguinte. Esta metodologia pragmática foi essencial para traduzir os requisitos teóricos e as necessidades humanas em uma solução tecnológica funcional e validada.

3.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma solução tecnológica de inclusão digital de baixo custo, materializada em um dispositivo de hardware denominado "Teclado Touch Braille". O propósito central do dispositivo é auxiliar no processo de alfabetização e na navegação digital de pessoas com deficiência visual, com foco especial em indivíduos que enfrentam barreiras com tecnologias assistivas convencionais, como pessoas com hiper-sensibilidade ao toque e/ou limitações motoras. Para isso, busca-se criar um equipamento físico funcional, com uma interface sensível ao toque que simula uma máquina Braille adaptada, permitindo a escrita e a leitura em ambiente computacional sem a necessidade de pressão mecânica.

- **Fase 1: Levantamento de Requisitos e Revisão Bibliográfica:** A primeira etapa consistiu em uma imersão no universo da deficiência visual, com foco na identificação das barreiras enfrentadas no processo de alfabetização e inclusão digital. Foi conduzida uma revisão da literatura sobre o Sistema Braille, o impacto de tecnologias assistivas e as soluções existentes, como leitores de tela. Adicionalmente, foram realizados contatos com instituições de referência, como o Instituto Benjamin Constant, e com educadores da rede de ensino para embasar o projeto com dados reais e definir os requisitos fundamentais da solução: ser compatível com o sistema operacional Windows, independente de conexão com a internet, de baixo custo e,

crucialmente, que a identificação dos caracteres Braille ocorresse apenas com o toque, sem a necessidade de pressionamento mecânico.

- **Fase 2: Especificação e Escolhas de Projeto:** Com base nos requisitos levantados, a segunda fase foi dedicada à especificação técnica do projeto. Nesta etapa, foram selecionados os componentes de hardware para o primeiro protótipo, como o microcontrolador ESP32 WROOM Devkit V1 e os sensores capacitivos TTP223B, escolhidos pela documentação acessível e baixo custo. A arquitetura inicial do software também foi definida, com a decisão de focar em um dispositivo que funcionasse de forma nativa com o computador, atuando como um teclado HID (Human Interface Device), tornando o software de áudio (Text-to-Speech) um recurso opcional e complementar.
- **Fase 3: Implementação, Testes e Coleta de Feedback:** Esta fase correspondeu ao desenvolvimento prático e cíclico dos protótipos. O primeiro protótipo foi construído para validar o conceito, testando a integração entre sensores e microcontrolador e superando desafios como falhas na leitura de toques simultâneos. Com a prova de conceito validada, um segundo protótipo, mais robusto e universal, foi desenvolvido utilizando o microcontrolador ESP32S3, que possui pinos de toque capacitivo nativos e suporte USB HID. Esta fase foi marcada pela resolução de problemas complexos de hardware e software, pela confecção de uma placa de circuito impresso (PCI) e de um case em impressão 3D. O ponto culminante desta etapa foi a entrega do segundo protótipo ao Instituto Pequeno Príncipe de São Carlos, onde foi testado por professores e alunos com deficiência visual. O feedback qualitativo coletado neste ambiente real de uso foi fundamental para validar a proposta e levantar os requisitos para a próxima iteração do projeto.
- **Fase 4: Adequação de projeto:** Foram avaliados os feedbacks colhidos durante a utilização do segundo protótipo pelos alunos e tutores do Instituto Pequeno Príncipe durante a Fase 3 e então traduzidos em novos requisitos de projeto. Iniciou-se então o desenvolvimento o projeto de um terceiro protótipo a fim de se obter um Teclado Braille Touch mais próximo nas expectativas do usuário. Constatou-se uma boa responsividade na escrita Braille, mas uma curva de aprendizado relativamente alta para os alunos que nunca tiveram contato prévio com os teclados da Linha Braille. Assim, o projeto do novo protótipo focou em melhorar a ergonomia e a usabilidade do dispositivo, com um layout mais intuitivo e confortável. Foi projetado então um Case 3D mais macio e convidativo feito em resina de tecnologia SLA e com pontos Braille em sua superfície para facilitar a localização dos pontos. Além disso, foi investigado a utilização do recente HID Braille para a integração entre dispositivo e Windows.

- **Fase 5: Construção do Protótipo Final:** O terceiro protótipo foi então construído para ser entregue novamente ao Instituto Pequeno Príncipe para utilização em sala de aula. Novos feedbacks qualitativos e quantitativos sobre a experiência de uso, a ergonomia, a responsividade e a curva de aprendizado do dispositivo podem ser utilizadas para a continuação do projeto se necessário. Buscou-se um decréscimo na curva de aprendizado e uma maior aceitação do dispositivo pelos alunos, visando maior conforto e motivação a utilizar o teclado. O terceiro protótipo visa então as características de um MVP, com um design mais polido e uma funcionalidade mais alinhada às necessidades do público-alvo.

3.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, este trabalho estabeleceu os seguintes objetivos específicos, que guiaram o desenvolvimento e a avaliação do protótipo do Teclado Touch Braille:

- Desenvolver uma interface de escrita tátil-capacitiva: Projetar e implementar um sistema de entrada baseado em sensores de toque que identifique a combinação de pontos do Braille sem a necessidade de pressão mecânica, visando atender usuários com limitações motoras e hipersensibilidade tátil.
- Garantir compatibilidade e usabilidade universal: Integrar facilmente o dispositivo com computadores com sistema operacional Windows como um dispositivo Plug & Play, com a mínima necessidade de instalação de drivers ou softwares adicionais.
- Construir um protótipo funcional de baixo custo: Projetar uma placa de circuito impresso (PCI) customizada e um case fabricado por meio de impressão 3D, utilizando componentes eletrônicos de fácil acesso e baixo custo para garantir que a solução seja economicamente viável e replicável.
- Implementar o vocabulário Braille essencial para a alfabetização e navegação: Desenvolver o firmware do microcontrolador para interpretar corretamente todas as letras do alfabeto (A-Z), números (0-9) e os principais comandos de navegação de um teclado convencional (setas direcionais, Enter, Delete e Space), fundamentais para a escrita e interação digital.
- Validar o protótipo com o público-alvo: Submeter o dispositivo a testes de usabilidade com professores e alunos com deficiência visual em um ambiente de ensino especializado, a fim de coletar feedback prático sobre a funcionalidade, ergonomia e experiência de uso, utilizando essas informações para refinar o projeto e direcionar os desenvolvimentos futuros.

3.1.3 Validação e Testes com Usuários

Para garantir que o desenvolvimento dos protótipos estivesse alinhado com as necessidades reais do público-alvo, foi adotada uma metodologia de validação qualitativa, baseada em um estudo de caso conduzido em um ambiente de ensino real. O processo foi desenhado para ser iterativo e participativo, permitindo que o feedback dos usuários influenciasse diretamente o refinamento do dispositivo.

3.1.3.1 Ambiente e Critérios de Seleção dos Participantes

Os testes de usabilidade foram realizados em parceria com o Instituto Pequeno Príncipe de São Carlos. A seleção dos participantes seguiu o critério de incluir os usuários-finais da tecnologia, abrangendo:

- **Especialistas:** Professores da instituição, com e sem deficiência visual, que possuem profundo conhecimento sobre as ferramentas de tecnologia assistiva e os desafios pedagógicos da alfabetização em Braille.
- **Alunos com Diferentes Perfis:** Estudantes com cegueira total, incluindo o perfil-alvo de usuários com sensibilidade tática e/ou limitações motoras, para avaliar a eficácia do dispositivo em diferentes contextos de uso.

3.1.3.2 Procedimentos de Coleta de Dados

A coleta de dados foi planejada para capturar informações qualitativas sobre a interação do usuário com o dispositivo. Estudantes com cegueira total, incluindo também o perfil-alvo de usuários apenas com sensibilidade tática, utilizaram em sala de aula o dispositivo em diferentes contextos de uso. Durante as aulas de informática com o professor também deficiente visual, os participantes foram solicitados a realizar tarefas práticas, como escrever o alfabeto, palavras simples e navegar entre os caracteres, para avaliar a funcionalidade e a intuitividade da interface.

3.1.3.3 Análise e Utilização dos Dados

O feedback coletado através da comunicação direta com os professores do Instituto foi imediatamente analisado e utilizado para guiar o ciclo de desenvolvimento. A metodologia utilizou da implementação de ajustes no firmware durante a entrega dos protótipos, como a calibração de parâmetros de usabilidade e a correção da lógica de mapeamento dos caracteres. Todas as observações e sugestões foram documentadas para compor a base de

requisitos para a transição entre os protótipos, garantindo que a versão final do dispositivo fosse um reflexo direto das necessidades e da experiência dos seus usuários.

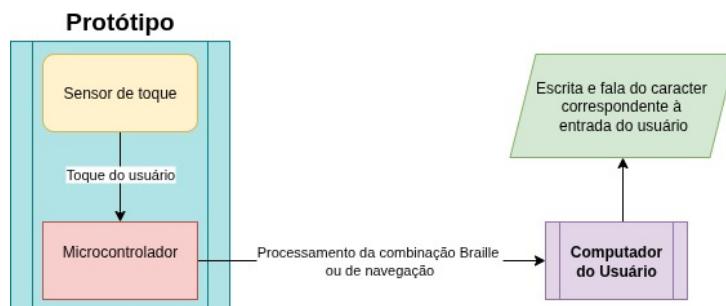
3.2 Arquitetura geral do sistema

A solução foi concebida seguindo uma arquitetura de sistema consistente em todos os protótipos, composta por um dispositivo de hardware que interage com um computador. O fluxo de interação baseia-se em três etapas fundamentais: entrada, processamento e saída.

- Entrada (Input): O usuário interage com o dispositivo de hardware através de sensores de toque capacitivo. A combinação dos pontos tocados na superfície do teclado serve como o dado de entrada principal.
- Processamento: Um microcontrolador no interior do dispositivo é responsável por ler os sinais dos sensores, interpretar a combinação de toques para decodificar o caractere Braille ou o comando de navegação correspondente.
- Saída (Output): Após a interpretação, o microcontrolador envia o caractere final para o computador do usuário. O computador, por sua vez, exibe o caractere em qualquer editor de texto e fornece um feedback auditivo imediato, utilizando o leitor de tela já em uso pelo usuário (como o DOSVOX) ou um software TTS específico.

A comunicação entre o dispositivo e o computador evoluiu ao longo do projeto, iniciando com uma conexão via porta Serial COM no primeiro protótipo e migrando para uma interface USB HID (Human Interface Device) nas versões subsequentes, garantindo compatibilidade universal e simplicidade de uso. A arquitetura geral é ilustrada no diagrama a seguir.

Figura 7 – Diagrama da Arquitetura Geral do Sistema



Fonte: Autor

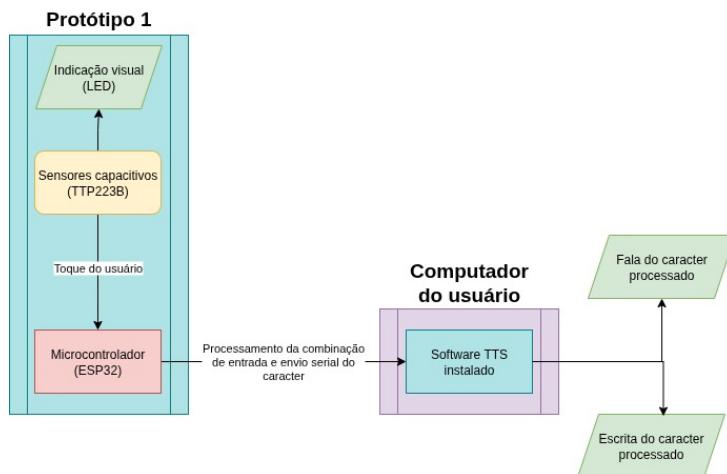
3.3 Primeiro Protótipo

A primeira etapa prática do projeto consistiu na construção de um protótipo inicial, cujo objetivo principal era servir como uma prova de conceito e não foi apresentada ao público-alvo. Esta fase foi fundamental para validar a viabilidade da interação por toque para a escrita em Braille e para identificar os desafios técnicos a serem superados.

3.3.1 Arquitetura do Primeiro Protótipo

A arquitetura específica desta primeira versão seguia o fluxo geral, mas com tecnologias intermediárias para contornar as limitações do hardware escolhido. O microcontrolador ESP32 lia os sensores de toque TTP223B. Como não possuía suporte USB HID nativo, ele enviava os dados via comunicação Serial para um software TTS em Python rodando no computador, que atuava como intermediário para a conversão do sinal em texto e áudio.

Figura 8 – Diagrama da Arquitetura do Primeiro Protótipo

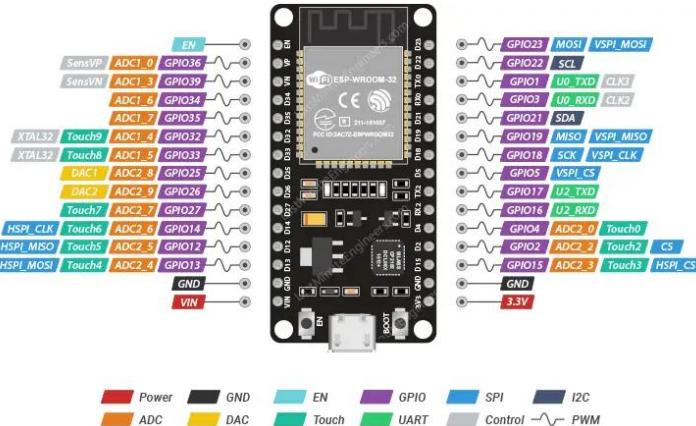


Fonte: Autor

3.3.2 Construção e Hardware

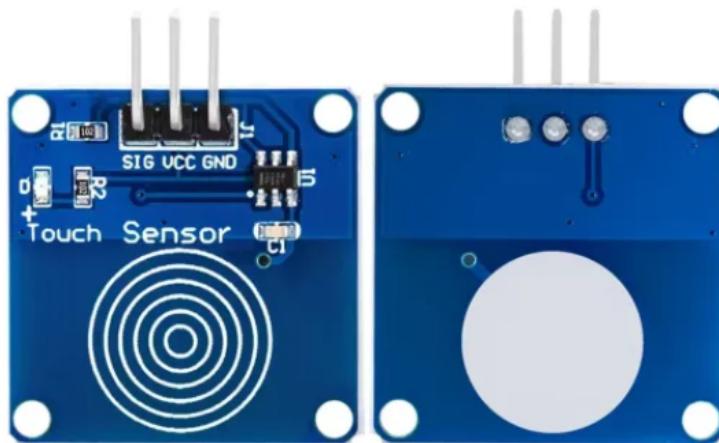
Para a montagem, foram selecionados componentes de baixo custo e fácil acesso. A plataforma utilizada foi o microcontrolador ESP32 WROOM Devkit V1, conectado a 10 módulos de sensores de toque capacitivo TTP223B via GPIO. A primeira integração foi feita em protoboard e, para maior estabilidade, o circuito final foi soldado em uma placa perfurada, que incluía LEDs para feedback visual do acionamento de cada ponto de toque durante os testes de desenvolvimento.

Figura 9 – Distribuição de pinos do microcontrolador ESP32



Fonte: (Espressif Systems, 2023)

Figura 10 – Sensor de toque capacitivo TTP223B



Fonte: (DatasheetHub, 2025)

3.3.3 Firmware e desafios

O firmware, desenvolvido em C++ na IDE Arduino, teve como principal desafio técnico a interpretação de múltiplos toques simultâneos. A ideia para lidar com tal cenário foi a introdução no código de um delay para a leitura da cela Braille após a detecção de toque de algum sensor, esperando o posicionamento completo dos dedos do usuário antes de registrar a combinação de pontos.

A comunicação com o computador foi estabelecida via porta Serial COM, exigindo a criação de um software complementar em Python. Este software visa receber os dados seriais, convertê-los em texto e utilizar bibliotecas Text-to-Speech (TTS) para gerar o feedback sonoro. Para garantir o funcionamento offline, os áudios foram pré-gerados e armazenados em arquivos .wav através de bibliotecas Python para geração dos áudios.

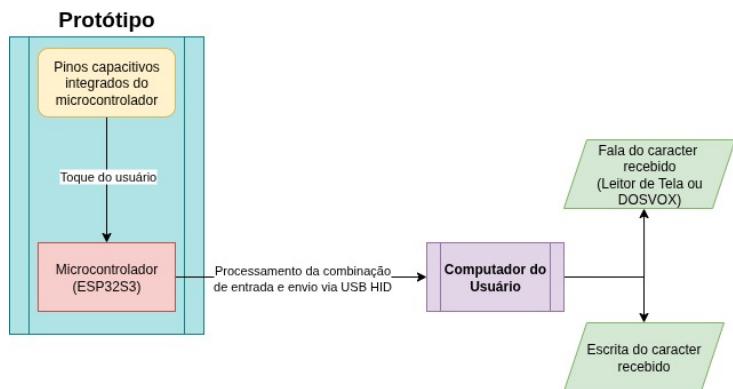
3.4 Segundo Protótipo

Com a prova de conceito validada após os resultados do primeiro protótipo, o projeto avançou para o desenvolvimento de uma versão mais robusta, universal e de fácil replicação. O segundo protótipo foi projetado para superar as limitações do anterior, com foco em atingir a funcionalidade Plug & Play e em aprimorar a construção física do dispositivo.

3.4.1 Arquitetura do Segundo Protótipo

A arquitetura desta versão foi significativamente aprimorada pela escolha de um microcontrolador mais capaz, o que permitiu eliminar a necessidade de software intermediário para a funcionalidade principal. O dispositivo passou a se comunicar diretamente com o sistema operacional como um teclado padrão, utilizando o protocolo USB HID. O feedback sonoro deixou de ser uma responsabilidade do software intermediário e passou a ser gerenciado pelos leitores de tela nativos do sistema operacional ou programas como o DOSVOX, que é muito utilizado por tal público. Diante disso, o software TTS desenvolvido tornou-se uma ferramenta complementar e opcional.

Figura 11 – Diagrama da Arquitetura do Segundo Protótipo



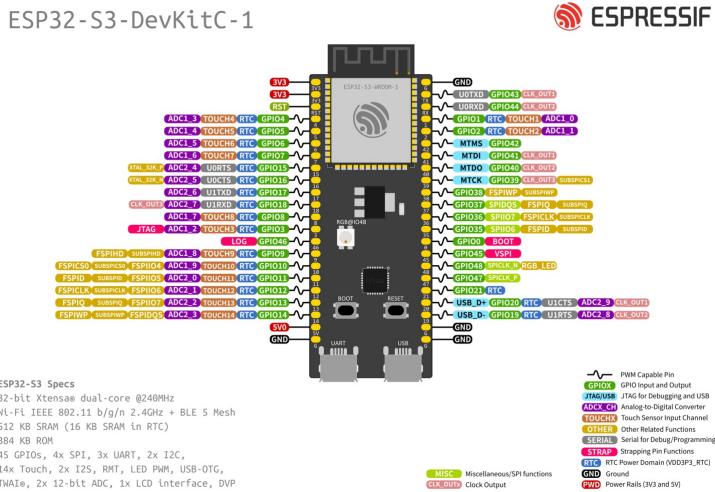
Fonte: Autor

3.4.2 Construção e Hardware

A construção desta versão foi mais elaborada, envolvendo o design de uma placa de circuito impresso customizada e a fabricação de um invólucro em impressão 3D.

Microcontrolador: Foi utilizado o ESP32S3 Devkit, escolhido por suas características superiores, como os 14 pinos de toque capacitivo integrados e, crucialmente, o suporte nativo a USB HID. Essa escolha eliminou a necessidade dos sensores TTP223B externos, simplificando o circuito.

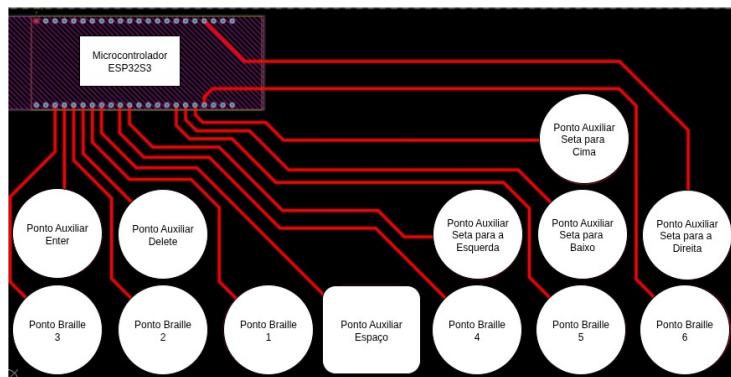
Figura 12 – Distribuição de pinos do microcontrolador ESP32S3



Fonte: (Espressif Systems, 2024)

Placa de Circuito Impresso (PCI): Para garantir a integração com um case e a replicabilidade do projeto, uma PCI foi projetada no software Altium Designer. A placa foi desenhada para um substrato de fenolite cobreada de dimensões 20x10 cm, com 13 áreas de toque circulares dispostas de forma análoga a uma máquina Braille tradicional, ilustrado na Figura 4. A confecção foi realizada manualmente utilizando a prensa térmica do Laboratório Aberto (LASEL) da EESC-USP.

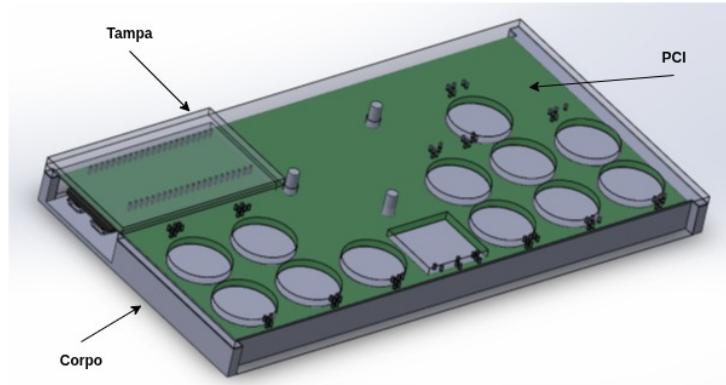
Figura 13 – Placa de Circuito Impresso do Segundo Protótipo



Fonte: Autor

Case 3D: Um invólucro (case) foi modelado no software SolidWorks e para ser fabricado em uma impressora 3D (Creality Ender 3) com filamento de PLA. O design foi dividido entre a Tampa e o Corpo, prevendo um encaixe por pressão e contendo um relevo na tampa para a identificação tátil dos pontos.

Figura 14 – Case do Segundo Protótipo



Fonte: Autor

3.4.3 Firmware, Software e Desafios

O firmware foi adaptado do protótipo anterior para a nova plataforma. O maior desafio técnico desta fase foi um bug crítico no microcontrolador ESP32S3, que travava o sistema ao detectar múltiplos toques simultâneos.

- **Solução com FreeRTOS:** O problema de travamento após toque simultâneos foi solucionado com a implementação do sistema operacional de tempo real FreeRTOS. A lógica foi reestruturada em duas tarefas (tasks) independentes: uma para a leitura das entradas da cela Braille e outra para as teclas de navegação.
- **Funcionalidade Braille Implementada:** O firmware nesta fase foi programado para interpretar o alfabeto completo (A-Z), números (0-9) e os respectivos sinais de maiúscula e numérico, conforme (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2018). Caracteres acentuados e sinais de pontuação ainda não haviam sido implementados com sucesso nesta fase. Isso deve-se ao fato de que a biblioteca utilizada USBHIDKeyboard para o ESP32S3 foi criada para implementar caracteres no formato de teclados US, incompatíveis com os acentos e pontuações do padrão dos teclados ABNT.

3.5 Terceiro Protótipo

Com base nos aprendizados obtidos com o segundo protótipo, foi planejada uma etapa final de refinamento, mirando um terceiro protótipo concebido como um MVP (Minimum Viable Product, ou Produto Mínimo Viável). O objetivo metodológico desta fase foi aprimorar a ergonomia, a experiência tátil e completar a funcionalidade do firmware, aplicando diretamente o feedback coletado na fase de validação anterior.

3.5.1 Refinamento do Firmware

A implementação do firmware foi expandida para além do alfabeto básico e dos números. O trabalho nesta etapa consistiu em estudar a comunicação USB HID para implementar o envio de caracteres acentuados e dos principais sinais de pontuação da Língua Portuguesa (como ponto, vírgula, ponto e vírgula, interrogação e exclamação), que haviam sido identificados como uma limitação funcional na versão anterior.

Um desafio técnico na implementação do firmware foi a limitação da biblioteca USBHIDKeyboard padrão do ESP32-S3, que é projetada para o layout US-ASCII e não permite o envio direto de caracteres do padrão brasileiro ABNT2, como 'ç', 'á' e 'ú'.

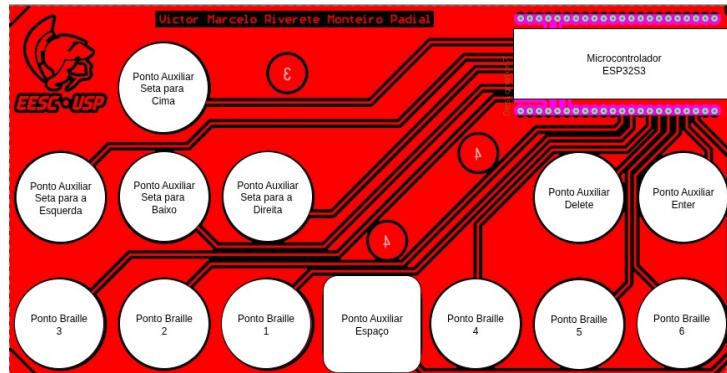
Para contornar essa limitação, a metodologia de desenvolvimento do firmware envolveu a adaptação de uma biblioteca de tradução, a `Arduino_KeyboardUTF8`. Esta biblioteca, que utiliza tabelas de layout `Keyboard_BR_1.h` para converter caracteres Unicode nas sequências de teclas corretas, não era nativamente compatível com a forma como o ESP32-S3 gerencia o objeto HID.

Foi necessário refatorar a biblioteca KeyboardUTF8 para que ela pudesse "envolver" o objeto USBHIDKeyboard principal do projeto. No código final, a biblioteca adaptada é usada para traduzir e enviar caracteres Braille complexos, enquanto as teclas de controle (Enter, Setas) continuam sendo enviadas pela biblioteca HID base. Durante este processo, foram corrigidos bugs de implementação, como o "Sticky Shift" (tecla SHIFT presa) e erros no mapeamento de caracteres específicos do layout ABNT2. Os códigos-fonte resultantes desta adaptação estão disponíveis no apêndice da monografia.

3.5.2 Restruturação de Case e PCI

A maior evolução desta fase se deu na remodelagem e alteração acerca dos materiais de impressão do invólucro do dispositivo, visando solucionar as limitações de acabamento e resolução da impressão 3D em PLA. Foi necessário ajustes pontuais na Placa de Circuito Impresso para corresponder ao novo design do case, como a realocação dos pontos de toque para a inclusão do relevo em Braille na tampa do case.

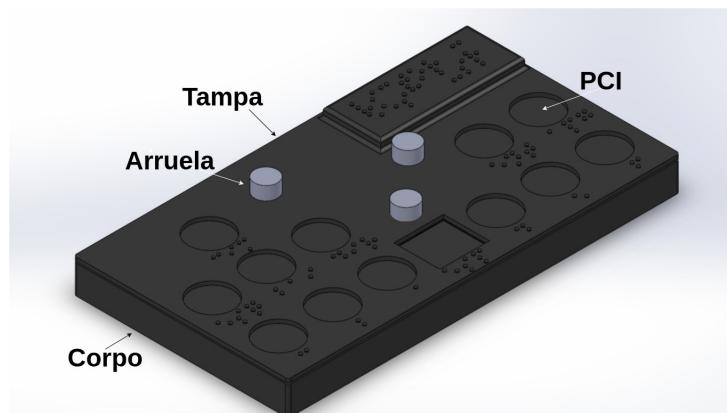
Figura 15 – Placa de Circuito Impresso do Terceiro Protótipo



Fonte: Autor

Combinação de tecnologias de impressão 3D: O método de fabricação foi a combinação da tecnologia FDM (filamento) e a Estereolitografia (SLA), que utiliza resina líquida fotossensível. Motivada pela capacidade da resina de produzir peças com uma superfície lisa e um acabamento macio, a Tampa do invólucro foi feita a partir dessa tecnologia proporcionando uma experiência tátil mais agradável e adequada para usuários com hipersensibilidade. Em contrapartida, a tecnologia FDM continuou sendo utilizada para fabricação do corpo do case, que não possui contato direto com os dedos do usuário e se beneficia do menor custo e maior rapidez de produção.

Figura 16 – Case do Terceiro Protótipo



Fonte: Autor

Inclusão de Relevo Braille e alterações de Design: O modelo 3D do case foi redesenhado no SolidWorks para incluir relevos em Braille diretamente sobre a superfície, abaixo de cada ponto de toque seguindo as normas (GOVERNO FEDERAL, 2024) e ilustradas em 2. A alta resolução da impressão em resina permite fabricar esses relevos com a precisão necessária para servirem como guias táteis, facilitando a localização dos dedos pelo usuário e melhorando a orientação espacial no teclado. Para adição do relevo

Braille na Tampa do case foi necessário a reorganização dos pontos de toque, necessitando a alteração sutil no design da Placa de Circuito Impresso citada. Uma mudança de conceito foi a adição de Arruelas também impressas 3D em resina para prender a Tampa ao corpo do case, substituindo o encaixe por pressão do modelo anterior, que não oferecia segurança suficiente para o uso diário. Essa alteração proporcionou maior dinamicidade para abrir o case e acessar a placa de circuito, facilitando futuras manutenções ou atualizações do hardware.

3.6 Custo dos Protótipos

A fim de garantir que a solução desenvolvida nesse Trabalho de Conclusão de Curso permanecesse acessível e replicável, o custo total de cada protótipo foi cuidadosamente monitorado. Os custos com programas de desenvolvimento de placa circuito impresso(Altium Design) e modelagem 3D(Solid Works) foram desconsiderados uma vez que foram utilizados as versões estudantis dos programas, que são gratuitas para estudantes universitários. A tabela a seguir detalha os custos estimados dos componentes que formaram o Primeiro Protótipo.

Tabela 1 – Detalhamento de custos do Protótipo 1.

Componente	Preço unitário (R\$)	Quantidade	Seção	Preço Total (R\$)
TTP223B	3,90	11	Eletrônica	42,9
ESP32	50,00	1	Eletrônica	50,00
Placa Perfurada(Doação)	0,00	1	Eletrônica	0,00
Resistores e LEDs	2,50	1	Eletrônica	2,50
Frete Total	23,11	1	Logística	23,11
TOTAL				118,51

A tabela a seguir detalha os custos estimados dos componentes que formaram o Segundo Protótipo. Nota-se uma diminuição significativa no custo da seção de Eletrônica, atribuída principalmente à eliminação dos sensores externos e à adoção de uma placa de circuito impresso personalizada que aproveita os sensores capacitivos integrados do ESP32S3. Para as estruturas de PLA foi utilizada a impressora 3D Ender 3 do grupo Topus Projetos Aeroespaciais, sendo considerado então nos custos apenas o quilograma de PLA utilizado.

Tabela 2 – Detalhamento de custos do Protótipo 2.

Componente	Preço unitário (R\$)	Quantidade	Seção	Preço Total (R\$)
ESP32S3	46,42	1	Eletrônica	46,42
Fenolite Cobreado	5,00	1	Eletrônica	5,00
Tampa(PLA)	25,00	1	Estrutura	25,00
Corpo(PLA)	50,00	1	Estrutura	30,00
Frete Total	0	0	Logística	0
TOTAL				106,42

Para o Terceiro Protótipo vemos um aumento substancial de custo por protótipo decorrente da terceirização da manufatura das estruturas 3D somado à dificuldade de confecção de peças em resina. As estruturas de resina foram encomendadas em uma empresa de São Carlos especializada e o corpo em PLA manufaturado em uma impressora 3D autônoma. Acredita-se que impressões 3D em larga escala ou até mesmo a sua substituição pelo método de plástico por injeção podem reduzir consideravelmente o preço do dispositivo, uma vez que a seção de Estrutura tornou-se a parte mais custosa do protótipo.

Tabela 3 – Detalhamento de custos do Protótipo 3.

Componente	Preço unitário (R\$)	Quantidade	Seção	Preço Total (R\$)
ESP32S3	46,42	1	Eletrônica	46,42
Fenolite Cobreado	5,00	1	Eletrônica	5,00
Tampa e Arruelas(Resina)	220,00	1	Estrutura	220,00
Corpo(PLA)	50,00	1	Estrutura	30,00
Frete Total	0	0	Logística	0
TOTAL				301,42

A partir dos custos por protótipo monta-se a Tabela a seguir resumindo os custos por protótipos, essenciais em cada Fase para o desenvolvimento desse Trabalho de Conclusão de Curso.

Tabela 4 – Resumo dos custos por protótipo.

Protótipo	Custo Total (R\$)
1	114,54
2	106,42
3	301,42
TOTAL	526,35

4 RESULTADOS

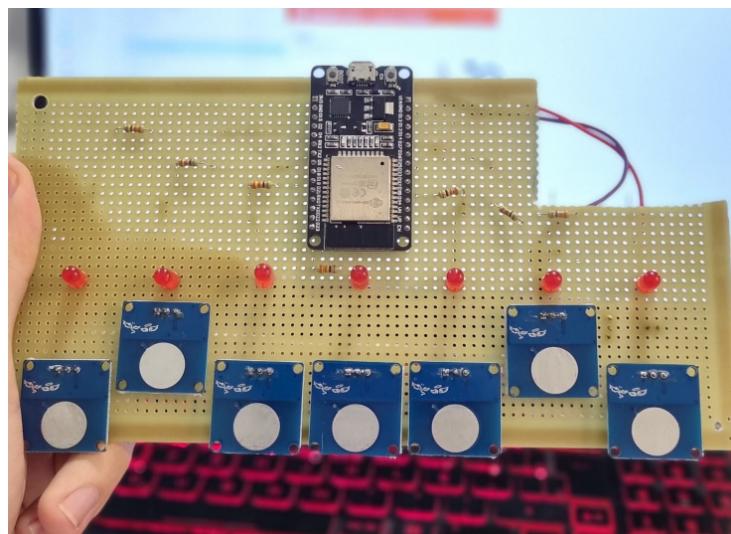
Este capítulo apresenta os resultados obtidos em cada fase de desenvolvimento do Teclado Touch Braille. Os resultados são apresentados de forma cronológica, demonstrando a evolução do projeto desde a prova de conceito inicial até a validação da versão final, com base nos testes técnicos e no feedback dos usuários.

4.1 Resultados do Primeiro Protótipo

A construção do primeiro protótipo resultou em uma prova de conceito funcional que validou a premissa central do projeto. O principal resultado desta fase foi a demonstração de que era tecnicamente viável realizar a escrita em Braille em um computador utilizando uma interface baseada em sensores de toque capacitivo, sem a necessidade de acionamento mecânico.

Ao final de sua construção, o sistema integrado composto pelo hardware (micro-controlador ESP32 e sensores TTP223B), firmware e o software intermediário em Python permitiu que palavras fossem escritas e exibidas em um editor de texto no computador. O feedback sonoro, fornecido pelo software TTS, também se mostrou funcional, lendo os caracteres enviados pelo dispositivo.

Figura 17 – Primeiro Protótipo Montado



Fonte: Autor

Apesar do sucesso funcional, esta fase também evidenciou limitações significativas que serviram como requisitos para o desenvolvimento do protótipo seguinte. O dispositivo não era facilmente replicável ou apresentável, e sua dependência de um software intermediário para a comunicação com o computador foi identificada como um grande obstáculo

para a usabilidade e a universalidade da solução. Diante disso, o protótipo foi apenas utilizado para testes iniciais de conceito e não foi submetido a avaliações com usuários.

4.2 Resultados do Segundo Protótipo

A evolução para o segundo protótipo resultou em um salto significativo de desempenho e funcionalidade, superando as principais limitações da prova de conceito. Os resultados técnicos desta fase demonstraram a viabilidade de se criar um dispositivo universal e de fácil utilização.

4.2.1 Desempenho Técnico e Funcionalidades

O resultado mais importante foi o sucesso na implementação da funcionalidade Plug & Play. Graças ao suporte nativo a USB HID do microcontrolador ESP32S3, o dispositivo foi consistentemente reconhecido pelo sistema operacional Windows como um teclado padrão assim que conectado via cabo USB-C. Este resultado eliminou a dependência de drivers ou de softwares intermediários, cumprindo um dos requisitos essenciais do projeto. Entretanto, a baixa resolução de impressão 3D FDM utilizada para a construção do case não permitiu a inclusão de relevos táteis em Braille, o que comprometeu a usabilidade do dispositivo.

Figura 18 – Segundo Protótipo Montado



Fonte: Autor

O firmware, reestruturado com o sistema operacional de tempo real FreeRTOS, mostrou-se estável e responsivo. A solução de dividir a leitura das entradas em tarefas independentes resolveu com sucesso o problema de travamento que ocorria com múltiplos toques simultâneos, viabilizando uma escrita fluida e confiável em Braille.

Em termos de funcionalidade, o firmware do segundo protótipo foi capaz de interpretar e enviar corretamente para o computador:

- Todas as letras do alfabeto, de A a Z.

- A indicação de letra maiúscula, quando o caractere era precedido pela combinação dos pontos 2 e 6.
- Os números de 0 a 9, quando precedidos pelo sinal numérico correspondente aos pontos 2, 4, 5 e 6.

4.2.2 Resultados da Validação com Usuários

Embora o segundo protótipo tenha alcançado um marco importante em termos de funcionalidade eletrônica e de software, os resultados de sua construção física evidenciaram a necessidade de aprimorar a interface tátil para melhorar a experiência do usuário.

4.2.2.1 Ajustes durante entrega do protótipo

O segundo protótipo foi entregue ao Instituto Pequeno Príncipe e bem recebido pelo professor de informática da instituição, que também é uma pessoa com deficiência visual. Sua experiência prática com tecnologias assistivas resultou em um feedback imediato e construtivo durante a entrega, que permitiu a realização de otimizações no firmware em tempo real, diretamente no local dos testes.

Figura 19 – Entrega do Segundo Protótipo ao Instituto Pequeno Príncipe



Fonte: Autor

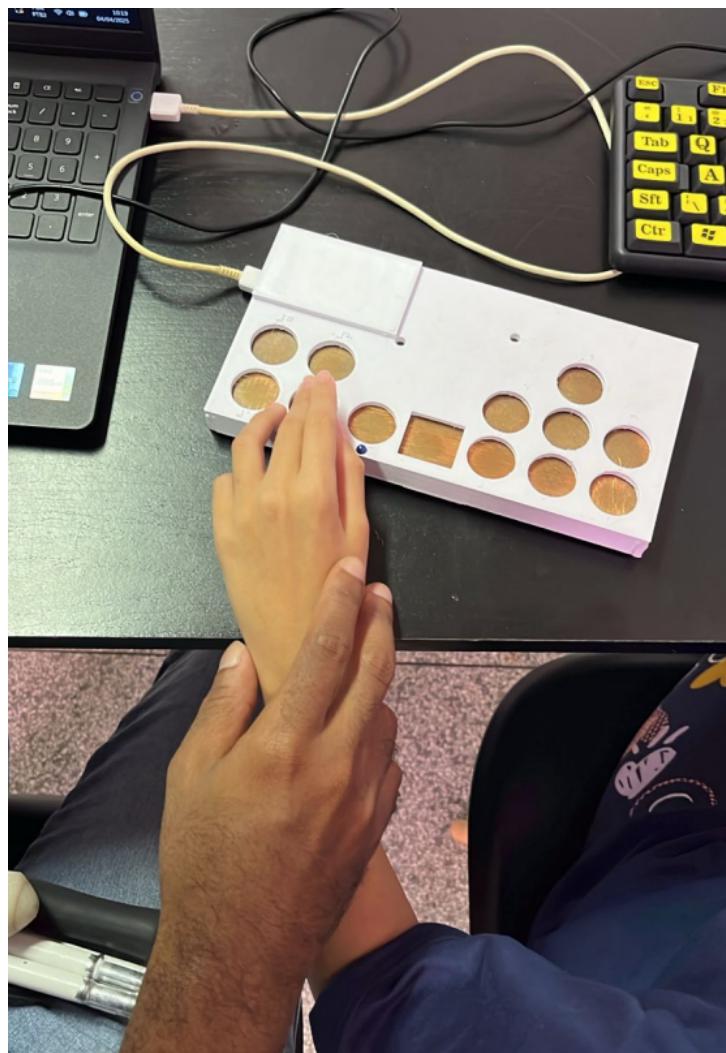
Ajuste de Usabilidade: O tempo de resposta para a leitura dos pontos Braille, inicialmente configurado em 1000 ms, foi ajustado para 750 ms a pedido do professor. Esse resultado demonstrou que um tempo de leitura menor proporcionava uma experiência de escrita mais fluida e agradável.

Correção de Layout Funcional: Durante os primeiros testes, o professor identificou que a disposição física dos pinos no firmware não correspondia ao padrão tradicional das máquinas Braille, devido a um entendimento equivocado do layout vertical da escrita.

O mapeamento dos pinos foi prontamente corrigido, um resultado crucial para alinhar o funcionamento do protótipo com os padrões de equipamentos educativos reais e garantir a intuitividade para usuários já familiarizados com o sistema.

Além disso, o protótipo foi utilizado com sucesso por outros alunos com cegueira total para escrever suas primeiras letras em softwares como o DOSVOX, confirmando a funcionalidade básica do dispositivo como uma ferramenta de alfabetização.

Figura 20 – Primeiro contato da aluna com cegueira total sensível ao toque com o dispositivo



Fonte: Autor

4.2.2.2 Barreiras e Desafios Observados

O projeto foi deixado no Instituto Pequeno Príncipe para uso contínuo e avaliação a longo prazo. No entanto, alguns desafios foram identificados que limitaram o uso do dispositivo por outros alunos:

Resistência por Hipersensibilidade: A aluna-alvo do projeto, que possui hipersensibilidade ao toque, demonstrou resistência ao uso do dispositivo. Mesmo com a tecnologia não exigindo força para ativação, o resultado observado foi que o simples contato físico com as teclas ainda representava um obstáculo sensorial.

Dificuldades de Orientação Espacial: Foi identificado que os alunos, de modo geral, apresentaram uma barreira inicial relacionada à orientação espacial e à localização dos pontos no teclado. A ausência de guias táteis evidentes resultantes da falha na impressão 3D dificultou a rápida adaptação ao layout do dispositivo, sugerindo a necessidade de um design mais intuitivo e com pistas táteis mais claras.

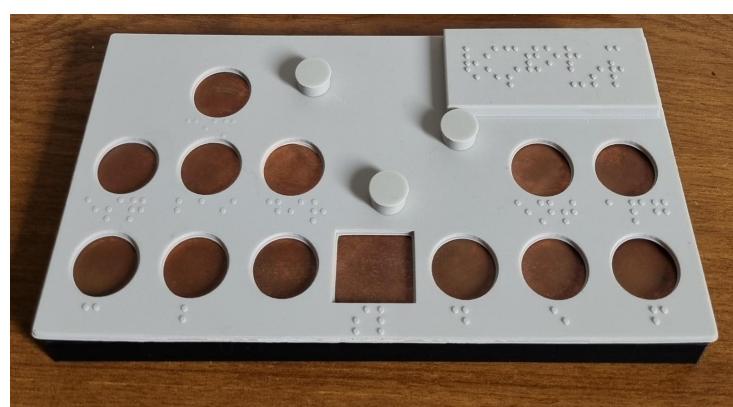
Esses resultados foram determinantes para guiar a próxima fase de desenvolvimento, indicando a necessidade de explorar materiais com diferentes texturas e de aprimorar o design físico do case para melhorar a ergonomia e a experiência tátil do usuário.

4.3 Resultados do Protótipo Final

4.3.1 Aprimoramentos Técnicos e Funcionais

O terceiro protótipo representa a consolidação dos aprendizados obtidos nas fases anteriores, focando no refinamento da ergonomia e na finalização das funcionalidades de software. Os resultados da fabricação do novo case foram positivos. A impressão da tampa em resina (SLA) atingiu os objetivos esperados, resultando em uma superfície lisa e com acabamento suave, considerada mais adequada para usuários com hipersensibilidade tátil. Mais importante, a alta resolução desta tecnologia permitiu a impressão bem-sucedida do relevo Braille na superfície, conforme planejado na seção 3.5.2. Em testes preliminares, esse relevo demonstrou auxiliar efetivamente na localização tátil dos dedos, resolvendo a dificuldade de orientação espacial identificada nos resultados do segundo protótipo.

Figura 21 – Terceiro Protótipo Montado



Fonte: Autor

Durante a montagem do hardware, foi necessário realizar a furação da Placa de Circuito Impresso (PCI) com uma furadeira de bancada na oficina do grupo Topus Projetos Aeroespaciais para o encaixe da nova estrutura. Nesse processo, os furos destinados às arruelas de fixação do case foram accidentalmente feitos com um diâmetro maior que o projetado. A solução para essa folga foi o preenchimento do espaço excedente com cola quente e adesivo instantâneo, o que permitiu a integração bem-sucedida entre a PCI, o corpo e a tampa do dispositivo.

No desenvolvimento do firmware, a implementação do conjunto completo de caracteres, incluindo acentuações e sinais de pontuação, foi concluída com sucesso. Um resultado importante desta fase foi a decisão de abandonar a implementação do protocolo USB HID Braille. Embora essa fosse uma meta (conforme seção 3.1.1, Fase 4), constatou-se que o protocolo é pouco documentado e sua implementação exigiria um estudo avançado do padrão USB que foge ao escopo deste projeto. Desta forma, optou-se por manter a solução validada no protótipo anterior: a comunicação via USB HID Keyboard. As modificações de software para a compatibilidade com o layout ABNT2 (detalhadas na seção 3.5.1) mostraram-se suficientes para implementar uma solução quase completa, permitindo que o dispositivo seja universalmente reconhecido como um teclado padrão, garantindo a funcionalidade Plug & Play e a compatibilidade com leitores de tela como o DOSVOX.

Tabela 5 – Ambiente Verificado nos Testes

Sistema Operacional	Windows 11
Leitor de Tela	DOSVOX
Comunicação	USB
Software Adicionais	Não são necessários

O escopo final dos caracteres implementados é detalhado na Tabela 6. Como pode ser observado, a grande maioria das letras, números, acentuações e pontuações essenciais à Língua Portuguesa foi implementada com sucesso. Ainda, todos os pontos para navegação digital foram implementados com sucesso. Os caracteres que não foram implementados são aqueles que segundo a Grafia Braille (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2018) exigem duas combinações de entrada sequenciais (como alguns símbolos matemáticos) ou utilizam a mesma combinação Braille para representar dois caracteres distintos. A implementação destes casos exigiria uma lógica de "máquina de estados" no firmware, o que foi considerado fora do escopo deste projeto de um dispositivo de entrada direta.

Tabela 6 – Cobertura dos caracteres Braille pelo projeto

Caractere(s)	Descrição	Coberto no projeto
a-z	Letras do alfabeto (a-z)	Sim
0-9	Número (0-9) a partir do prefixo	Sim
á, é, í, ó, ú	Vogais com acento agudo	Sim
à	Vogal 'a' com acento grave	Sim
â, ê, ô	Vogais com acento circunflexo	Sim
ã, õ	Vogais com til	Sim
ç	Consoante 'c' com cedilha	Sim
,	vírgula	Sim
;	ponto e vírgula	Sim
:	dois-pontos	Sim
.	ponto	Sim
'	apóstrofo	Não
?	ponto de interrogação	Sim
!	ponto de exclamação	Não
...	reticências	Não
- (hífen)	hífen ou traço de união	Sim
– (trav.)	travessão	Não
*	asterisco	Sim
()	abre e fecha parênteses	Não
[]	abre e fecha colchetes	Não
"	abre e fecha aspas	Sim
‘’	abre e fecha aspas simples	Não
«»/ <>	outras variantes de aspas	Não
&	e comercial	Não
/	barra	Sim
	barra vertical	Não
#	hashtag	Não
(outros)	Círculo, Quadrado, Setas, Vênus, Marte, etc.	Não
© / ®	Copyright / Marca Registrada	Não
\$	cifrão	Sim
€ / £ / ¥	Euro / Libra / Iene	Não
% / %o	por cento / por mil	Não
§	símbolo de parágrafo	Não
+	sinal de adição (mais)	Sim
-	sinal de subtração (menos)	Sim
x	sinal de multiplicação (vezes)	Não
÷	sinal de divisão	Não
=	sinal de igualdade	Sim
/	traço de fração	Sim
>	maior que	Sim
<	menor que	Não
°	grau(s)	Sim
” / ‘	polegada, minuto e segundo	Não
(prefixo)	sinal de maiúscula	Sim
(prefixo)	sinal de número	Sim
(outros)	Maiúscula (palavra/série), Expoente, Índice, Itálico, etc.	Não

4.4 A solução no Contexto das Tecnologias Assistivas

O Teclado Touch Braille não foi desenvolvido em um vácuo; ele se insere em um amplo espectro de tecnologias assistivas destinadas a prover acesso à escrita para pessoas com deficiência visual. Para avaliar a contribuição e a singularidade deste projeto, é essencial compará-lo com as soluções tradicionais, os produtos de mercado de alto custo, os aplicativos de software e outros trabalhos acadêmicos de baixo custo.

4.4.1 Comparação com Soluções Tradicionais

Discorrido no Capítulo 2, as máquinas Braille tradicionais, como a reglete e o punção, são ferramentas amplamente utilizadas para a escrita em Braille. No entanto, elas apresentam limitações significativas para pessoas com hipersensibilidade ao toque ou com limitações neuromotoras. O Teclado Touch Braille supera essas barreiras ao eliminar a necessidade de pressão mecânica, oferecendo uma alternativa mais acessível e inclusiva. Entretanto, a solução proposta aqui possui como principal desvantagem em relação às máquinas tradicionais a necessidade de um equipamento digital como celular ou computador para sua utilização, sendo um obstáculo para usuários sem acesso a esses dispositivos.

4.4.2 Comparação com Produtos Comerciais

O mercado de tecnologia assistiva de ponta inclui Linhas Braille (ou Refreshable Braille Displays) e teclados Braille dedicados, como o Brailliant da Human Ware. Essas soluções são poderosas, muitas vezes combinando entrada de caractetes Braille utilizando botões e ainda saída Braille pinos tátteis atualizaveis. No entanto, seu principal ponto fraco é o custo proibitivo, que pode chegar a milhares de dólares e dezenas de milhares de reais quando importados, tornando-as inacessíveis para a vasta maioria dos usuários no Brasil. O Teclado Touch Braille se posiciona como uma alternativa de baixíssimo custo, utilizando componentes como o microcontrolador ESP32S3 para replicar a funcionalidade de entrada de forma acessível.

Figura 22 – Teclado Braille Comercial Brailliant BI 20x



Fonte: (Humanware, 2025)

4.4.3 Comparação com Aplicativos de Software

Com a onipresença dos smartphones, surgiram diversos aplicativos que sobrepõem um teclado Braille à tela de toque, como o BrailleType(OLIVEIRA *et al.*, 2011) e o BrailleTouch(ROMERO *et al.*, 2011). Essas soluções são de custo zero ou muito baixo. No entanto, elas apresentam como desafios: A interface é uma tela de vidro plano, que não oferece a mesma referência tátil e ergonômica de um dispositivo físico dedicado; e elas operam em um ambiente onde o leitor de tela (como o VoiceOver) já está ativo, podendo gerar conflitos de interação. O Teclado Touch Braille oferece a vantagem de um dispositivo de hardware dedicado, com um case ergonômico e guias tátteis em relevo (no protótipo final), proporcionando uma experiência de digitação mais estável e separada da interface principal do computador, com a qual se comunica como um teclado padrão (USB HID).

4.4.4 Comparação com Trabalhos Acadêmicos de Baixo Custo

O presente trabalho se alinha a outros projetos acadêmicos que buscam criar dispositivos Braille de baixo custo. Trabalhos como o "Be-Braille"(IMAN *et al.*, 2023), o "Braille Keyboard for People with Low Vision"(SİRBU; ŞERBAN; ROŞCA, 2019) e o "Prototype of a Braille Keyboard for Smartphones"(BEGMATOV *et al.*, 2022) também exploram o uso de microcontroladores (como ESP32, Teensy, ATmega) para criar interfaces de entrada ou aprendizagem. A principal contribuição e diferencial deste TCC reside na metodologia centrada no usuário e no foco em necessidades específicas. Enquanto estes trabalhos se concentram na prova de conceito técnica, este projeto foi validado iterativamente e extende o público alvo para deficientes visuais com limitações motoras ou sensibilidade ao toque. Ainda, o feedback obtido levou a otimizações mensuráveis de

responsividade de uso e a decisões de design focadas na ergonomia, como o desenvolvimento do case em resina com relevo tátil para atender usuários com hipersensibilidade.

Tabela 7 – Quadro comparativo das soluções de hardware e software para escrita Braille.

Solução	Tipo de Interface	Principal Vantagem	Principal Desvantagem	Foco do TCC
Máquina Perkins	Hardware Mecânico	Robustez; Feedback tátil claro.	Exige força mecânica; Custo moderado; Ruído.	Supera a necessidade de força mecânica.
Reglete e Punction	Ferramenta Manual	Baixíssimo custo; Portabilidade.	Lento; Exige alta destreza motora; Escrita espelhada.	Supera a barreira da destreza motora.
Linha Braille Comercial	Hardware Eletrônico (Alto Custo)	Entrada e Saída (Display Tátil).	Custo extremamente elevado; Portabilidade.	Alternativa de entrada de baixíssimo custo.
Apps de Teclado Braille	Software (Tela de Toque)	Custo zero ou baixo; Integrado ao smartphone.	Falta de feedback tátil físico; Superfície plana.	Oferece um dispositivo físico dedicado e estável.
Acadêmicos (Hardware Low-Cost)	Hardware Eletrônico (Baixo Custo)	Prova de conceito de baixo custo.	Geralmente focado na viabilidade técnica.	Foco no usuário (hipersensibilidade, limitações motoras) e validação iterativa em campo.
Máquina Braille Touch (Este TCC)	Hardware Eletrônico (Baixo Custo)	Toque sem pressão; USB HID nativo; Custo baixo; Design ergonômico (Resina).	Apenas dispositivo de entrada (sem display).	Solução validada e otimizada para usuários com hipersensibilidade e limitações motoras.

5 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresentou o desenvolvimento de uma Máquina Braille Touch de baixo custo, uma solução de tecnologia assistiva focada em permitir a escrita digital para pessoas com deficiência visual, com ênfase especial naquelas com limitações motoras e hipersensibilidade ao toque (TEA). O projeto partiu de um levantamento de requisitos que identificou uma lacuna nas soluções existentes — entre ferramentas mecânicas que exigem força (Máquina Perkins) e interfaces de tela plana sem feedback tátil (aplicativos de smartphone) — e propôs um dispositivo de hardware dedicado, acessível e ergonômico.

Ao final do desenvolvimento, é possível afirmar que os objetivos específicos definidos neste trabalho foram majoritariamente alcançados. Foi desenvolvida uma interface de escrita tátil-capacitiva funcional que identifica a combinação de pontos do Braille sem a necessidade de pressão mecânica, visando atender ao público-alvo com limitações motoras e sensoriais. O objetivo de compatibilidade universal foi plenamente atingido, resultando em um dispositivo Plug & Play que utiliza o protocolo USB HID Keyboard, sendo reconhecido nativamente pelo sistema operacional Windows e integrando-se perfeitamente aos leitores de tela existentes. Também foi construído um protótipo funcional de baixo custo, utilizando componentes eletrônicos acessíveis e fabricação digital, o que garante a viabilidade de replicação da solução. O firmware foi implementado para interpretar o vocabulário Braille essencial, incluindo o alfabeto completo, números, navegação e os principais sinais de pontuação. Por fim, o objetivo de validação com o público-alvo foi crucial para o sucesso do projeto; os testes iterativos no Instituto Pequeno Príncipe forneceram dados qualitativos essenciais que guiaram o refinamento do dispositivo, resultando em otimizações mensuráveis de usabilidade, como o ajuste do tempo de resposta ao toque e o aprimoramento ergonômico do case final.

A principal contribuição deste trabalho é a disponibilização de um projeto de hardware de baixo custo e código aberto, focado em um público com necessidades específicas (limitações motoras e TEA) que é frequentemente mal atendido pelas soluções de mercado. O dispositivo se posiciona como uma ferramenta pedagógica e de autonomia relevante, preenchendo a lacuna entre os métodos de escrita tradicionais e os dispendiosos displays Braille comerciais.

Como limitações, o projeto não implementa a saída de dados em Braille (display tátil), sendo estritamente um dispositivo de entrada. Além disso, os resultados da validação com a aluna com hipersensibilidade ao toque indicam que, embora a pressão tenha sido removida, a textura do material ainda é um fator sensorial crítico que demanda mais estudos.

Para trabalhos futuros, sugere-se a exploração da conectividade Bluetooth do

ESP32S3 para uso com smartphones e a retomada do estudo do protocolo USB HID Braille, que, apesar de complexo, permitiria uma integração ainda mais profunda com os leitores de tela modernos. Recomenda-se, também, a realização de testes de longa duração para avaliar a curva de aprendizado e a eficácia do dispositivo como ferramenta pedagógica contínua.

REFERÊNCIAS

- BEGMATOV, S. *et al.* Development of a prototype of a braille keyboard for smartphones. In: **2022 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)**. [S.l.]: IEEE, 2022.
- BORGES, J. A. dos S. **DO BRAILLE AO DOSVOX - DIFERENÇAS NAS VIDAS DOS CEGOS BRASILEIROS**. 2009. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- CAMPOS, R. **IBGE aponta que mais de 6 milhões de pessoas têm deficiência visual no Brasil**. 2023. UNIVALI. Disponível em: <https://www.univali.br/noticias/Pagina/s/ibge-aponta-que-mais-de-6-milhoes-de-pessoas-tem-deficiencia-visual-no-brasil.aspx>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- CAPASCIUTTI, T. V. **Desenvolvimento de equipamento para auxiliar no processo de memorização do Sistema Braille para a língua portuguesa**. São Carlos: [s.n.], 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/c35de953-97fb-4c0f-8e83-c2e3445a88be/Capasciutti_Thaina_tcc.pdf. Acesso em: 19 set. 2025.
- CARIZIO, B. G. *et al.* Tecnologia assistiva aplicada a escolares com deficiências visuais: Estudo de revisão. In: **Anais do 15º Congresso Internacional de Ergonomia e Usabilidade de Interfaces Humano-Tecnologia**. Florianópolis, Brasil: [s.n.], 2015.
- DatasheetHub. **TTP223B Capacitive Touch Sensor Module Datasheet**. 2025. Online. Disponível em: <https://www.datasheethub.com/tpp223b-capacitive-touch-sensor-module/>. Acesso em: 18 de outubro de 2025.
- DIÁRIO PCD. **Dia Mundial do Braille: o real acesso ao sistema no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://diariopcd.com.br/2023/01/03/dia-mundial-do-braille-o-real-acesso-ao-sistema-no-brasil/>. Acesso em: 14 out. 2024.
- DUTTON, C. S. As especificidades do ensino e da aprendizagem da leitura por meio do sistema braille na alfabetização de alunos cegos. **Benjamin Constant**, Rio de Janeiro, Brasil, v. 27, n. 62, p. 1–15, 2021.
- Ebanataw. **Alfabeto Braille**. 2025. Online; em "BRAILLE - O ALFABETO DOS CEGOS". Disponível em: <https://www.ebanataw.com.br/trafegando/braille.php>. Acesso em: 19 de setembro de 2025.
- Engiprinters. **Esquema de funcionamento de uma impressora 3D de resina (SLA)**. Brasil: [s.n.], 2025. Online; em "O que é e como funciona a impressão SLA". Disponível em: <https://engiprinters.com.br/o-que-e-e-como-funciona-a-impressao-sla/>. Acesso em: 19 de setembro de 2025.
- Espressif Systems. **ESP32-WROOM-32 Datasheet (Revision 3.3)**. Shanghai, China: [s.n.], 2023. Online; Datasheet. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 18 de outubro de 2025.

Espressif Systems. **ESP32-S3 Series Datasheet (Revision 1.4)**. Shanghai, China: [s.n.], 2024. Online; Datasheet. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf. Acesso em: 19 de setembro de 2025.

FAÇANHA, A. R. *et al.* Auxiliando o processo de ensino-aprendizagem do braille através de dispositivos touch screen. **Informática na Educação: teoria & prática**, Porto Alegre, Brasil, v. 15, n. 2, p. 153–169, 2012.

FUNDAÇÃO FEAC. **As novas tecnologias não substituem o braille, diz Regina Oliveira da Fundação Dorina Nowill**. 2023. Disponível em: <https://gife.org.br/as-novas-tecnologias-nao-substituem-o-braille-diz-regina-oliveira-da-fundacao-dorina-nowill/>. Acesso em: 14 out. 2024.

GOMES, I. **Pessoas com deficiência têm menor acesso à educação, ao trabalho e à renda**. 2022. Agência de Notícias IBGE. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37317-pessoas-com-deficiencia-tem-menor-acesso-a-educacao-ao-trabalho-e-a-renda>. Acesso em: 14 out. 2024.

GOVERNO FEDERAL. **Grupos de pesquisas vinculados ao Centro de Estudos e Pesquisa do IBC (Cepeq) — 2023**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibc/pt-br/pesquisa-e-tecnologia/centro-de-estudos-e-pesquisas-do-ibc-1/grupos-de-pesquisa-vinculados-ao-cepeq/grupos-de-pesquisas-vinculados-ao-centro-de-estudos-e-pesquisa-do-ibc-cepeq-2014-2024>. Acesso em: 11 abr. 2025.

GUERREIRO, J. *et al.* The today and tomorrow of braille learning. In: **The 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS '13)**. New York, NY, USA: ACM, 2013. p. 1–2.

HOSKIN, E. R. *et al.* Effectiveness of technology for braille literacy education for children: a systematic review. **Disability and Rehabilitation: Assistive Technology**, 2022.

Humanware. **Imagen do Brailliant BI 20X Braille Display**. Plattsburgh, NY, United States: [s.n.], 2025. Online. Disponível em: <https://store.humanware.com/hus/brailliant-bi-20x-braille-display.html>. Acesso em: 19 de setembro de 2025.

IMAN, B. N. *et al.* Development of be-braille learning tool: Enhancing braille education and interaction for visually impaired students. In: **2023 Sixth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)**. [S.l.]: IEEE, 2023.

Kunkel, Maria Elizete et al. **Figura 4.2 - Representação esquemática do processo FDM**. 2020. Capítulo de livro: Manufatura Aditiva do Tipo FDM na Engenharia Biomédica. In: KUNKEL, M. E. (Org.). **Fundamentos e Tendências em Inovação Tecnológica**: v.1. Seattle: Kindle Direct Publishing, 2020. p. 54.

Lighthouse for the Blind and Visually Impaired. **Imagen de Louis Braille quando criança**. San Francisco, California, United States: [s.n.], 2025. Online; em "The History of World Braille Day". Disponível em: <https://lhbblind.org/history-of-world-braille-day/>. Acesso em: 19 de setembro de 2025.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Grafia Braille para a língua portuguesa**. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/ibc/pt-br/pesquisa-e-tecnologia/materiais-especializados-1/livros-em-braille-1/o-sistema-braille-arquivos/grafia-braille-para-a-lingua-portuguesa-pdf.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.

OLIVEIRA, J. *et al.* Brailletype: Unleashing braille over touch screen mobile phones. In: **Human-Computer Interaction – INTERACT 2011**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. (Lecture Notes in Computer Science, v. 6946).

PARIDA, M.; SINHA, M.; BASU, A. Unlocking access: Can audio replace odia braille in rural india's post-pandemic shift to online learning? In: **2024 IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)**. [S.l.]: IEEE, 2024.

ROMERO, M. *et al.* Brailletouch: Designing a mobile eyes-free soft keyboard. In: **Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '11)**. New York, NY, USA: ACM, 2011. p. 707–709.

Shopping do Braille. **Imagen da Máquina de Escrever em Braille Perkins**. Brasil: [s.n.], 2025. Online. Disponível em: <https://shoppingdobraille.com.br/produtos/maquina-de-escrever-em-braille/>. Acesso em: 19 de setembro de 2025.

SîRBU, V. H.; ŢERBAN, I.; ROŞCA, I. C. Braille keyboard for people with low vision. In: **2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)**. Iasi, Romania: IEEE, 2019.

VIGINHESKI, L. V. M. *et al.* O sistema braille e o ensino da matemática para pessoas cegas. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 20, n. 4, p. 903–916, 2014.

APÊNDICE A – REPOSITÓRIO DE CÓDIGOS

Os códigos fonte das bibliotecas modificadas para suportar formato ABNT no ESP32S3 via USB HID Keyboard e também do Teclado Braille Touch estão disponíveis em: <https://github.com/VictorMRMP/Maquina-Braille-Touch.git>