

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE MACEIÓ

CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

ARTHUR DO REGO BARROS FEIJÓ

TCBK40: Desenvolvimento e Otimização de um Teclado Mecânico Customizado com
Integração de Firmware QMK e Design Funcional

MACEIÓ, 27 DE Novembro DE 2024.

Arthur do Rego Barros Feijo

**TCBK40: Desenvolvimento e Otimização de um Teclado Mecânico Customizado com
Integração de Firmware QMK e Design Funcional**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro
Universitário de Maceió como um
dos pré-requisitos para a obtenção
de grau de Bacharel em
Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Victor Costa (Com Titulação)

Maceió, AL

2023

Arthur do Rego Barros Feijó

**TCBK40: Desenvolvimento e Otimização de um Teclado Mecânico Customizado com
Integração de Firmware QMK e Design Funcional**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro Universitário de Maceió como um
dos pré-requisitos para a obtenção de grau de
bacharel em Engenharia **Mecatrônica**.

Aprovado em ____ / ____ / ____.

Banca Examinadora

Victor Costa com Titulação
Centro Universitário de Maceió

Nome do Membro Interno com Titulação
Centro Universitário de Maceió

Nome do Professor ou Membro Externo com Titulação
Nome da Instituição Superior de Ensino ou Empresa

DEDICATÓRIA

Este trabalho se tornou um marco em minha vida em vários sentidos. Vindo primeiramente no pensamento de me desafiar, ver até que ponto naquele momento eu conseguiria me superar sobre aquele desafio, e assim é a nossa vida. Comecei a aprender a apreciar a trajetória, apreciar o processo, com as dificuldades e me mantendo firme a superá-las, não desistindo e procurando aprimorar cada vez mais, a recompensa vem.

Este trabalho é resultado de não duvidar de si mesmo, lutar a seus sonhos mesmo em momentos difíceis e um resultado onde você mesmo cria o seu mérito, muitas vezes as coisas na vida veem de maneira em que até mesmo você duvida de seu próprio potencial, você não vê o tanto que você passou e fez acontecer, e aí vem as pessoas de seu convívio para grande parte das vezes bater em suas costas e falar que aquilo que criou foi algo que acendeu uma luz.

Este trabalho é dedicado a todos que se sentem inseguros em criar e buscar algo mesmo que sozinhos, enfrentar desafios de cabeça erguida, caindo mas sem exitar em levantar, a todos que buscam criar, elaborar, escrever e realizar sua história e sonhos.

Dedico esse trabalho a todos que fizeram e fazem parte de minha jornada de querer criar, impactar, mostrar um pouco de meu potencial, a minha tentativa de entregar o melhor. Obrigado em especial minha mãe, Cristiana do Rego Barros Braga que nunca duvidou de mim e me ajudou nos momentos onde mais queria fazer acontecer mas não possui meios de realizar, nunca me negou em eu seguir no que queria, sempre esteve e está ao meu lado. A todas irmãs de minha mãe, Ana Cristina do Rego Barros Braga e Adriana do Rego Barros Braga por participarem e observarem toda minha evolução neste e em outros projetos e como pessoa. Meu pai João Batista Dantas Feijó, que proporcionou toda estrutura e estabilidade financeira a minha carreira e minha constante busca em criar meu futuro.

Aos meus amigos, em especial João Paulo Almeida, Queops Firmino Costa, Cayo Ribeiro, Thomas Morgan, Morgan Haggar, Eric Chiang, Uziel Ferreira Dos Santos, Roberto Kunzler, Russam Cerqueira Lima, que me abraçaram pelo que sou, aceitaram quem eu sou e torcem por mim em tudo que procuro fazer, me trazendo confiança, auto-estima e me fazem me olhar como alguém importante. Letícia Gadelha Braga onde me apoiou, acreditou em mim e viu meu potencial, acendeu meu lado emocional me tornando mais humano.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do teclado TCBK40, um projeto customizado voltado para entusiastas de tecnologia, que integra um design ergonômico, funcionalidades avançadas e um foco em acessibilidade e personalização. O processo envolveu desde a criação do layout no Keyboard Layout Editor até a modelagem e fabricação de uma estrutura robusta e visualmente atraente em acrílico transparente. O firmware QMK foi utilizado para permitir a customização total das teclas, a implementação de recursos avançados, facilidade de personalização, mais utilizado pelos entusiastas por ser Open-Source, iluminação RGB configurável e camadas otimizadas para diferentes usos.

O projeto enfrentou desafios como ajustes no espaçamento entre teclas de diferentes tamanhos, problemas de iluminação RGB e funcionalidades não previstas no mapa inicial. Soluções criativas foram empregadas, como o uso de ferramentas especializadas, por exemplo, o SwillKB Builder para o design da placa de switches e scripts personalizados para ajustes no firmware. O case foi projetado para permitir a substituição dos switches e acomodar opções de personalização adicionais, como fabricação de componentes em impressão 3D.

O resultado é um teclado mecânico compacto de 40%, com alta eficiência e adaptabilidade, alinhado às necessidades do público-alvo e com custo-benefício competitivo. O trabalho demonstra a viabilidade de criar periféricos funcionais e personalizados utilizando métodos acessíveis e ferramentas modernas de desenvolvimento.

Palavras-chave: Teclado Mecânico, Customização, Firmware QMK, Iluminação RGB, Product Design.

ABSTRACT

This work presents the development of the TCBK40 keyboard, a custom project designed for technology enthusiasts that integrates ergonomic design, advanced functionality, and a focus on accessibility and personalization. The process ranged from creating the layout in the Keyboard Layout Editor to modeling and manufacturing a robust and visually appealing structure in transparent acrylic. The QMK firmware was used to enable full key customization and implement advanced features such as configurable RGB lighting and optimized layers for various uses.

The project faced challenges, such as adjustments in the spacing between keys of different sizes, RGB lighting issues, and unplanned functionalities in the initial keymap. Creative solutions were employed, including the use of specialized tools like the SwillKB Builder for switch plate design and custom scripts for firmware adjustments. The case was designed to allow for switch replacement and accommodate additional customization options, such as 3D-printed components.

The result is a compact 40% mechanical keyboard with high efficiency and adaptability, aligned with the needs of the target audience and offering competitive cost-effectiveness. This work demonstrates the feasibility of creating functional and personalized peripherals using accessible methods and modern development tools.

Keywords: Mechanical Keyboard, Customization, QMK Firmware, RGB Lighting, Product Design.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Mecanismo do teclado IBM Modelo M..... | 13 |
| Figura 2 - Interruptor Linear..... | 13 |
| Figura 3 - Teclado TCBK40 Aproximado..... | 15 |
| Figura 4 - Layout Final TCBK40..... | 16 |
| Figura 5 - Layout redenizado Teclado TCBK40..... | 17 |
| Figura 6 - Esquemático Teclado TCBK40 no Kicad..... | 23 |
| Figura 7 - PCB TCBK40 no visualizador 3D, Kicad..... | 23 |
| Figura 8 - Plate e Placa PCB no Fusion 360..... | 24 |
| Figura 9 - Elaboração da matrix de conexão das teclas..... | 31 |
| Figura 10 - Arquivo keyboard.[h] do firmware desatualizado..... | 32 |
| Figura 11 - Layout de camadas “default” final para os teclados TCBK40..... | 33 |
| Figura 12 - Representação frontal 3D da PCB dos teclados TCBK40 no Kicad... | 36 |
| Figura 13 - Representação do verso 3D da PCB dos teclados TCBK40 no Kicad... | 36 |
| Figura 14 - Datasheet com as dimensões e especificações dos switches Cherry MX fornecido pela SparkFun..... | 37 |
| Figura 15 - Algoritmo criado para resetar a tonalidade e saturação do sistema RGB..... | 41 |
| Figura 16 - Tela QMK MSYS para compilação do firmware..... | 42 |
| Figura 17 - Teclado TCBK40 Simulado no Fusion360..... | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Comparação entre Modelo M e Interruptor Linear..... | 16 |
| Tabela 2 – Comparativo entre Microcontroladores..... | 29 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 2. OBJETIVOS..... | 12 |
| 2.1. Objetivo Geral..... | 12 |
| 2.2. Objetivos Específicos..... | 12 |
| 3. ASPECTOS TEÓRICOS..... | 13 |
| 3.1. Teclados Mecânicos..... | 13 |
| 3.2. Decorrer da História: A sua origem..... | 13 |
| 3.3. Firmware QMK..... | 15 |
| 3.4. Importância do Design no produto..... | 16 |
| 3.5. Ergonomia e Usabilidade..... | 16 |
| 3.6. Necessidades especiais..... | 17 |
| 3.6.1. O Uso de Camadas em Teclados Mecânicos..... | 17 |
| 3.6.2. Tamanhos de Teclas e Ergonomia..... | 17 |
| 3.7. Iluminação RGB..... | 19 |
| 3.7.1. SK6812, O LED RGB escolhido..... | 19 |
| 3.8. Importância da iluminação do teclado..... | 20 |
| 3.9. Aplicação do Anti-ghosting..... | 21 |
| 3.9.1. 1N4148 Through hole, porque não a escolha dos SMD's?..... | 22 |
| 3.10. KICAD..... | 23 |
| 3.11. Fusion 360..... | 24 |
| 3.12. ATMega32U4..... | 25 |
| 3.12.1. Arduino Pro Micro: Uma Plataforma Baseada no ATMega32u4..... | 26 |
| 3.12.2. Porque o uso do Pro Micro (ATMega32U4)?..... | 27 |
| 4. METODOLOGIA..... | 29 |
| 4.1. Estrutura do Projeto, uma Abordagem Iterativa..... | 29 |
| 4.2. Fase de Pesquisa e Planejamento..... | 30 |
| 4.3. Estudo do esquemático..... | 31 |
| 4.4. Construção do Firmware QMK..... | 32 |
| 4.5. Ajustes e aprimoramento..... | 34 |
| 4.5.1. Layout de teclas, otimização no uso..... | 34 |
| 4.5.2. Aprimorando o Design da Placa de Switches com o Keyboard Layout Editor.. | 35 |
| 4.6. Documentação..... | 35 |
| 5. Resultados e discussões..... | 35 |
| 5.1. Desenvolvimento do hardware..... | 36 |
| 5.2. Espaçamento dos teclados..... | 37 |
| 5.3. Escolha dos Materiais..... | 39 |
| 5.4. Problemas encontrados e soluções aplicadas..... | 40 |
| 5.4.1. Case..... | 40 |
| 5.4.2. Alinhamento dos Switches e Design da Placa..... | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 5.4.3. Iluminação RGB..... | 41 |
| 5.4.4. Melhoria no mapeamento de teclas..... | 42 |
| 5.4.5. Firmware..... | 43 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 44 |
| 6.1. Sugestão para trabalhos futuros..... | 44 |
| Referências..... | 45 |

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, a personalização de dispositivos tecnológicos tem se tornado uma tendência crescente entre os entusiastas e profissionais de diversas áreas. Entre esses dispositivos, os teclados mecânicos destacam-se pela sua capacidade de oferecer uma experiência de digitação superior, unindo estética e funcionalidade. Este trabalho propõe o desenvolvimento do TCBK40, um teclado mecânico personalizado que combina design inovador e tecnologias modernas como o firmware QMK, para atender às necessidades específicas de usuários que buscam uma experiência otimizada em tarefas cotidianas, trabalho, estudos, hobbies, em um pacote compacto mas de alta performance.

O teclado mecânico TCBK40 foi projetado com a intenção de proporcionar não apenas uma interface de entrada eficiente, mas também uma estética visual agradável. A escolha de componentes, como a placa Pro Micro e switches mecânicos, aliada a um layout cuidadosamente elaborado, resulta em um produto que reflete tanto a personalidade do usuário quanto a versatilidade necessária para diferentes aplicações, deixando o projeto aberto a diferentes ideias e diferentes investimentos. Além disso, a utilização de materiais como acrílico transparente permite a exposição dos componentes internos, valorizando o design e facilitando a manutenção.

Este projeto aborda não apenas o aspecto técnico do desenvolvimento do teclado, mas também as dificuldades enfrentadas durante o processo, como a montagem e criação da PCB, a programação do firmware e a integração de recursos como a iluminação RGB e camadas de uso do teclado para integrar as funcionalidades requisitadas. A implementação de soluções eficazes para esses desafios é um dos focos principais deste trabalho, ressaltando a importância da pesquisa e do aprendizado contínuo na área de eletrônica juntamente com o design.

Por meio deste trabalho, espera-se contribuir para a comunidade de entusiastas de teclados mecânicos, tecnologia e a união da engenharia com design de produto, oferecendo um produto que não só atende às demandas funcionais, mas também enriquece a experiência do usuário. O desenvolvimento do TCBK40 representa, portanto, um esforço para unir tecnologia, design e personalização, criando um teclado que se destaca no mercado e que proporciona um prazer inigualável ao digitar.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um teclado mecânico personalizado, denominado TCBK40, utilizando tecnologias modernas de hardware e firmware (QMK), com design estético e funcional adaptado para entusiastas e usuários diários, visando oferecer uma experiência completa e otimizada para diversas atividades como trabalho, estudo, hobbies e uso tecnológico, e criar meios de personalização que tornem o projeto com ótima modularidade e custo benefício de manufatura.

2.2. Objetivos Específicos

Desenvolvimento do PCB e Esquema

- Projetar um PCB personalizado utilizando o software *KiCad*, com footprint da placa Pro Micro e sistema de matriz diagonal para otimizar o uso de pinos GPIO.
- Utilizar o *Keyboard Layout Editor* (KLE) para definir o layout e espaçamento das teclas.
- Identificar e rotular linhas e colunas no PCB para garantir a correta conexão e posicionamento dos switches.

Design e Construção do Case

- Desenvolver um case personalizado no *Fusion 360* com estrutura estável utilizando acrílico transparente para a placa de switches, expondo os componentes internos.
- Garantir o alinhamento e estabilidade da estrutura com o uso de espaçadores e recortes nos cantos da placa para fácil substituição dos switches.

Resolução de Problemas e Melhorias

- Identificar e corrigir falhas na iluminação RGB e no registro de teclas, revisando o firmware, ajustando o mapa de teclas e realizando testes detalhados de funcionamento.
- Ajustar a consistência de brilho e cor dos LEDs, garantindo o alinhamento correto e melhorias no firmware para solucionar inconsistências.

Desenvolvimento de Firmware e Keymap

- Implementar um firmware *QMK* personalizado para suportar o layout de matriz diagonal e controles de iluminação RGB.
- Refinar o keymap para adequar o layout às preferências do usuário, incluindo camadas funcionais e teclas essenciais para uso diário e hobbies.

3. ASPECTOS TEÓRICOS

3.1. Teclados Mecânicos

Os teclados mecânicos são dispositivos de entrada que utilizam switches individuais para cada tecla, ao contrário dos teclados de membrana, que geralmente têm uma construção mais simples e menos durável. Os switches mecânicos podem ser classificados em três categorias principais: lineares, táteis e clicky. Cada tipo oferece uma experiência de digitação distinta, variando em resistência e feedback tátil, o que permite ao usuário escolher a opção que melhor se adapta ao seu estilo de digitação e preferências pessoais (Jiang et al., 2020).

3.2. Decorrer da História: A sua origem

Os teclados mecanicos tiveram sua origem devido as primeiras máquinas de escrever do século XIX onde Christopher Latham em 1868 criou sua primeira máquina de escrever em sucesso comercial, conhecida como “Sholes and Glidden Type-Writer” onde marca o nascimento do feedback tátil e sonoro dos teclados mecanicos.

Conforme o avanço da tecnologia e nos mecanismos voltados aos teclados mecanicos, surgiu um marco significativo criado pela IBM na década de 1980 chamado de “Mola de Flambagem” através do teclado IBM Modelo M, mecanismo que funcionava a partir de uma mola enrolada que dobrava quando era pressionada (Figura 1), sistema esse que se assemelha bastante aos interruptores atuais dos tipos lineares (Figura 2).

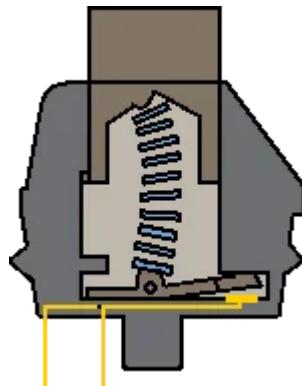


Figura 1 - Mecanismo do teclado IBM Modelo M

Fonte: “Sumaksanyi”, Reddit, 2023.

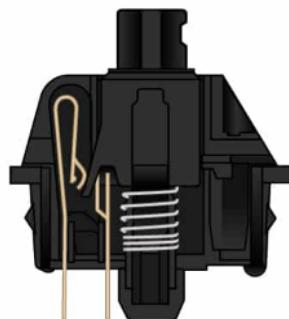


Figura 2 - Interruptor Linear

Fonte: Adaptado de Mech keybs, 2021

Tabela 1 – Comparação entre Modelo M e Interruptor Linear

| Característica | Modelo M (Figura 1) | Interruptor Linear (Figura 2) |
|-----------------------|---------------------|-------------------------------|
| Tipo de Mola | Mola de Flambagem | Mola Linear |
| Movimento de Ativação | Curvatura da mola | Compressão direta |
| Ano de introdução | Década de 1980 | Atual |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na década de 1990, uma nova abordagem surgiu no mercado dos teclados mecânicos - o teclado de membrana ou “membranoso”. Este tipo de teclado funcionava através de uma membrana fina e flexível com camadas condutoras para registrar as teclas digitadas. Entretanto, por mais que fornecesse uma experiência de digitação mais silenciosa, pecava em seu feedback tátil satisfatório, sua durabilidade e seu aspecto esponjoso ao pressionar as teclas, sendo assim, veio novamente a ascensão dos teclados mecânicos novamente sem tirar o mérito dos teclados membranosos que são usados ainda até os dias de hoje por seu preço acessível total.

À medida que a procura por teclados mecanicos crescia, a necessidade de aprimorar seu desempenho e funcionalidade tanto para o mundo dos jogos tanto para uso diário veio a tona. Assim vieram os desenvolvimentos de diferentes mecanismos de interruptores, sendo uma delas e mais conhecida vindo da década de 1980 por uma empresa alemã chamada Cherry GmbH, o switch Cherry MX, que introduziu diferentes tipos de interruptores de diferentes sensações audíveis e táteis que atendem à preferência de diferentes usuários.

No mundo dos jogos se tornou mais notável o uso dos teclados mecânicos devido a busca de maior precisão, durabilidade e opções para personalizar e foi a partir disso que novos recursos foram introduzidos aos teclados mecânicos como a tecnologia Anti-Ghosting e N-key que permitem os jogadores pressionarem múltiplas teclas simultaneamente que ofereceu aos jogos entradas precisas e reduzindo erros durante as sessões e aprimorou a performance ao uso diário ao escrever de maneira mais rápida que era limitada sem tais recursos.

A personalização principalmente nos dias atuais se tornou uma necessidade e uma marca registrada para o uso de maneira geral, vindo principalmente do mercado de jogos, vindo assim recursos como iluminação RGB, teclas macro, designs modulares, ergonomia aplicada, programabilidade e designs únicos, fazendo com que a experiência de uso se tornasse mais satisfatória.

3.3. Firmware QMK

O firmware QMK (Quantum Mechanical Keyboard) é uma plataforma de código aberto amplamente utilizada para a personalização de teclados mecânicos. Ele permite a configuração e programação de funcionalidades avançadas, como mapeamento de teclas, macros e controle de iluminação RGB. A flexibilidade do QMK possibilita que os

desenvolvedores ajustem o comportamento do teclado de acordo com suas necessidades específicas, tornando-o uma escolha popular entre entusiastas de teclados personalizados (Daskalakis et al., 2021).

3.4. Importância do Design no produto

O design de produtos envolve a criação de soluções que atendam às necessidades dos usuários, unindo estética e funcionalidade. O design do teclado TCBK40 foi fundamentado em princípios de ergonomia e usabilidade, buscando proporcionar uma experiência confortável e eficiente para o usuário. O uso de ferramentas de design, como o Keyboard Layout Editor, e softwares de modelagem 3D, como o Fusion 360, foram essenciais para a criação do layout e estrutura do teclado, garantindo um encaixe perfeito dos componentes (Daly et al., 2019).

A necessidade do design envolve principalmente a parte estética tendo como base a sua funcionalidade e objetivo, no projeto em sua base se teve o objetivo de ter a possibilidade de ser Modular, robusto, de custo variável para diferentes públicos e que seja compacto mantendo sua performance e uso completo sem dificuldades e o design vem como ferramenta para implementar tais pontos a estética para o desenvolvimento do projeto final.



Figura 3 - Teclado TCBK40 Aproximado

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

3.5. Ergonomia e Usabilidade

A ergonomia é um campo de estudo que busca otimizar a interação entre o usuário e o sistema, considerando aspectos físicos, cognitivos e ambientais. No contexto dos teclados

mecânicos, a ergonomia é crucial para evitar lesões e fadiga durante o uso prolongado. O TCBK40 foi projetado levando em conta a disposição das teclas, a altura do teclado e a resposta tátil dos switches, visando proporcionar conforto e eficiência ao usuário (Karwowski et al., 2020).

3.6. Necessidades especiais

Teclados mecânicos tradicionais, como os teclados 100%, possuem cerca de 104 a 108 teclas, incluindo o bloco alfanumérico, teclado numérico, setas e teclas de função (F1-F12). Em contrapartida, layouts compactos, como o de 40%, exigem soluções criativas para integrar funcionalidades adicionais em um espaço significativamente reduzido utilizando as teclas de diferentes tamanhos para poder otimizar seu uso.

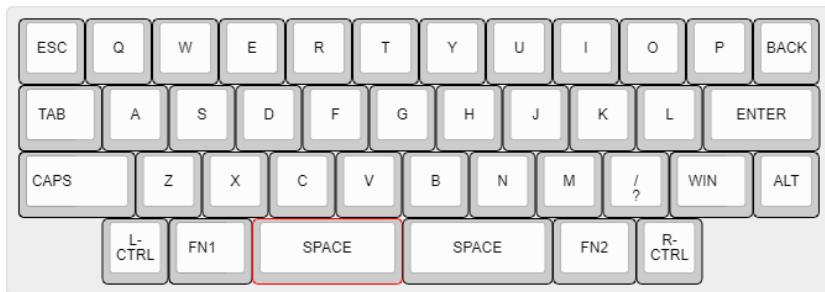


Figura 4 - Layout Final TCBK40

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

3.6.1. O Uso de Camadas em Teclados Mecânicos

As camadas (ou layers) podem ser entendidas como "sobreposições virtuais" que alteram a função atribuída a cada tecla do teclado. Cada camada é como um novo mapa de teclas, que pode ser ativado ou desativado dinamicamente, permitindo que as teclas desempenhem diferentes funções conforme o contexto. As camadas permitem ao usuário acessar diversas funções, atalhos e configurações personalizadas utilizando combinações de teclas, o que é essencial em projetos menores ou altamente customizáveis.

3.6.2. Tamanhos de Teclas e Ergonomia

O tamanho das teclas e o layout de um teclado mecânico influenciam diretamente na experiência do usuário, especialmente em relação à ergonomia e funcionalidade. As teclas em um teclado mecânico são medidas em unidades (u), sendo 1u a largura padrão de teclas como

letras e números. Teclas modificadoras, como Ctrl, Alt e Shift, geralmente têm tamanhos maiores, como 1.25u ou 1.5u, enquanto teclas especiais, como Enter e Backspace, podem medir até 2.75u. Já a barra de espaço, em layouts tradicionais de 100%, ocupa uma área considerável, com dimensões entre 6.25u e 7u, mas muitas vezes não aproveita esse espaço para funções adicionais, limitando sua utilidade (CHERRY, 2019).

A introdução da barra de espaço dividida em layouts compactos, como teclados de 60% ou 40%, permite uma maior personalização e otimização do espaço. Em vez de uma única barra grande, ela é dividida em várias teclas menores (por exemplo, 2u + 2u + 2.25u), que podem ser configuradas para diferentes funções. Isso possibilita que o usuário atribua comandos adicionais, como Backspace, Enter ou alternância de camadas, diretamente às partes divididas da barra, melhorando a ergonomia e eficiência (LISTER, 2020). Essa configuração é especialmente vantajosa para programadores, gamers e redatores, que podem reduzir movimentos repetitivos e acessar funções com mais facilidade.

Além disso, a barra de espaço dividida se integra perfeitamente ao uso de camadas. Cada tecla pode desempenhar diferentes papéis dependendo da camada ativa, permitindo uma grande variedade de personalizações sem sacrificar espaço físico no teclado (Figura 5). Por exemplo, uma tecla da barra pode alternar para uma camada que ativa atalhos multimídia, enquanto outra pode ser usada para comandos específicos de software. Essa flexibilidade, porém, requer um período de adaptação, especialmente para usuários acostumados a teclados tradicionais. Após esse período, os ganhos em ergonomia e produtividade se tornam evidentes (HAATAJA, 2022).



Figura 5 - Layout rederizado Teclado TCBK40

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

3.7. Iluminação RGB

A iluminação RGB nos teclados mecânicos não apenas melhora a estética do dispositivo, mas também pode aumentar a funcionalidade, permitindo que os usuários personalizem a iluminação de acordo com suas preferências. A implementação de animações e efeitos de iluminação pode ajudar na identificação das teclas durante ambientes de baixa luminosidade, além de proporcionar um apelo visual que atrai muitos entusiastas de tecnologia (Kumar et al., 2021).

3.7.1. SK6812, O LED RGB escolhido

Os SK6812 foram introduzidos como uma alternativa aos LEDs tradicionais RGB, especificamente os WS2812, oferecendo uma solução mais eficiente e versátil. Originalmente, os WS2812 eram populares devido à sua capacidade de controlar cada LED individualmente em um arranjo de tiras ou placas de LEDs, proporcionando iluminação personalizada em várias cores e efeitos. No entanto, os SK6812 expandiram essa funcionalidade ao incluir não apenas controle RGB, mas também a possibilidade de ajustar a intensidade de cada cor e o comportamento do LED em tempo real.

Esses LEDs são conhecidos como "invertidos", o que significa que a luz é emitida a partir da parte inferior do LED, ao contrário dos LEDs convencionais, onde a luz é emitida de cima. Essa característica ajuda a evitar interferências na colocação de switches no PCB dos teclados mecânicos, mantendo a estética e a modularidade do design do teclado.

O SK6812 se tornou especialmente popular em teclados mecânicos a partir de 2015, quando os fabricantes começaram a perceber o crescente desejo por personalização e efeitos visuais mais complexos em dispositivos periféricos, especialmente no mercado gamer. Sua flexibilidade e facilidade de integração com microcontroladores como o ATmega32U4 (frequentemente usado em teclados mecânicos) fizeram com que se tornassem uma escolha preferida entre os fabricantes de teclados, principalmente por sua capacidade de oferecer controle individualizado de cada LED, permitindo efeitos como arco-íris, ondulações e outras animações dinâmicas.

O SK6812 é um LED RGB SMD (Surface-Mounted Device) com um chip controlador integrado. Esse chip permite que cada LED seja controlado independentemente, o que significa que pode-se ajustar a cor e o brilho de cada LED em uma matriz de teclas de forma

precisa e eficiente. Isso é realizado por meio de um protocolo de comunicação serial, onde os LEDs são conectados em série, com o sinal de controle transmitido de um LED para o próximo.

Nos teclados mecânicos, os SK6812 são usados para iluminar as teclas de forma que o usuário possa personalizar a cor e o padrão de iluminação de acordo com suas preferências. A integração do SK6812 com o firmware QMK (ou outros firmwares personalizados) permite criar efeitos de iluminação que não apenas melhoram a estética, mas também a funcionalidade, como destacar teclas específicas durante o jogo ou iluminar as teclas de atalho.

A utilização desses LEDs em teclados mecânicos foi um grande avanço para os entusiastas de periféricos, pois ofereceu uma maneira de personalizar a experiência do teclado com iluminação vibrante e dinâmica, enquanto mantinha o design compacto e funcional do dispositivo.

3.8. Importância da iluminação do teclado

A iluminação nos teclados mecânicos tem ganhado cada vez mais importância, não apenas por sua funcionalidade prática, mas também pelo impacto estético e ergonômico. O uso de LEDs, especialmente LEDs RGB, permite personalização e uma experiência visual imersiva para os usuários, ao mesmo tempo em que pode oferecer benefícios adicionais em termos de usabilidade. Abaixo, destaco alguns pontos chave sobre a importância da iluminação nos teclados mecânicos:

- 3.8.1. Estética e Personalização:** A iluminação RGB permite uma ampla gama de personalização, tanto para fins estéticos quanto funcionais. Usuários podem ajustar as cores e efeitos de iluminação de acordo com preferências pessoais ou ambiente de uso, criando uma experiência única. Isso é especialmente relevante em ambientes de jogos, onde a atmosfera visual pode melhorar a imersão (Fitzgerald et al., 2020).
- 3.8.2. Acessibilidade e Visibilidade:** A iluminação pode melhorar a legibilidade das teclas, especialmente em ambientes com pouca luz. A iluminação de fundo pode ajudar a identificar as teclas rapidamente, facilitando o uso de teclados em condições de pouca visibilidade, o que

é particularmente útil para pessoas com dificuldades visuais (Haines et al., 2018).

- 3.8.3.** Indicadores Funcionais: A iluminação também pode ser usada para sinalizar funções e modos do teclado. Por exemplo, teclas iluminadas podem indicar a ativação de modos de jogo, funções de atalho ou outras configurações específicas, proporcionando uma interação mais intuitiva e eficiente para o usuário (Nielsen & MacLachlan, 2017).
- 3.8.4.** Eficiência Energética e Durabilidade: O avanço tecnológico nos LEDs, especialmente nos LEDs SMD (Surface-Mounted Devices), proporciona uma iluminação mais eficiente em termos de consumo de energia e durabilidade. Isso é relevante para teclados mecânicos que buscam não só alto desempenho, mas também uma longa vida útil, otimizando a experiência do usuário a longo prazo (Zhao et al., 2019).

3.9. Aplicação do Anti-ghosting

O *anti-ghosting* é uma tecnologia utilizada em teclados mecânicos e outros tipos de teclados para prevenir o fenômeno conhecido como *ghosting*, que ocorre quando múltiplas teclas são pressionadas simultaneamente e, devido à limitação na capacidade de detecção do teclado, uma tecla fantasma é registrada erroneamente como pressionada. Em teclados mecânicos, especialmente em modelos com matrizes de teclas, o *anti-ghosting* assegura que apenas as teclas realmente pressionadas sejam registradas, melhorando a precisão da digitação e a confiabilidade das entradas.

O fenômeno do ghosting: O *ghosting* ocorre em teclados que utilizam matrizes para a detecção de teclas. Uma matriz de teclado consiste em linhas e colunas de fios condutores, e quando uma tecla é pressionada, ela fecha o circuito entre uma linha e uma coluna, permitindo que o microcontrolador registre a entrada. No entanto, quando várias teclas são pressionadas simultaneamente, há a possibilidade de que o circuito entre colunas e linhas seja interpretado de maneira errônea, fazendo com que uma tecla não pressionada seja registrada como pressionada. Esse erro é conhecido como *ghosting* (fantasma).

Como o anti-ghosting funciona: O *anti-ghosting* resolve esse problema utilizando diodos em cada tecla ou linha de teclas. Os diodos, ao serem instalados em série com cada interruptor de tecla, asseguram que, quando várias teclas são pressionadas simultaneamente, o circuito para cada tecla seja fechado independentemente, evitando que uma tecla fantasma

seja registrada. Em teclados mecânicos modernos, especialmente aqueles com tecnologias mais avançadas, o *anti-ghosting* é frequentemente combinado com recursos como *N-key rollover* (capacidade de pressionar várias teclas simultaneamente e registrá-las corretamente) para garantir que todas as teclas pressionadas sejam corretamente detectadas, sem interferências.

Aplicação em teclados mecânicos: Em teclados mecânicos, o *anti-ghosting* é essencial para jogos e tarefas de digitação que exigem a pressão simultânea de várias teclas. Nos jogos, por exemplo, é comum que os jogadores precisem pressionar várias teclas ao mesmo tempo (como movimentos e combinações de habilidades), e a ausência do *anti-ghosting* pode resultar em entradas incorretas, afetando o desempenho do jogador.

3.9.1. 1N4148 Through hole, porque não a escolha dos SMD's?

O diodo 1N4148 é um diodo de comutação rápida amplamente utilizado em circuitos eletrônicos, incluindo teclados mecânicos, devido à sua capacidade de conduzir rapidamente em uma direção e bloquear a corrente na direção oposta. Nos teclados mecânicos, especialmente em matrizes de teclas, o 1N4148 é utilizado para implementar a tecnologia de *anti-ghosting*, garantindo que a entrada de múltiplas teclas simultâneas seja registrada corretamente, sem erros de "tecla fantasma".

Em teclados mecânicos, as teclas são organizadas em uma matriz, onde linhas e colunas de fios se cruzam. Quando uma tecla é pressionada, ela fecha o circuito entre uma linha e uma coluna, permitindo que a entrada seja registrada. No entanto, quando várias teclas são pressionadas simultaneamente, ocorre o risco de interferência nos sinais, gerando entradas erradas (*ghosting*). Para resolver esse problema, os diodos 1N4148 são colocados em série com cada tecla na matriz. Esses diodos permitem que cada tecla seja registrada independentemente, mesmo que outras teclas sejam pressionadas ao mesmo tempo. Como resultado, o circuito de cada tecla é isolado, impedindo o fenômeno do *ghosting*.

O diodo 1N4148 é amplamente utilizado por ser um diodo de comutação rápida, o que significa que ele pode reagir rapidamente às mudanças nos sinais de entrada, sendo ideal para teclados mecânicos, onde a resposta rápida é crucial. Sua pequena embalagem SMD (Surface Mount Device) permite que ele seja facilmente integrado nas placas de circuito impresso (PCBs) de teclados, sem ocupar muito espaço. Além disso, o 1N4148 é de baixo custo e de

fácil disponibilidade, tornando-o uma escolha econômica para fabricantes de teclados mecânicos.

Nos teclados mecânicos, o 1N4148 é frequentemente utilizado em matrizes de teclas, com cada tecla equipada com um diodo para garantir a detecção precisa de todas as entradas, mesmo quando múltiplas teclas são pressionadas simultaneamente. O diodo ajuda a manter a integridade do sinal, evitando que entradas indesejadas sejam registradas. Além disso, o diodo 1N4148 também é usado em teclados para implementações de *N-key rollover*, que permite que várias teclas sejam pressionadas simultaneamente e todas sejam registradas corretamente, o que é crucial para jogos e outras aplicações que exigem a pressão de várias teclas ao mesmo tempo.

Estes diodos foram escolhidos primeiramente pela sua aplicação no design do produto, por ter em mente um design focado e puxado ao cenário *Sci-fi*, ou seja, em uma característica focado na própria tecnologia em si, o fato de serem colocados na parte superior e a mostra na PCB final dos teclados TCBK40, se tornou uma escolha primordial e superior aos diodos SMD, por apresentarem uma característica semelhante a fusíveis e remetendo a conexões de sistemas embarcados.

3.10. KICAD

O KiCad é uma suíte de software de código aberto amplamente utilizada para o design e desenvolvimento de circuitos eletrônicos. Ele foi criado para ajudar engenheiros, técnicos e entusiastas de eletrônica a projetar esquemáticos e criar placas de circuito impresso (PCBs) de forma eficiente e com alto nível de personalização. Originalmente desenvolvido por Jean-Pierre Charras em 1992, o KiCad passou por várias atualizações e é mantido por uma comunidade ativa de desenvolvedores.

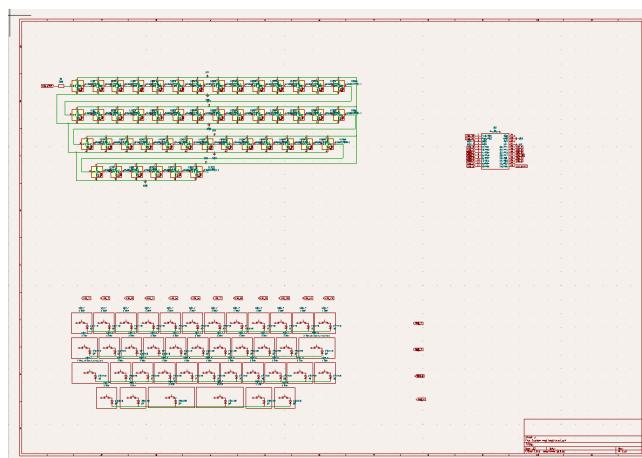


Figura 6 - Esquemático Teclado TCBK40 no Kicad

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Outra funcionalidade de destaque é o visualizador 3D, que exibe o design das PCBs em tempo real, facilitando a inspeção e o ajuste. Além disso, o software oferece suporte extensivo para exportação de arquivos de fabricação, como os formatos Gerber e Drill, aceitos pela maioria das empresas de manufatura.

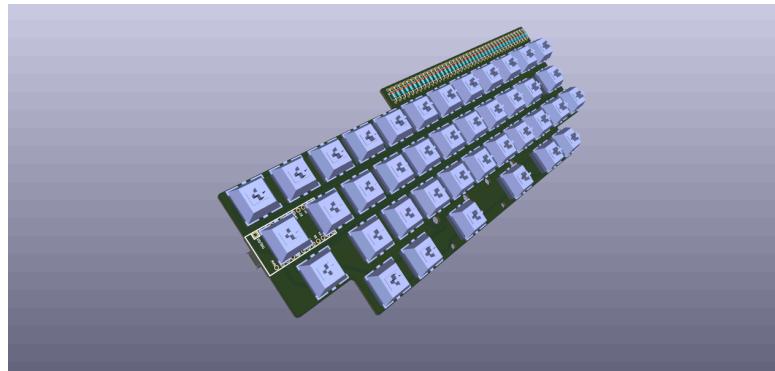


Figura 7 - PCB TCBK40 no visualizador 3D, Kicad

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

Usado por ser um software gratuito e por ter sido descoberto através de um projeto do mesmo ramo, onde foi disponível de maneira open source na plataforma GitHub, fazendo com que o estudo para os teclados TCBK40 sejam iniciados e aprimorados de maneira mais facilitada, através de bibliotecas de símbolos e impressões produzidas pelo mesmo autor.

3.11. Fusion 360

O Fusion 360 é uma ferramenta de modelagem 3D desenvolvida pela Autodesk, amplamente utilizada para design, engenharia e fabricação de produtos. Ele se destaca por sua interface integrada, que combina recursos de modelagem, simulação, fabricação assistida por computador (CAM) e documentação técnica em um único ambiente. É amplamente adotado por profissionais, estudantes e makers devido à sua versatilidade e facilidade de uso.



Figura 8 - Plate e Placa PCB no Fusion 360

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

O Fusion 360 foi uma das ferramentas principais para a produção dos teclados TCBK40, principalmente pela sua capacidade de simular detalhadamente os resultados finais do projeto, trazendo todo tipo de exportação de arquivos para fabricação, ferramentas e atributos de sketch e modelagem que facilitaram o seu desenvolvimento. Importando arquivos Step para o programa se tornou ponto primordial para elaboração do design total e medidas reais para envio direto para fabricação.

3.12. ATMega32U4

O **ATmega32u4** é um microcontrolador AVR de 8 bits desenvolvido pela Microchip Technology, amplamente utilizado em projetos eletrônicos devido à sua versatilidade, baixo consumo de energia e integração com interfaces USB. Este microcontrolador é a base de diversas plataformas, incluindo o Arduino Pro Micro, e é conhecido por sua compatibilidade com sistemas embarcados e dispositivos de entrada, como teclados e mouses (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2024).

O ATmega32u4 possui arquitetura AVR de 8 bits, com uma frequência de operação de até 16 MHz, permitindo alta eficiência no processamento de instruções. Ele conta com 32 KB de memória Flash para armazenamento de programas, 2,5 KB de SRAM para variáveis em tempo de execução e 1 KB de EEPROM para dados não voláteis. Além disso, suporta múltiplas interfaces, como UART, SPI e I²C, e integra uma interface USB nativa, permitindo emulação de dispositivos HID (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2024; SPENCE, 2021).

Com um total de 26 pinos digitais, dos quais 12 possuem capacidade PWM, e 10 pinos analógicos, o ATmega32u4 é amplamente aplicado em dispositivos USB, automação de sistemas e projetos educacionais, como detalhado por Spence (2021).

Tendo todas essas especificações, o ATMEGA32U4 se torna um excelente microcontrolador para aplicações de controles de periféricos USB, Automação de dispositivos e desenvolvimento de dispositivos embarcados, possuindo uma baixa corrente operacional fazendo com que seu uso se torne mais amplo, sua ótima velocidade e simplicidade de uso, se tornando uma das principais opções de uso para o mundo dos teclados mecânicos.

Sua escolha foi devido aos benefícios citados anteriormente mas o maior se inclui a sua alta disponibilidade no mercado e de ter bastante utilizado em placas de desenvolvimento pré-construídas, sendo a escolhida as variantes do Arduino Pro micro, que possui este microcontrolador e entra dentro dos requisitos escolhidos para a produção do teclado mecanico TCBK40, que é sua facilidade de construção e seu custo beneficio, usando a placa de desenvolvimento integrada na PCB final dos teclados, reduzindo bastante o preço e trazendo uma alta disponibilidade na produção e ótima aplicação nos processos chamados de DIY, abrindo um grande leque de opções de uso e vendas no mercado e integrando processos de aprendizagem e customização de acordo com usuário.

3.12.1. Arduino Pro Micro: Uma Plataforma Baseada no ATmega32u4

O Arduino Pro Micro é uma placa de desenvolvimento compacta e versátil, baseada no ATmega32u4, projetada para facilitar a integração do microcontrolador em projetos menores. Ele é amplamente utilizado para automação de sistemas e dispositivos de entrada USB, como teclados mecânicos customizados e controladores MIDI (ARDUINO, 2024; CROFT, 2022).

Com dimensões reduzidas (33 mm x 18 mm), o Pro Micro oferece conectividade USB nativa, permitindo a emulação de dispositivos HID diretamente. Ele está disponível em duas versões: 5V/16 MHz e 3,3V/8 MHz, tornando-se uma opção flexível para diferentes aplicações. A facilidade de programação através do Arduino IDE é um dos motivos para sua ampla adoção (ARDUINO, 2024).

Devido à capacidade de emulação HID do ATmega32u4, o Arduino Pro Micro tornou-se uma escolha popular para o desenvolvimento de teclados mecânicos customizados.

Essa aplicação, abordada por Croft (2022), destaca como a placa permite programar layouts personalizados e implementar teclas de função específicas. Além disso, a interface USB facilita a conexão direta com computadores, eliminando a necessidade de controladores adicionais.

3.12.2. Porque o uso do Pro Micro (ATMEGA32U4)?

Atualmente, temos muitos processadores que podem ser utilizados para criar um teclado personalizado, o que torna a escolha inicial um pouco difícil. Neste projeto, não foi diferente, e os processadores escolhidos foram o ATmega32u4 (placa Pro Micro), o Raspberry Pi Pico (RP2040) e o famoso processador STM32.

Tabela 2 – Comparativo entre Microcontroladores

| Características | Raspberry Pi Pico | STM32 (Ex.: STM32F103) | Arduino Pro Micro (ATmega32u4) |
|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Fabricante | Raspberry Pi Foundation | STMicroelectronics | Arduino (com base no ATmega32u4 da Microchip) |
| Arquitetura | ARM Cortex-M0+ | ARM Cortex-M3 | AVR de 8 bits |
| Clock | 133 MHz | Até 72 MHz | 16 MHz |
| Memória Flash | 2 MB | 64 KB | 32 KB |
| Memória RAM | 264 KB | 20 KB | 2,5 KB |
| Interfaces de Comunicação | I ² C, SPI, UART, USB, CAN | I ² C, SPI, UART, USB, CAN | I ² C, SPI, UART, USB |
| Pinos GPIO | 26 GPIO | Até 37 GPIO (dependendo do modelo) | 26 GPIO (com limitações de funcionalidade) |
| Tensão de | 3,3V | 3,3V | 5V ou 3,3V |

| | | | |
|----------------------------------|---|--|---|
| Operação | | | (dependendo da versão) |
| Suporte USB Nativo | Sim (Dispositivo USB) | Sim (Dispositivo USB) | Sim (Dispositivo HID USB) |
| ADC/DAC | 12 bits (3 ADCs) | 12 bits (16 canais ADC, 2 canais DAC) | 10 bits (10 canais ADC, sem DAC) |
| Capacidade PWM | 16 canais PWM | Até 16 canais PWM | 12 canais PWM |
| Facilidade de Programação | Alta (MicroPython e C/C++ via SDK oficial) | Média (Requer IDEs como STM32CubeIDE ou Keil) | Alta (Arduino IDE) |
| Dimensões (aproximadas) | 51 mm x 21 mm | Varia com o modelo | 33 mm x 18 mm |
| Uso Típico | Projetos educacionais, automação, IoT, robótica | Sistemas embarcados, automação, dispositivos médicos | Teclados customizados, HID USB, projetos educacionais |
| Custo Aproximado | Baixo (cerca de \$4 a \$8 USD) | Médio (depende do modelo, cerca de \$8 a \$15 USD) | Baixo (cerca de \$5 a \$10 USD) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O Raspberry Pi Pico é realmente uma ótima opção como processador principal para uma placa pré-montada a ser adicionada ao TCBK40. Ele possui muitos pinos GPIO, recursos multifuncionais, um processador dual-core Arm Cortex-M0+ e memória interna de 264 kB, com suporte para até 16 MB de flash externo. Além disso, possui recursos I2C e SPI.

O total de GPIOs é mais do que suficiente para criar a série Butter Keyboards, mas possui algumas desvantagens:

- Usa uma conexão micro USB, mas pode ser alterado para USB-C usando um shield, porém isso pode consumir alguns GPIOs.
- É mais difícil encontrar suprimentos para ele no Brasil.
- Utiliza um microprocessador um pouco proprietário, mas hoje em dia a Comunidade QMK tornou possível utilizá-lo no Firmware QMK

O processador STM32 é conhecido por ser um dos processadores mais eficientes em termos de custo, sendo super rápido e oferecendo muitos pinos GPIO para uso. Ele possui 64 KB de memória flash, um cristal interno de 4-16 MHz (porém recomendo o uso de um externo), conexão USART, que é incrivelmente útil, além de conexões SPI e I2C. É um microcontrolador poderoso.

Este é um dos melhores placas de desenvolvimento conhecidos, usados em muitas áreas como impressoras 3D e placas-mãe de máquinas CNC. E para processadores de teclados, é um dos melhores disponíveis. Infelizmente, não foi usado neste projeto apenas porque o ATMEGA32u4 é um processador mais comum de se utilizar e é mais conhecido na área, tornando-o mais acessível para todas as pessoas, mais fácil de encontrar e com mais placas de desenvolvimento pré-construídas disponíveis no mercado. No entanto, a família STM32 será a melhor para um PCB personalizado.

4. METODOLOGIA

4.1. Estrutura do Projeto, uma Abordagem Iterativa

Este projeto foi desenvolvido em várias etapas inter-relacionadas, envolvendo desde a fase de concepção do teclado TCBK40 até sua montagem e testes finais. A metodologia utilizada pode ser descrita como uma abordagem iterativa, na qual os resultados obtidos em cada fase foram constantemente revisados e aprimorados com base em testes e feedback. Pois este projeto teve sua jornada iniciada através de uma PCB personalizada projetada para o teclado TCBK60, o teclado personalizado idealizado de maneira inicial para uso pessoal com características para uso no dia-a-dia.

Entretanto, enfrentando desafios na elaboração de sua PCB com os componentes necessários para funcionamento do ATMEGA32U4, se viu necessário um estudo aprofundado sobre os requisitos de funcionamento do microcontrolador, construção de uma PCB adaptada para aprendizado a programação do firmware QMK e entendimento de Layers e layouts de teclados mecânicos.

A inspiração surgiu ao recordar um antigo projeto de macro-pad, o que despertou a ideia de utilizar uma placa Pro Micro pré-construída. Essa decisão ofereceu várias vantagens, incluindo a conveniência de soldar o Pro Micro ao PCB finalizado e a inclusão de um conector USB-C, conhecido por suas capacidades superiores e ampla popularidade no mercado atualmente.

4.2. Fase de Pesquisa e Planejamento

A primeira etapa consistiu em uma pesquisa exploratória sobre teclados mecânicos, switches, firmware QMK e design de cases. Foram utilizadas fontes online, como artigos acadêmicos, fóruns especializados e tutoriais técnicos. O objetivo principal dessa fase foi compreender os principais componentes, softwares e ferramentas necessários para o desenvolvimento de um teclado mecânico. As ferramentas empregadas incluíram bases de dados acadêmicas, o **Keyboard Layout Editor** para o planejamento do layout das teclas e o **KiCad** para o desenvolvimento dos esquemas elétricos e PCBs. Como resultado, foram definidos os componentes essenciais, como a PCB, o microcontrolador (Pro Micro), os switches mecânicos e os estabilizadores, além de identificar as ferramentas de software adequadas ao projeto.

A fase de design envolveu a criação do layout e do esquema do teclado TCBK40, além da modelagem tridimensional do case e da placa de switches. O **Keyboard Layout Editor** foi utilizado para ajustar o tamanho e a posição das teclas, priorizando aspectos ergonômicos e estéticos. O esquema elétrico foi desenvolvido no **KiCad**, onde se projetaram os símbolos personalizados e a "footprint" para o microcontrolador Pro Micro. A modelagem do case foi realizada no **Fusion 360**, contemplando todas as medidas necessárias para o corte e fabricação. Como resultado, o layout final do teclado e o design do case foram concluídos, permitindo avançar para a fabricação.

Com o layout e esquema prontos, foi realizada a fabricação da PCB, que foi terceirizada. A montagem do PCB foi conduzida manualmente, utilizando um stencil para aplicar a pasta de solda nos componentes SMD. Após essa aplicação, os switches e o microcontrolador foram soldados na PCB. As ferramentas utilizadas nessa etapa incluíram stencil de PCB, estação de solda e pasta de solda. O resultado esperado era um PCB funcional, com todos os componentes eletrônicos e mecânicos operando corretamente.

Após a montagem do hardware, iniciou-se a etapa de desenvolvimento e personalização do firmware do teclado, utilizando o **QMK firmware** como base. Essa fase permitiu a configuração do mapa de teclas, camadas personalizadas e efeitos de iluminação RGB. A implementação incluiu também animações dinâmicas, otimizando a experiência do usuário. Com a conclusão dessa etapa, o firmware passou a controlar todas as funcionalidades do teclado.

Por fim, foi realizada a etapa de testes e validação, na qual o teclado TCBK40 foi completamente avaliado. Cada tecla foi testada manualmente para garantir responsividade e funcionalidade. Além disso, verificou-se a precisão e uniformidade da iluminação RGB, bem como as animações configuradas. Problemas identificados durante essa fase foram corrigidos, resultando em um teclado funcional e pronto para uso, com todas as teclas e recursos de iluminação operando de maneira satisfatória.

Essa abordagem metodológica, com foco na pesquisa, planejamento, design iterativo, fabricação e validação, garantiu o desenvolvimento de um produto final de alta qualidade.

4.3. Estudo do esquemático

O esquemático do teclado TCBK40 foi elaborado de forma direta e bem planejada, com atenção especial ao design e às conexões. Para garantir uma representação precisa dos componentes, foram criados um símbolo personalizado e uma *footprint* específica para a placa Pro Micro, escolhida como a placa pré-montada a ser integrada ao PCB finalizado. Essa escolha facilitou a integração e garantiu compatibilidade com os demais componentes do projeto.

Para definir com precisão o tamanho e a posição de cada *switch* do teclado, foi utilizado o [Keyboard Layout Editor](#). Essa plataforma demonstrou ser uma ferramenta inestimável para visualizar o layout do teclado e realizar os ajustes necessários para alcançar um design otimizado e funcional.

No que diz respeito à conexão da matriz (Figura 9), o esquema foi projetado cuidadosamente para oferecer indicações visuais claras e facilitar a montagem. Todas as linhas e colunas foram rotuladas explicitamente na placa, permitindo verificar e conectar os componentes de maneira eficiente. A conexão horizontal das linhas foi realizada de forma relativamente simples. Contudo, as colunas apresentaram desafios específicos. Para

simplificar a programação e aumentar a eficiência, foi adotado um esquema de conexão em linhas diagonais para as colunas, uma solução que se mostrou prática e eficaz.

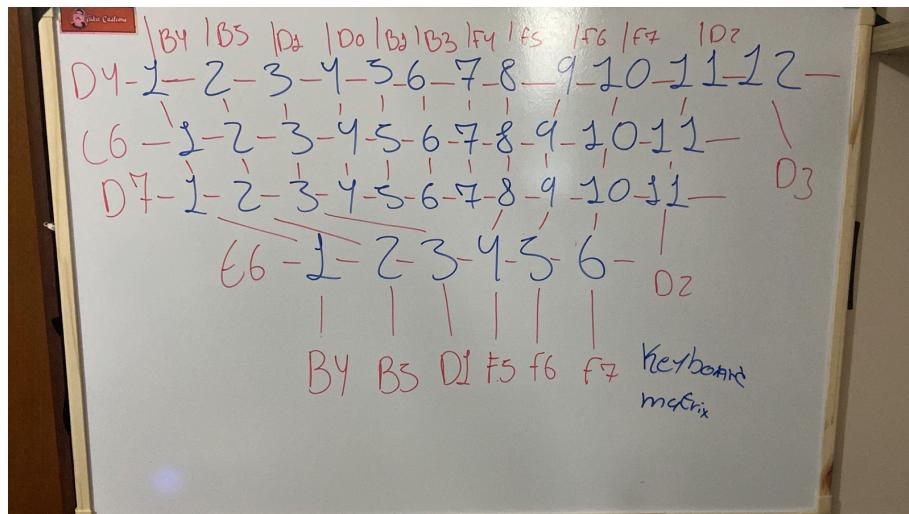


Figura 9 - Elaboração da matrix de conexão das teclas.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

4.4. Construção do Firmware QMK

Desde que o firmware QMK foi escolhido para toda a série *Butter Keyboards* desenvolvida pelo autor, o planejamento da PCB e o desenvolvimento de um case personalizado foram realizados simultaneamente, com foco na acessibilidade e funcionalidade. Durante essa etapa, foi iniciado o estudo para criar um firmware completamente personalizado. O primeiro firmware desenvolvido foi baseado em um layout padrão 60% ANSI. No entanto, ele incorporava um firmware antigo, o que apresentava desafios para sua atualização e funcionalidade.

Para criar um firmware do zero, foi utilizado inicialmente um arquivo gerado pelo site kbfirmware.com, uma ferramenta que, embora útil, encontrava-se desatualizada. Com o apoio da Comunidade QMK, foi possível corrigir e ajustar o firmware para que funcionasse de maneira adequada. Ainda assim, ele continha recursos, arquivos e algoritmos ultrapassados, que poderiam ocasionar problemas ao compilar e gerar o arquivo .hex.

O ponto de virada nesse processo foi a descoberta do comando "**qmk new-keyboard**", disponível no QMK SYS, que automatiza a geração de todos os arquivos necessários para o desenvolvimento de um firmware personalizado. Essa ferramenta cria

arquivos principais atualizados e elimina elementos obsoletos, como *keyboardname.[ch]*. Após essa transição, o arquivo principal do firmware passou a ser o **info.json**, que se tornou o núcleo das configurações do teclado.

O arquivo **info.json** inclui parâmetros essenciais, como:

- Detalhes do fabricante;
- Nome do teclado e configurações do bootloader;
- Direção dos diodos na matriz elétrica;
- Configurações de recursos avançados, incluindo iluminação RGB;
- Pinos de matriz e especificações do processador;
- Configurações USB e layout completo do teclado.

Na versão desatualizada do firmware no QMK, eram necessários os arquivos *keyboard.[ch]*, que continham a posição do layout para cada linha e coluna a serem substituídas (Figura 9). Agora, isso não será mais necessário porque o **info.json** contém a posição e o tamanho de cada tecla.

```
//ifndef KB_H
#define TCBK40_H

#pragma once

#include "quantum.h"

#define LAYOUT_all( \
    K000, K001, K002, K003, K004, K005, K006, K007, K008, K009, K010,      K011,  \
    K100, K101, K102, K103, K104, K105, K106, K107, K108, K109, K110,      \
    K200, K201, K202, K203, K204, K205, K206, K207, K208, K209, K210,      \
    K300, K301,           K306, K307, K308, K309, K310,           \
) { \
    { K000, K001, K002, K003, K004, K005, K006, K007, K008, K009, K010, K011, }, \
    { K100, K101, K102, K103, K104, K105, K106, K107, K108, K109, K110, KC_N0 }, \
    { K200, K201, K202, K203, K204, K205, K206, K207, K208, K209, K210, KC_N0 }, \
    { K300, K301, KC_N0, KC_N0, KC_N0, K306, K307, K308, K309, KC_N0, KC_N0 } \
}

#endif
```

Figura 10 - Arquivo keyboard.[h] do firmware desatualizado.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023.

Essa evolução no processo permitiu não apenas otimizar o desenvolvimento do firmware, mas também garantir maior compatibilidade, eficiência e modernidade nos algoritmos e arquivos utilizados.

4.5. Ajustes e aprimoramento

4.5.1. Layout de teclas, otimização no uso

O layout padrão será dividido em 3 camadas, que serão acessíveis usando duas teclas em conjunto com outras teclas. Além disso, outra característica do teclado é a barra de espaço dividida, que, por padrão, consiste em duas teclas de espaço, mas pode ser alterada para qualquer outra tecla conforme a preferência do usuário. Essas funcionalidades foram incorporadas para oferecer uma experiência de digitação personalizada e eficiente, permitindo ao usuário adaptar o teclado às suas necessidades e preferências individuais.

Com a criação do layout (Figura 10), foi desenvolvido um design que inclui duas teclas dedicadas à alternância entre camadas, posicionadas estratégicamente ao lado da barra de espaço dividida. Essa configuração foi planejada para otimizar o uso dos polegares, mantendo o restante da mão do usuário livre e reduzindo o risco de problemas de saúde decorrentes do posicionamento inadequado do punho durante o uso prolongado do teclado.

Outra necessidade identificada foi a implementação de configurações específicas para o controle da iluminação RGB. Essas teclas foram alocadas na última camada do layout, com o objetivo de preservar camadas limpas e otimizadas para a escrita rápida e garantir uma experiência satisfatória de uso. Essa organização permite que os usuários alternem facilmente entre funcionalidades avançadas e um ambiente de escrita funcional e ergonômico.

```
const uint16_t PROGMEM keymaps[][MATRIX_ROWS][MATRIX_COLS] = {
    [0] = LAYOUT(
        KC_ESC, KC_Q, KC_W, KC_E, KC_R, KC_T, KC_Y, KC_U, KC_I, KC_O, KC_P, KC_BSPC,
        KC_TAB, KC_A, KC_S, KC_D, KC_F, KC_G, KC_H, KC_J, KC_K, KC_L, KC_ENT,
        KC_CAPS, KC_Z, KC_X, KC_C, KC_V, KC_B, KC_N, KC_M, KC_SLASH, KC_LGUI, KC_RALT,
        KC_LCTL, MO(1), KC_LSFT, KC_SPC, MO(2), KC_RCTL
    ),
    [1] = LAYOUT(
        KC_ESC, KC_1, KC_2, KC_3, KC_4, KC_5, KC_6, KC_7, KC_8, KC_9, KC_0, KC_DEL,
        KC_PSCR, KC_LPRN, KC_RPRN, ___, ___, ___, ___, KC_MINS, KC_LBRC, KC_RBRC, KC_EQUAL,
        ___, KC_RGUI, ___, KC_SLCT, KC_PAUS, KC_INS, KC_HOME, KC_DOT, KC_COMM, KC_UNDS, ___,
    ),
    [2] = LAYOUT(
        KC_F1, KC_F2, KC_F3, KC_F4, KC_F5, KC_F6, KC_F7, KC_F8, KC_F9, KC_F10, KC_F11, KC_F12,
        RGB_MOD, KC_MPRV, KC_MNXT, RGB_MODE_RGBTEST, ___, KC_MUTE, KC_VOL0, KC_VOLU, KC_MPLY, KC_PGDN, QK_BOOT,
        RGB_TOG, RGB_M_R, RGB_M_P, RGB_M_SW, RGB_M_TW, RGB_SAD, RGB_HUD, RGB_HUI, RGB_VAI, RGB_VAD, RGB_RESET,
    )
};
```

Figura 11 - Layout de camadas “default” final para os teclados TCBK40

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024.

4.5.2. Aprimorando o Design da Placa de Switches com o Keyboard Layout Editor

Uma abordagem valiosa para o design da placa de switches foi a utilização da plataforma [Keyboard Layout Editor](#). Essa ferramenta facilitou significativamente a organização e a personalização do layout desejado, permitindo ajustes como a modificação de tamanhos de teclas, adição de camadas, alterações de rotações e escolha de cores. Após a finalização do layout, o arquivo foi salvo por meio da funcionalidade "perma link", disponibilizada pelo site, e os dados brutos gerados foram copiados para serem utilizados na etapa subsequente do desenvolvimento.

4.6. Documentação

A última etapa do projeto consistiu na documentação detalhada de todas as fases do desenvolvimento do teclado TCBK40. Esse processo incluiu o registro das atividades relacionadas ao design, fabricação e testes. Foram elaborados diagramas do layout das teclas, esquemas elétricos e capturas de tela do processo de modelagem 3D. Além disso, foram registradas as dificuldades encontradas em cada etapa e as soluções adotadas para superá-las.

As ferramentas utilizadas para a documentação incluíram processadores de texto e softwares de diagramação, que permitiram organizar visualmente as informações de forma clara e objetiva. O resultado esperado dessa etapa foi a geração de uma documentação completa e coesa, contendo todos os elementos necessários para a inclusão no Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), garantindo que o processo de desenvolvimento fosse transparente e replicável.

5. Resultados e discussões

Durante a fase de testes do teclado TCBK40, diversos problemas foram identificados e solucionados, visando garantir tanto a funcionalidade quanto a usabilidade do dispositivo. A identificação detalhada dos desafios enfrentados e a implementação de soluções apropriadas foram etapas cruciais para o sucesso do projeto. Essas ações permitiram a validação do protótipo e asseguraram sua adequação às necessidades dos usuários.

5.1. Desenvolvimento do hardware

Na elaboração do hardware dos teclados TCBK40, o principal objetivo foi criar uma PCB da forma mais simples possível. Com isso em mente, foi retirada da versão atual a tecnologia de Hot Swap, que utiliza switches soldados diretamente à placa. Considerando que os teclados TCBK40 possuem o microcontrolador e os componentes necessários para seu funcionamento implementados em uma placa de desenvolvimento pré-produzida — mais especificamente, variantes do Arduino Pro Micro que utilizam entradas USB-C — optou-se pelo uso de soquetes ou headers para conectar ambas as placas. A vantagem desse método reside na facilidade de modificação, troca e modularidade do design. Para os LEDs RGB, foi escolhida a tecnologia SK6812, que são LEDs SMD chamados de “invertidos”. Essa escolha visa não interferir no uso de qualquer tipo de switch nos teclados TCBK40, mantendo a modularidade e a alta compatibilidade, que são alguns dos principais objetivos do projeto.

No que se refere ao design do produto, alguns pontos na aplicação dos componentes foram alterados em relação às opções tradicionalmente utilizadas, devido ao design final do produto. Os teclados TCBK40 foram projetados com o objetivo de oferecer o melhor desempenho em relação aos componentes escolhidos, o que levou à aplicação de componentes para a tecnologia Anti-ghosting. A maneira mais comum e eficiente de aplicar essa tecnologia é utilizando diodos na matriz de conexão das teclas. Normalmente, diodos SMD são empregados em teclados devido ao seu tamanho reduzido, mas no caso dos teclados TCBK40, optou-se por mantê-los expostos na PCB e na placa de switches por motivos estéticos e de design. Para isso, foram escolhidos os diodos modelo **1N4148**, que possuem alta velocidade de comutação, posicionados na parte superior da PCB (Figura 12).

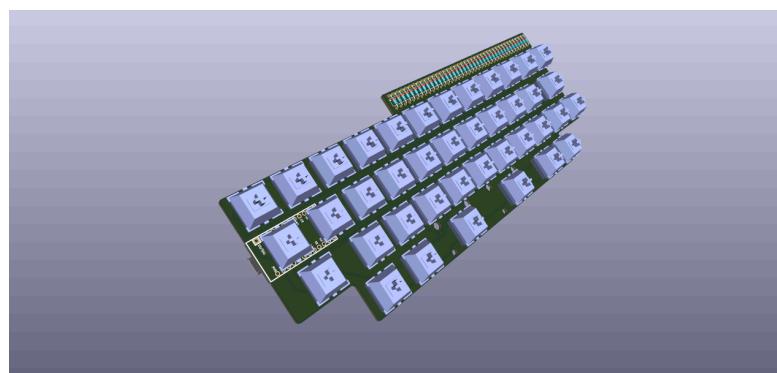


Figura 12 - Representação frontal 3D da PCB dos teclados TCBK40 no Kicad

Fonte: Elaborado pelo Autor 2023.

Quanto à localização da placa de desenvolvimento, ela foi posicionada no verso da placa PCB principal, na extremidade esquerda, escolha que foi feita devido à necessidade de conexão e desconexão do cabo do teclado, de maneira semelhante aos dispositivos Sci-Fi de filmes, além de ser esteticamente agradável, uma vez que o design do teclado é compacto (Figura 13).

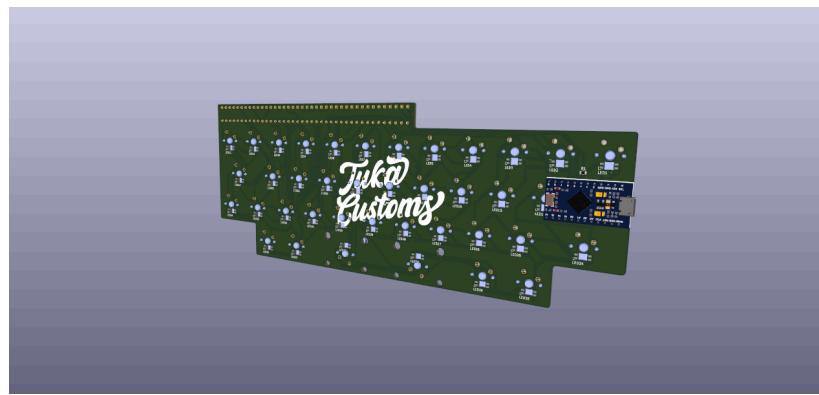


Figura 13 - Representação do verso 3D da PCB dos teclados TCBK40 no Kicad

Fonte: Elaborado pelo Autor 2023.

5.2. Espaçamento dos teclados

O principal foco do design do *case* do teclado foi a criação da *Switch Plate* (placa onde os *switches* são montados). Como o PCB principal foi projetado para ser fixado exclusivamente à *Switch Plate*, essa etapa teve grande importância na garantia da integridade estrutural do teclado. A disposição e a quantidade de espaçadores (*standoffs*) foram cuidadosamente planejadas para assegurar a estabilidade e o suporte necessários durante o uso. Para alcançar a rigidez estrutural desejada, foram utilizados oito espaçadores estratégicamente posicionados: quatro na parte superior e quatro na parte inferior.

Durante o desenvolvimento da *Switch Plate*, houve um aprofundamento técnico no entendimento do espaçamento correto, dimensionamento e especificações técnicas dos

switches MX. Informações relevantes foram extraídas do vídeo "Case Design Tutorial" de Kobuss, que serviu como fonte de inspiração e orientação para o projeto ([Kobuss, 2024](#)).

Outro recurso significativo foi a ficha técnica fornecida pela SparkFun, que apresentava dimensões recomendadas para a montagem dos *switches* e da placa. Com base nessas informações, a equipe realizou as transformações necessárias para converter as medidas de polegadas para milímetros, de forma a alinhar-se com as unidades de trabalho adotadas no Fusion 360. Como parte do processo de design, as medidas foram implementadas com precisão, assegurando o corte exato da placa e o encaixe adequado dos *switches*.

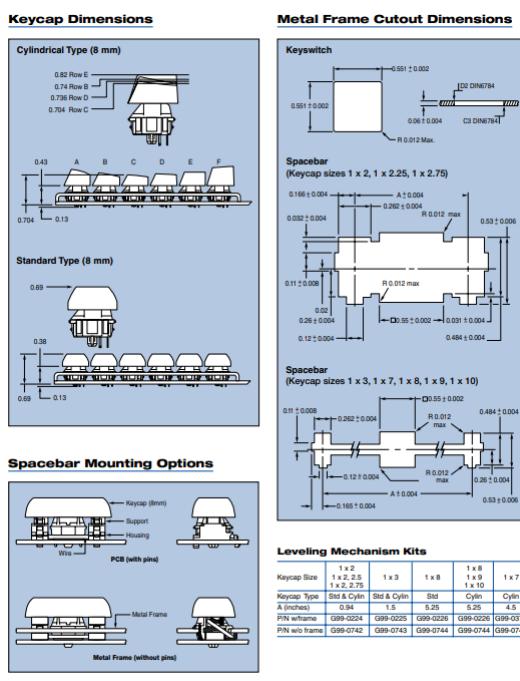


Figura 14 - Datasheet com as dimensões e especificações dos switches Cherry MX fornecido pela SparkFun.

Fonte: SparkFun. *Mechanical Key Switch Breakout Hookup Guide*. Disponível em: <https://www.sparkfun.com>. Acesso em: 26 nov. 2024.

Além disso, com o objetivo de aprimorar a funcionalidade e a experiência do usuário, foram introduzidos cortes circulares em cada vértice da *switch plate*. Essa decisão de design proporcionou não apenas a fixação segura dos *switches*, mas também facilitou sua substituição sem risco de danos à placa. Essa solução, além de agregar praticidade, contribuiu para um design esteticamente atrativo, aumentando significativamente o apelo geral do teclado TCBK40.

5.3. Escolha dos Materiais

Para o material da placa, foi escolhido o acrílico transparente (Clear Acrylic). Essa decisão foi tomada para permitir que os diodos na parte superior do PCB fiquem expostos e visíveis, exibindo o PCB personalizado e melhorando a estética do teclado.

Pensando no custo-benefício e nas possibilidades de customização por parte do usuário, a parte traseira dos teclados TCBK40 foi projetada de modo a permitir sua produção por impressão 3D. Essa abordagem possibilita ao usuário criar seu próprio design para aplicação no teclado, ampliando as opções de personalização. Além disso, a impressão 3D apresenta-se como uma solução de fabricação extremamente acessível, contribuindo para reduzir custos e aumentando as possibilidades de personalização, agregando valor e exclusividade ao produto.

5.3.1. Estética e Personalização Visual

O acrílico transparente permite a visualização das luzes RGB, criando efeitos visuais personalizados e atraentes, aprimorando a estética do teclado (SOUZA, 2023).

Além de que, nos teclados TCBK40 existiu o foco de quando aplicado a iluminação RGB ele ter um efeito semelhante ao uso de *backlight* sem a necessidade de implementar esse sistema na PCB, pois por ser um teclado com design “aberto” e com a *switch plate* transparente, a iluminação se torna um destaque.

5.3.2. Durabilidade e Resistência

Possui boa resistência a impactos e riscos, garantindo maior longevidade ao teclado, embora com menor resistência que metais (MENDES, 2022).

5.3.3. Leveza

O acrílico é mais leve que materiais metálicos, contribuindo para a redução do peso do teclado (ALMEIDA, 2021).

5.3.4. Facilidade de Fabricação e Personalização

O material pode ser facilmente cortado e moldado, permitindo ajustes personalizados conforme as necessidades do projeto (LIMA, 2023).

5.3.5. Custo-benefício

O acrílico é mais barato que materiais metálicos, oferecendo um bom equilíbrio entre custo e funcionalidade (COSTA, 2022).

5.3.6. Propriedades Ópticas

Sua transparência favorece a propagação de luz, criando uma iluminação uniforme e agradável (FERREIRA, 2023).

5.3.7. Sustentabilidade

O acrílico é reciclável, contribuindo para a sustentabilidade do projeto (SOUZA, 2023).

5.4. Problemas encontrados e soluções aplicadas

5.4.1. Case

Projetar o case para o teclado TCBK40 foi uma etapa crucial no projeto geral. Para garantir um case bem estruturado e esteticamente agradável, o processo começou com a importação do PCB finalizado para o Fusion 360. A utilização do visualizador 3D do Kicad permitiu à equipe visualizar a aparência do teclado com os componentes desejados montados nele, fornecendo informações valiosas sobre o visual final do produto e sua sensação.

5.4.2. Alinhamento dos Switches e Design da Placa

Inicialmente, a primeira linha de medições estava perfeitamente alinhada, com cada switch espaçado em 1U (19,05 mm). No entanto, surgiram complicações nas linhas subsequentes devido à presença de diferentes tamanhos de teclas (2-2.25U, 2-1.75U, 7-1.25U). O desafio foi garantir que as distâncias entre os switches na segunda linha correspondessem à colocação dos switches no PCB. Após utilizar a ferramenta Chat GPT para investigar e pensar logicamente sobre o problema, foi descoberto que a distância de 21,4 mm entre os switches foi alcançada somando-se o primeiro tamanho de tecla com o segundo tamanho de tecla e dividindo por 2. Esse método forneceu um valor aproximado para o espaçamento entre diferentes tamanhos de teclas. Importante ressaltar que os cálculos foram feitos com valores exatos da ficha técnica, mas arredondados para levar em conta variações.

Construindo sobre o conhecimento da lição anterior, a próxima etapa envolveu a criação de desenhos vetoriais para a placa de switches com base nos dados brutos fornecidos pelo layout do teclado. Isso eliminou a necessidade de medir e calcular manualmente todas as dimensões do zero. Ao visitar o site <http://builder.swillkb.com/>, os usuários puderam configurar o design da placa, incluindo o tipo de switch, o tipo de estabilizador, os cantos da placa e muito mais.

Essa abordagem economizou tempo significativo e garantiu a melhor qualidade para a placa de switches.

5.4.3. Iluminação RGB

Durante os testes iniciais do teclado, sem a soldagem da placa Pro Micro e dos switches, a iluminação RGB não funcionou como esperado. Algumas teclas não acendiam corretamente, e havia discrepâncias de brilho e cor entre os LEDs.

Após a soldagem completa de todos os componentes no lugar, o problema com a iluminação RGB foi resolvido, e ela passou a funcionar corretamente. Esse resultado destaca a importância da soldagem adequada dos componentes para garantir o funcionamento confiável da iluminação RGB no teclado.

Durante o uso das funções do QMK para alteração de saturação e tonalidade da iluminação RGB, foi identificado um pequeno problema. Quando as configurações de saturação e tonalidade eram alteradas, não havia uma função que revertesse automaticamente para os padrões iniciais. Isso tornava o processo de reversão manual praticamente impossível, pois não havia valores visíveis de referência, dependente apenas da visualização visual das cores.

Para resolver essa limitação, foi programada uma tecla na camada 3 do teclado TCBK40, que permite resetar as configurações de tonalidade e saturação para os padrões iniciais, eliminando a necessidade de realizar um novo flash no bootloader do teclado (Figura 13).

```
enum custom_keycodes {
    RGB_RESET = SAFE_RANGE,
};

bool process_record_user(uint16_t keycode, keyrecord_t *record) {
    switch (keycode) {
        case RGB_RESET:
            if (record->event.pressed) {
                // Turn off RGB, reset settings, and turn it back on
                rgblight_disable();
                rgblight_enable();
                rgblight_mode(RGBLIGHT_MODE_STATIC_LIGHT); // or any default mode you prefer
                rgblight_sethsv(120,255, 180); // Set to default HSV values
            }
            return false;
        default:
            return true;
    }
}
```

Figura 15 - Algoritmo criado para resetar a tonalidade e saturação do sistema RGB

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024

5.4.4. Melhoria no mapeamento de teclas

Inicialmente, o mapa de teclas do teclado TCBK40 não incluía algumas teclas essenciais para o uso diário, principalmente para tarefas relacionadas ao trabalho, estudos, hobbies tecnológicos e entretenimento. A ausência dessas teclas prejudicava a produtividade e a versatilidade do teclado, limitando o acesso a funções frequentemente utilizadas, como teclas de pontuação, navegação e comandos específicos de determinadas aplicações. Isso comprometia a experiência do usuário, dificultando a adaptação e a eficiência nas atividades diárias.

Durante o uso do protótipo, observou-se a necessidade urgente de adicionar teclas essenciais para o funcionamento completo do teclado. As teclas de ponto, vírgula, barra e interrogação foram identificadas como as mais impactantes e prioritárias para a implementação, uma vez que são amplamente usadas em textos, códigos e navegação. Após cuidadosa análise, essas teclas foram posicionadas no layout de forma a aproximar-se ao máximo de um teclado de configuração padrão de 100%, garantindo uma disposição ergonômica e eficiente. Essa modificação tornou o teclado mais intuitivo e acessível, facilitando o aprendizado e a adaptação do usuário ao novo layout.

Para resolver essa limitação, o mapa de teclas do firmware foi cuidadosamente refinado e aprimorado. O firmware foi modificado para incluir todas as teclas essenciais para o uso diário e para atender às necessidades dos usuários em diferentes contextos, como trabalho, estudos e atividades relacionadas à tecnologia. A personalização do layout foi feita levando em consideração a ergonomia e a facilidade de acesso às teclas, permitindo um uso mais confortável e eficiente. Além disso, teclas adicionais, como atalhos para funções específicas, foram implementadas para aumentar a produtividade e a flexibilidade. A implementação dessas alterações visou tornar o teclado TCBK40 mais versátil, adequado para uma ampla gama de atividades, desde o uso casual até tarefas mais intensas que exigem eficiência e precisão.

5.4.5. Firmware

O principal problema surgiu durante a programação do layout e das funções do teclado. Ao ajustar o firmware, observei que alguns arquivos e algoritmos estavam desatualizados, o que ocasionou erros inesperados no processo. Um problema específico estava relacionado ao layout do teclado, onde ocorreu um erro nos argumentos. O layout estava limitado a 39 argumentos, mas eu possuía 41/42 argumentos no layout. Inicialmente, pensei que a barra de espaço dividida poderia ser a causa desse problema e considerei combiná-la em uma única barra de espaço para resolver a contagem de argumentos. No entanto, essa solução não obteve o efeito desejado.

```

QMKGMSYS
Compiling: lib/lufa/LUFA/Drivers/USB/Core/ConfigDescriptors.c
[OK]
Compiling: lib/lufa/LUFA/Drivers/USB/Core/DeviceStandardReq.c
[OK]
Compiling: lib/lufa/LUFA/Drivers/USB/Core/Events.c
[OK]
Compiling: lib/lufa/LUFA/Drivers/USB/Core/HostStandardReq.c
[OK]
Compiling: lib/lufa/LUFA/Drivers/USB/Core/USBTask.c
[OK]
Compiling: tmk_core/protocol/lufa/usb_util.c
[OK]
Linking: .build/tcbk40_default.elf
[OK]
Creating load file for flashing: .build/tcbk40_default.hex
[OK]
Copying tcbk40_default.hex to qmk_firmware folder
[OK]
Checking file size of tcbk40_default.hex
[OK]
* The firmware size is fine - 18112/28672 (63%, 10560 bytes free)

```

Figura 16 - Tela QMK MSYS para compilação do firmware

Fonte: Elaborado pelo Autor 2023.

Após uma investigação mais detalhada e buscando ajuda de terceiros, descobri que a pasta "keyboard" continha arquivos desnecessários (Keyboardname.[ch]) e que o arquivo info.json estava faltando uma tecla essencial para o mapeamento correto do teclado. Realizando as correções necessárias, como a remoção das vírgulas extras no final de cada linha do layout, consegui resolver o problema com sucesso. Após corrigir o firmware, recompilá-lo e gerar o arquivo hex final, o teclado ficou pronto para ser gravado e testado.

Essa experiência enfatizou a importância de prestar atenção meticulosa aos detalhes e a significância de estar sempre atualizado com as últimas mudanças no desenvolvimento de firmware. Superando esses desafios, pude garantir a estabilidade e funcionalidade do firmware personalizado, criando uma experiência de usuário suave e satisfatória para o teclado TCBK40.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o desenvolvimento do teclado TCBK40, um projeto customizado voltado para entusiastas de tecnologia, com foco em product design, personalização e acessibilidade. O processo de criação envolveu desde o design do layout no **Keyboard Layout Editor**, passando pela modelagem e fabricação da estrutura em **acrílico transparente**, até a implementação do **firmware QMK** para proporcionar total personalização das teclas e recursos avançados, como iluminação RGB configurável.

Durante o desenvolvimento, foram superados desafios relacionados ao **espaçamento entre teclas de diferentes tamanhos**, **problemas de iluminação RGB na PCB final** e ajustes no mapa de teclas. A solução criativa para esses problemas envolveu a utilização de ferramentas especializadas, como o **SwillKB Builder** para o design da placa de switches, além de **scripts personalizados** para ajustes finos no firmware. A possibilidade de fabricação de componentes em **impressão 3D** para o case e outros detalhes trouxe ainda mais flexibilidade ao projeto.

Os resultados obtidos demonstraram que o teclado TCBK40 atende aos objetivos específicos estabelecidos no início do projeto. A criação de um teclado mecânico de 40%, com alta **eficiência e adaptabilidade**, alta qualidade mantendo a acessibilidade e estudo voltado a produção de hardware foram alcançadas de maneira que o dispositivo é adequado para diferentes atividades do usuário, como trabalho, estudos e hobbies tecnológicos. Além disso, o teclado oferece um excelente **custo-benefício**, alinhando-se às necessidades do público-alvo.

Portanto, o trabalho cumpriu os objetivos propostos, mostrando a viabilidade de criar periféricos funcionais, personalizados e acessíveis com o uso de métodos modernos de desenvolvimento e ferramentas especializadas. O projeto do teclado TCBK40 serve como exemplo da integração entre tecnologia, design, personalização e conhecimento proporcionando uma experiência otimizada para o usuário.



Figura 17 - Teclado TCBK40 Simulado no Fusion360

Fonte: Elaborado pelo Autor 2023.

6.1. Sugestão para trabalhos futuros

Através deste trabalho, se criou e iniciou um novo ramo na empresa Tuka Customs, onde envolve a criação de projetos voltados a tecnologias através de ideias vindas do Autor. Dentro dessa ampla gama de estudos, seu próximo teclado a ser produzido terá novas tecnologias a serem implementadas, como a utilização de soquetes para tecnologia de *Hotswaping* em que envolve a troca dos interruptores e a instalação deles sem a necessidade de solda, a utilização de tela OLED para indicar pontos de funcionamento do teclado juntamente com a parte estética e animações e o principal que é a integração completa do ATMega 32u4 e seus componentes de funcionamento diretamente na placa PCB do teclado.

Referências

- Daly, S., Geary, M., & Keane, A. (2019). *The impact of keyboard design on usability and comfort*. Ergonomics, 62(6), 757-766.
- Daskalakis, S., Zafiroglu, A., & Kouloumbis, P. (2021). *Firmware development for custom mechanical keyboards: A case study*. Journal of Open Hardware, 5(1), 12-25.
- Jiang, Y., Chen, W., & Wang, L. (2020). *Mechanical keyboard switches: A comparative study of user preferences*. International Journal of Human-Computer Studies, 137, 102399.
- Karwowski, W., Hoonakker, P., & Geller, E. S. (2020). *Ergonomics in design: Methods and techniques*. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 30(2), 102-115.
- Kumar, A., Gupta, V., & Singh, M. (2021). *The role of RGB lighting in mechanical keyboards and its impact on user experience*. Journal of Technology and Science Education, 11(1), 57-72.
- Quando foram inventados os teclados mecânicos. Disponível em: <<https://www.meetion.pt/a-when-were-mechanical-keyboards-invented.html>>. Acesso em: 19 nov. 2024.

- SPARKFUN. *MX 20series. MX Desktop Profile*, p. 1–4, 28 set. 2000.
- CHERRY GmbH. *Mechanical Keyswitch Designs and User Adaptations. Whitepaper*, 2019.
- HAATAJA, P. *Customizing Compact Keyboards: Layering and Key Mapping Techniques. Tech Design Review*, v. 14, 2022, p. 23-31.
- LISTER, J. *Keycap Sizes and Layout Optimization: A Comparative Study. Journal of Keyboard Engineering*, v. 8, 2020, p. 101-115.
- WADA, T. et al. *Ergonomics and Key Layout in Mechanical Keyboards. Human-Computer Interaction Studies*, v. 12, 2021, p. 45-58.
- KLOTZ, R. *The Evolution of Keyboard Layouts: From IBM Model M to Modern Compact Designs. Digital Hardware History*, v. 3, 2020, p. 75-89.
- KICAD. *KiCad EDA Documentation*. Disponível em: <https://www.kicad.org/documentation>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- AUTODESK. *Fusion 360 Overview*. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- BROEK, J. *Mastering Autodesk Fusion 360*. London: Wiley, 2023.
- SHIH, R. H. *Parametric Modeling with Autodesk Fusion 360*. Mission: SDC Publications, 2022.
- GRAHAM, P. *Introduction to Computer-Aided Design and 3D Printing with Fusion 360*. New York: McGraw-Hill, 2021.
- MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *ATmega32u4 Datasheet*. Disponível em: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega32U4>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- ARDUINO. *Arduino Pro Micro Overview*. Disponível em: <https://store.arduino.cc/pro-micro>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- SPENCE, S. *Exploring AVR Microcontrollers: Understanding the ATmega32u4*. New York: Maker Media, 2021.
- CROFT, J. *Building USB HID Devices with Arduino Pro Micro*. London: Springer, 2022.
- KOBUSS. *Mechanical keyboard case design*. [S.l.]: YouTube, 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=DsW-hKeB3mc&t=632s>. Acesso em: 12 março. 2023.
- ALMEIDA, J. *Leveza e resistência de materiais para teclados personalizados. Revista de Tecnologia*, v. 12, n. 3, p. 45-50, 2021.

- COSTA, L. *Custos de materiais para designs personalizados em teclados mecânicos.* *Jornal de Design de Produto*, v. 18, n. 2, p. 70-75, 2022.
- FERREIRA, A. *Propriedades óticas de materiais transparentes em design de teclados.* *Revista de Materiais e Engenharia*, v. 15, n. 1, p. 30-35, 2023.
- LIMA, M. *Facilidade de personalização com acrílico em projetos de teclados.* *Revista de Design de Produtos*, v. 10, n. 4, p. 120-125, 2023.
- MENDES, R. *Durabilidade e resistência de materiais plásticos em tecnologia de teclado.* *Tecnologia em Foco*, v. 9, n. 5, p. 55-60, 2022.
- SOUZA, T. *Sustentabilidade no design de produtos eletrônicos: o caso do acrílico.* *Revista Brasileira de Engenharia Sustentável*, v. 11, n. 6, p. 80-85, 2023.
- SWILLKB. *Keyboard Builder.* Disponível em: <http://builder.swillkb.com/>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- SANTOS, J. D. *Técnicas de medição e cálculo no design de teclados mecânicos.* *Revista de Engenharia de Produto*, v. 22, n. 3, p. 40-45, 2023.
- MARTINS, R. A. *Soluções para o alinhamento de switches em projetos de teclados personalizados.* *Jornal de Design Tecnológico*, v. 30, n. 4, p. 100-105, 2022.
- QMK FIRMWARE. *QMK Configurator: Personalização de Firmware para Teclados Mecânicos.* Disponível em: <https://config.qmk.fm/>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- MITCHELL, J. *Teclados Mecânicos: Como Customizar para Máxima Eficiência.* São Paulo: Editora TecnoMaker, 2023.
- CHEN, L. *Ergonomia e Personalização em Teclados Mecânicos: O Papel do Layout e da Configuração de Teclas.* Porto Alegre: Livraria Geek, 2022.
- Fitzgerald, R., Brown, M., & Smith, L. (2020). *Lighting and Immersion: Enhancing the User Experience.* *Journal of Interactive Design*, 22(4), 65-77.
- Haines, C., Williams, S., & Lee, D. (2018). *Usability Improvements with Backlit Keyboards.* *Ergonomics Review*, 29(3), 134-142.
- Nielsen, M., & MacLachlan, D. (2017). *The Role of Illuminated Feedback in Keyboard Efficiency.* *Human-Computer Interaction Journal*, 45(2), 212-227.
- Zhao, L., Wang, X., & Liu, Y. (2019). *Energy-Efficient RGB LED Technology for Mechanical Keyboards.* *Journal of Electronics and Power Systems*, 41(6), 342-350.
- ZHANG, W.; LIU, Y.; CHEN, Z. *Advanced LED lighting technology for mechanical keyboards: SK6812 and its advantages.* *Journal of Electronic Components*, v. 41, n. 7, p. 72-79, 2017.

- YANG, X.; SUN, Y. *The integration of RGB lighting in mechanical keyboards and its influence on user experience*. *Journal of Interactive Computing*, v. 23, n. 2, p. 201-214, 2019.
- LIN, H.; XU, L. *Design and implementation of lighting effects in gaming peripherals: The case of SK6812 LEDs*. *Proceedings of the International Conference on Computer Engineering and Applications*, v. 16, n. 4, p. 180-185, 2020.
- DONG, J.; ZHANG, H. *Exploring the evolution of RGB LEDs in mechanical keyboards and their impact on gaming culture*. *Journal of Consumer Electronics*, v. 56, n. 3, p. 126-135, 2021.
- BEHRENS, Scott. "Understanding Keyboards and How They Work". *The Computer Science Journal*, vol. 22, no. 1, 2020, pp. 45-58.
- GILBERT, Jane. "Anti-Ghosting in Mechanical Keyboards: A Detailed Overview". *Tech Innovations*, vol. 8, no. 2, 2018, pp. 112-119.
- SMITH, Thomas, and JONES, John. "The Role of Diodes in Keyboard Anti-Ghosting Systems". *Journal of Electronics Engineering*, vol. 34, no. 4, 2019, pp. 233-240.
-