

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista- campus de São João da Boa Vista

LORENZO CAIUBI MAIORINO ZELADA

Estudo, projeto e desenvolvimento de uma bateria eletrônica modular

São João da Boa Vista

2025

Lorenzo Caiubi Maiorino Zelada

Estudo, projeto e desenvolvimento de uma bateria eletrônica modular

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista, para obtenção do título de Bacharelem Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Profa^o Dra. Paula Ghedini Der Agopian

São João da Boa Vista
2025

Z49e	Zelada, Lorenzo Caiubi Maiorino Estudo, projeto e desenvolvimento de uma bateria eletrônica modular / Lorenzo Caiubi Maiorino Zelada. -- São João da Boa Vista, 2025 59 p. : il., fotos Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista Orientadora: Paula Ghedini Der Agopian 1. Bateria (Música). 2. Instrumentos musicais eletrônicos. 3. Circuitos eletrônicos. I. Título.
------	---

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO, PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA BATERIA ELETRÔNICA
MODULAR**

Aluno: Lorenzo Caiubi Maiorino Zelada

Orientador: Prof.^a Dr.^a Paula Ghedini Der Agopian

Banca Examinadora:

- Paula Ghedini Der Agopian (Orientadora)
- André Alves Ferreira (Examinador)
- Marlon Rodrigues Garcia (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 04 de dezembro de 2025

AGRADECIMENTOS

À minha família por sempre me acolher, incentivar a buscar o que amo e cultivar a minha curiosidade.

Aos meus amigos por sempre estarem presentes e me acolherem da forma que sou.

Aos compositores que fizeram as músicas que ouvi ao longo do processo de fazer o trabalho.

À professora Paula Ghedini por me orientar ao longo do desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso.

“Se a classe operária tudo produz, a ela tudo pertence”
Karl Marx

RESUMO

A acessibilidade de instrumentos musicais eletrônicos rítmicos em âmbito nacional sempre foi e ainda é limitada. Tal limitação ocorre tanto por aspectos de experiência do usuário (pois a maioria dos dispositivos possui interfaces complexas e pouco intuitivas que levam à um processo criativo e de aprendizado frustrante) quanto por aspectos financeiros, uma vez que até os hardwares mais baratos do mercado são caros e importados e que nosso país carece enormemente de uma produção nacional desse tipo de tecnologia. Neste trabalho de conclusão de curso foi projetada e construída uma bateria eletrônica modular configurável com foco em minimalismo operacional, baixo custo e fácil acessibilidade para usuários de pouca experiência musical. Os módulos desenvolvidos e prototipados no campus são baseados em circuitos já disponíveis no mercado. O gabinete do dispositivo, assim como a escolha e disposição de controles, foram elaborados pelo autor trazendo otimizações para recursos já existentes em nas baterias eletrônicas do mercado.

PALAVRAS-CHAVE: bateria eletrônica; máquina de ritmos; sintetizador.

ABSTRACT

The accessibility of rhythmic electronic instruments in national scope has always been and still is limited. This limitation occurs both due to user experience (because the majority of devices have complex and unintuitive interfaces that lead to a frustrating creative and learning process), and financial aspects, once even the cheapest hardware in the market are expensive and imported and our country lacks a national production of this kind of technology. In this undergraduate thesis a configurable modular drum machine was designed and built focusing on operational minimalism, low cost and easy accessibility for users with little musical experience. The developed and prototyped modules built on campus are based on already available circuits in the market. The device's cabinet, as well as the choice and arrangement of the controls, were elaborated by the author bringing optimizations to features that already exist in drum machines on the market.

Keywords: drum machine; rhythm machine; synthesizer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O primeiro Rhythmicon, criado pelo icônico inventor russo Leon Theremin. Na imagem, o compositor Joseph Schillinger.	14
Figura 2 – Bateria eletrônica SP-1200, introduzida por DJ Malboro na criação do primeiro álbum de funk carioca no Brasil no fim da década de 80.	15
Figura 3 – Módulo de síntese analógica de tambor DS-M.	16
Figura 4 – Sinal senoidal sendo ceifado em suas extremidades, causando adição de harmônicos.	18
Figura 5 – A bateria eletrônica Tungui I.	26
Figura 6 – Os painéis da Tungui I.	27
Figura 7 – Painel superior.	27
Figura 8 – Painel principal com as 4 vagas destacadas.	28
Figura 9 – Painel frontal.	28
Figura 10 – Vaga e seus controles individuais.	29
Figura 11 – Diagrama elétrico da alimentação da Tungui I.	30
Figura 12 – Circuito de um multivibrador astável para a geração do sinal de <i>clock</i> utilizando o LM555.	31
Figura 13 – Medidas do sinal de saída do multivibrador quando configurado em sua frequência mínima e máxima. Os cursores em azul indicam o intervalo de tempo do semiciclo ALTO e os valores correspondentes às medidas de tempo e frequência estão destacadas em azul.	32
Figura 14 – Pinagem do CD4017.	33
Figura 15 – Saídas do primeiro CD4017 ligadas em opto-acopladores.	34
Figura 16 – 4 opto-acopladores ligados por saída do primeiro CD4017.	35
Figura 17 – Ativação individual de cada um dos opto-acopladores para a obtenção de 16 saídas independentes.	36
Figura 18 – Exemplo de ativação de uma das portas de saída por meio da operação sincronizada dos dois CD4017.	37
Figura 19 – Arquitetura final do circuito sequenciador de 16 passos.	38
Figura 20 – Controle de tamanho, trava e reinicialização da sequencia.	39
Figura 21 – Conectores do tipo KK utilizados no sequenciador e na placa mãe Tungui I.	40
Figura 22 – Módulos da Tungui I.	41
Figura 23 – Módulos construídos para a Tungui I.	41
Figura 24 – Comportamentos do sinal do módulo de bumbo ou tom variando-se o controle de amortecimento.	42
Figura 25 – Exemplos de comportamentos possíveis do módulo de ruído.	43
Figura 26 – Pinagem dos módulos de síntese.	43

Figura 27 – Controles de sequência de uma das quatro vagas.	44
Figura 28 – Sequência de uma das vagas composta por dois <i>dip-switch</i> configurada em um ritmo de funk carioca.	45
Figura 29 – Comparação do pulso de disparo (amarelo) e o mesmo pulso atrasado (azul).	46
Figura 30 – Controle de volume das vagas.	47
Figura 31 – Diagrama elétrico do circuito de efeitos e saída de áudio baseando-se no uso de amplificadores operacionais.	48
Figura 32 – Comparação de um sinal de tensão senoidal de entrada (amarelo) e o sinal resultante na saída (azul) do estágio de ganho com ceifamento. . . .	50
Figura 33 – Comportamento do sinal de varredura na saída filtro quando R_{Filtro} . . .	51
Figura 34 – Comportamento do sinal de varredura na saída do filtro quando R_{Filtro} .	52
Figura 35 – Projeto do módulo de ruído.	56
Figura 36 – Projeto do módulo de bumbo ou tom.	56
Figura 37 – Gabinete explodido.	57
Figura 38 – Chapas utilizadas no gabinete.	57
Figura 39 – Dimensões do painel principal.	58
Figura 40 – Dimensões do painel frontal.	58
Figura 41 – Dimensões do painel superior.	58
Figura 42 – Dimensões da chapa traseira.	58
Figura 43 – Dimensões da chapa de baixo.	59
Figura 44 – Dimensões da chapa lateral.	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	– Amostragem	16
2.2	– Síntese analógica	17
2.3	– Efeitos de áudio	17
2.3.1	– Filtro passa-baixa	17
2.3.2	– Controle de ganho e ceifamento	18
2.4	– Sequenciador	18
2.5	– Gerador de sinal de <i>clock</i>	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	– Dispositivos Utilizados	21
3.2	– Materiais Utilizados	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	– Desenvolvimento da bateria eletrônica	26
4.2	– Informações gerais da Tungui I	27
4.2.1	– O painel superior com os controles referentes ao sequenciador	27
4.2.2	– Painel Principal	28
4.2.3	– Painel Frontal	28
4.2.4	– Vagas da Tungui I	29
5	CIRCUITOS ELETRÔNICOS QUE COMPÕEM A TUNGUI I	30
5.1	– Circuito gerador de sinal de <i>clock</i>	30
5.2	– Sequenciador de 16 passos	33
5.3	– Módulos	40
5.3.1	– Módulo de bumbo ou tom	42
5.3.2	– Módulo de ruído	42
5.3.3	– Detalhes dos módulos	43
5.4	– Vagas	44
5.4.1	– O sistema de disparo	44
5.4.2	– Volume da vaga	47
5.5	– Efeitos e saída de áudio	47
5.5.1	– Tensão de referência	48
5.5.2	– Estágio de ganho com ceifamento	49

5.5.3 – Filtro passa-baixo	50
5.5.4 – Saída de áudio	52
6 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A – IMAGENS DAS PLACAS DOS MÓDULOS NO PRO- GRAMA KICAD	56
APÊNDICE B – IMAGENS DO GABINETE NO TINKERCAD	57

1 INTRODUÇÃO

O acesso a instrumentos musicais eletrônicos sempre foi e ainda é algo muito limitado para a maioria do povo brasileiro. A possibilidade de criar e experienciar diretamente a música rítmica eletrônica por meio de dispositivos e hardwares conhecidos como *drum machines* (bateria eletrônica) no contexto socioeconômico brasileiro é exclusiva para uma parcela muito pequena de pessoas e as opções disponíveis no mercado dificilmente oferecem uma solução financeiramente acessível para um público geral. Soma-se ao fato dos preços inacessíveis um mercado nacional mínimo em tais dispositivos. Isso cria, ainda por cima, a necessidade da importação de tecnologia do exterior desfavorecendo o mercado interno e o desenvolvimento tecnológico nacional.

Além da questão monetária relacionada à interfaces e instrumentos musicais eletrônicos (que é uma das principais barreiras no acesso de tais bens), na maioria das vezes o objeto não apresenta um processo fácil de aprendizado de introdução. O processo de iniciação no meio musical (como em qualquer ramo da arte) pressupõe de um caminho didático e simples que acompanhe levemente o interessado de forma que esse não desista logo de início. A falta de noção ou intuição tanto em questões rítmicas quanto na forma de operar esses tipos de instrumentos são grandes paredes para iniciantes e interessados. Ainda nesse contexto, são poucos os dispositivos no mercado que oferecem esse amparo inicial para a jornada do criar e experienciar da arte musical eletrônica.

Em termos de eletrônica, a complexidade dos aparelhos disponíveis é muito elevada. Apesar de não interferir diretamente na experiência do indivíduo que utiliza o instrumento, o uso de eletrônica digital e microprocessadores não é viável em termos de simplicidade e minimalismo considerando o projeto e construção, principalmente em um contexto não industrial. Porém, é conhecida a possibilidade de criar sistemas de sons eletrônicos sequenciados utilizando circuitos puramente analógicos que dispensam a necessidade da tecnologia de microeletrônica digital, tendo como vantagem, nesse caso, a simplicidade de projeto e construção. Sabe-se que a síntese rítmica eletrônica geralmente faz uso, principalmente, de geradores de sinais ondulatórios (geradores de função) e de ruído branco que pode ser obtido com amplificadores que captam ruído eletromagnético. Sabe-se que utilização de amplificadores operacionais, transistores bipolares de junção (TBJ) como componentes centrais da síntese são comuns dentro da área, e tais partes assim como seus periféricos são de fácil acesso e baixo custo. O circuito que define a sequência rítmica (sequenciador) pode dispensar recursos digitais a partir do uso de chips contadores de década e técnicas de circuitos matriciais e de relógio (clocks). Misturadores de sinais podem utilizar também a tecnologia analógica fazendo uso de transistores bipolares ou até amplificadores operacionais. Considerando essas possibilidades, é possível projetar um dispositivo desses dispensando completamente a necessidade de tecnologia digital e / ou programação, baseando-se em uma expansão nos aprendizados de eletrônica proporcionados pela universidade.

A proposta desse trabalho de conclusão de curso se instala justamente nesse contexto: pesquisa, projeto e manufatura de uma bateria eletrônica (*drum machine*) modular analógica de baixo custo, foco minimalista e nacional para possibilitar um maior acesso para o público geral e iniciante nesse meio que ainda é exclusivo: o ramo da criação da música eletrônica analógica.

A modularidade permite alterar, remover e adicionar circuitos responsáveis por gerar cada tipo de som (como por exemplo sons de bumbo, ruído, caixa, etc. que fazem uso de osciladores eletrônicos e geradores de ruído) fazendo uso de conectores que permitem a conexão / desconexão dos módulos, possibilitando com que o usuário possa escolher outros sons para sua bateria. É importante ressaltar que a modularidade não é um aspecto comum para baterias eletrônicas no geral, que se limitam muitas vezes aos timbres nativos e fixos do dispositivo, o que enfatiza o valor inovador da pesquisa deste projeto, trazendo flexibilidade e versatilidade ao produto.

Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo a pesquisa, projeto e o desenvolvimento de uma bateria eletrônica modular, minimalista e nacional que seja acessível financeiramente e em termos de experiência de usuários iniciantes, por meio da redução da complexidade da utilização do aparelho. Embora os circuitos responsáveis pela geração dos sinais de áudio (módulos) sejam baseados em diagramas eletrônicos já existentes no mercado. O circuito utilizado para o sequenciador junto com os recursos para a determinação da sequência rítmica dos sinais de áudio foram criados pelo autor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a compreensão desse trabalho, se faz necessário o entendimento de conceitos relacionados à instrumentos musicais eletrônicos e eletrônica fundamentalmente analógica. É notável que a compreensão de dispositivos musicais de natureza eletrônica engloba necessariamente aspectos da área de circuitos elétricos e eletrônicos, uma vez que são estes os artifícios que proporcionam uma ampla gama de funcionalidades desses instrumentos. A forma escolhida para abordar os recursos que uma bateria eletrônica têm à oferecer, inicia-se no conceito amplo de bateria eletrônica para depois contextualizar os módulos utilizados. Não serão abordados aspectos devidamente técnicos sobre música e notação musical, apenas o mínimo para a compreensão do dispositivo em questão.

A bateria eletrônica

Uma bateria eletrônica é um instrumento musical eletrônico que gera sinais elétricos, que quando amplificados e reproduzidos em um alto falante, simulam o som de um ou mais instrumentos rítmicos. Uma de suas principais características é a capacidade de sequenciar estes sinais afim de gerar um ritmo determinado. O conceito desse dispositivo vêm desde a década de 30 do século XX, quando uma das primeiras criações chamada de Rhythmicon (Figura 1) foi concebida (Reverb, 2019).

Figura 1 – O primeiro Rhythmicon, criado pelo icônico inventor russo Leon Theremin. Na imagem, o compositor Joseph Schillinger.



Fonte: (WIKIPEDIA, 2012).

Nas primeiras iterações desses aparelhos, a utilização de partes mecânicas era abundante e o princípio de funcionamento era completamente diferente dos exemplos que encontram-se nos dias de hoje. Ao longo do tempo, esses dispositivos foram sendo otimizados e transformados, assumindo formas e funcionalidades diferentes, desprendendo-se cada vez mais da utilização de peças mecânicas (por demandar manutenção frequente e ocupar muito espaço), para migrar para

o uso quase que pleno de recursos eletrônicos. Um exemplo deste avanço é mostrado na Figura 2 onde é apresentada a SP-1200, criada no final da década de 80 do século XX.

Figura 2 – Bateria eletrônica SP-1200, introduzida por DJ Malboro na criação do primeiro álbum de funk carioca no Brasil no fim da década de 80.



Fonte: (Mariano, 2019).

Porém, a possibilidade de decidir o que esses dispositivos eram capazes de fazer foi algo que nem sempre foi amplo como nos dias de hoje. Inicialmente, pouco era possível de se controlar a respeito da forma e sonoridade dos ritmos que as baterias eletrônicas faziam, essas que muitas vezes limitavam-se a apenas alguns padrões rítmicos selecionáveis. A programabilidade desses aparelhos foi um artifício que demandou décadas de otimizações e novas criações para surgir, tendo suas primeiras aparições no mercado internacional na década de 70 do século XX.

Poder programar a bateria eletrônica significa que o usuário pode decidir a forma com que o ritmo e sonoridade do dispositivo irá soar (claro que dentro das limitações do aparelho em questão). Nos dias de hoje, as características sonoras são determinadas pelo usuário através da interface que o dispositivo possui. Parâmetros como batidas por minuto (BPM), timbres e volumes dos instrumentos, tipos de ritmo, filtragens e efeitos são exemplos dos mais usuais encontrados na maioria das baterias eletrônicas no mercado de hoje em dia.

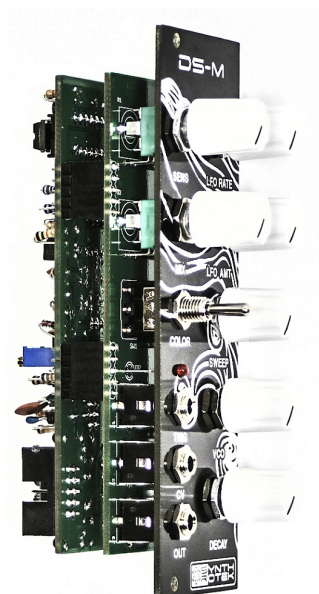
A partir dessa breve contextualização, é necessário entender mais a fundo o funcionamento desses dispositivos para abordar o tema central deste trabalho de conclusão de curso. Nesse aspecto, serão abordadas apenas as características julgadas fundamentais para o entendimento geral de uma bateria eletrônica.

Sinais de áudio

Na maioria dos casos, as partes de uma bateria eletrônica responsáveis para a obtenção de sinais de áudio são nativos ao instrumento, ou seja, vem construídos internamente no gabinete. Porém, como mais popularizado no caso de sintetizadores melódicos, o advento da modularidade também existe para as baterias eletrônicas. Esse recurso baseia-se no conceito de que os circuitos de efeitos ou que geram os sinais de áudio são removíveis e permutáveis em um gabinete, também chamado de *eurorack* (WIKIPEDIA, 2021) ou apenas *rack*, que possui espaços denominados de vagas para encaixá-los e removê-los. Os circuitos que não são fixos ao gabinete são chamados

de módulos e podem vir de diversas formas, tamanhos, timbres e controles, como exemplificado na Figura 3.

Figura 3 – Módulo de síntese analógica de tambor DS-M.



Fonte: (Synthrotek, 2014).

Por não possuir recursos “acústicos”, as baterias eletrônicas não podem gerar sons de natureza acústica (como um tambor ou um violão que vibram suas carcaças para criar seus sons respectivos), e por isso precisam de outras maneiras para simular essas características sonoras. Eletronicamente, isso pode ser realizado principalmente por duas formas: amostragem e síntese analógica.

2.1 Amostragem

A técnica de amostragem no contexto de áudio é uma técnica fundamentalmente digital que permite a gravação de sinais sonoros em memórias digitais. Isso é feito de forma com que os sinais a serem armazenados passam por um processo de amostragem (caracterizado pela discretização do tempo contínuo (Weik, 1995)). Por discretizar um sinal real, que pode ser descrito por uma função contínua, isto é, de infinitos possíveis valores de amplitude e tempo, esse processo insere distorção no sinal resultante. Além disso, para o processo de armazenamento em circuitos de memória, o sinal também passa por um processo de quantização, que o discretiza em amplitude, distorcendo-o ainda mais antes de ser armazenado em forma de código binário. Tais distorções não podem ser evitadas, mas minimizadas por meio de maiores taxas de amostragem e maior resolução e melhores técnicas de ambas, como por exemplo o uso de quantização não uniforme que melhora a qualidade de sinais de áudio vocais (GeeksForGeeks, 2025). O método de amostragem faz uso de circuitos elaborados utilizando conversores analógicos-digitais (ADC's), conversores digitais-analógicos (DAC's) e memórias. No contexto musical, dispositivos

que são usados para gravar sinais de áudio para reproduzi-los sob demanda são chamados de amostradores, no inglês, *samplers*. (llamamusic, 2025). Porém, não é exclusivo dos amostradores essa funcionalidade, e no contexto de baterias eletrônicas esse recurso tem sido utilizado cada vez mais em dispositivos mais modernos desde a década de 90 do século XX.

2.2 Síntese analógica

Já a técnica de síntese analógica consiste na geração de sinais elétricos por meio de circuitos eletrônicos que quando amplificados e reproduzidos em alto falantes geram sons de natureza única. Os circuitos que são capazes de realizar tal função são chamados de circuitos de síntese ou sintetizadores (Salford, 2011), pois estes criam o sinal em tempo real por meio da interação dos componentes que compõem o circuito (como capacitores, transistores, resistores, etc.). Esses sistemas podem gerar formas de onda que são inalcançáveis utilizando instrumentos acústicos. Sons que não ocorrem na natureza ou em instrumentos convencionais. Porém, as arquiteturas desses circuitos também podem ser feitas de forma a reproduzir ou simular o som de instrumentos já existentes (como bumbos, tons, chimbal, etc.). Mas, dada a matemática necessária para a geração de formas de ondas complexas e harmonicamente ricas como os dos instrumentos do mundo real, esses circuitos tendem a ser extremamente grandes e complexos, inviabilizando a criação ou reprodução destes em certos contextos. Por isso, quando assumida a proposta de emulação de timbres por meio de síntese analógica, usualmente recorre-se apenas à aproximações, que por sua vez também têm o seu valor musical.

2.3 Efeitos de áudio

Além da síntese e amostragem de sinais, existe ainda formas de transformar os sinais de áudio por meio de efeitos de áudio. Esse tópico estende-se amplamente, mas para esse caso será abordado dois dos quais foi feito uso para a realização do trabalho.

2.3.1 Filtro passa-baixa

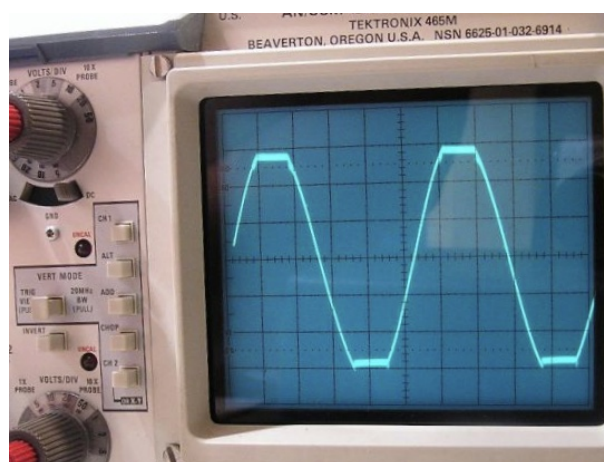
Um filtro passa-baixa é um sistema que faz a modificação de sinais por meio da atenuação de frequências altas. Idealmente, quando um sinal é aplicado em sua entrada, sua saída será similar ao sinal de entrada porém predominantemente com a banda espectral das frequências baixas. Chama-se passa-baixa, pois “deixa passar” as baixas frequências, e atenua os sinais de altas frequências (Boylestad, 2012). Em sistemas de áudio, esse recurso é utilizado para fazer um efeito de “abafamento”, como se o som estivesse sendo bloqueado por algum objeto como por exemplo, um travesseiro. Em alguns casos o filtro passa-baixa é utilizado para reduzir levemente a banda dos agudos quando o áudio é demasiadamente estridente. Os circuitos que possibilitam tal recurso variam de caso para caso, podendo ser ativos ou passivos. É importante notar que, no contexto desse trabalho, as frequências ditas altas e baixas são referentes à audição

humana (que ocupa o espectro de 20 à 20.000 Hz). Assim, as definições de “alta” e “baixa” são particularmente arbitrárias, não havendo um valor objetivo de limiar que divide as duas definições.

2.3.2 Controle de ganho e ceifamento

Outro efeito de áudio amplamente utilizado é o controle de ganho. Esse controle permite a multiplicação da amplitude de um sinal por um escalar (nomeado de ganho). Por meio de técnicas eletrônicas que serão abordadas posteriormente, é possível distorcer o sinal por meio da amplificação excessiva do sinal pelo ganho. Isso se dá pelo fato de que quando o resultado da multiplicação do ganho pela amplitude do sinal de entrada é maior (em módulo) que a tensão da fonte que alimenta o circuito, o sinal de saída acaba sendo limitado quando sua amplitude se aproxima da tensão de alimentação. Isso acaba fazendo com que o formato de onda do áudio seja ceifado nas extremidades, inserindo distorção harmônica no sinal, como exemplificado na Figura 4. Outra forma de ceifamento é a de ceifamento suave (no inglês, *soft clip*) que será abordada posteriormente no trabalho.

Figura 4 – Sinal senoidal sendo ceifado em suas extremidades, causando adição de harmônicos.



Fonte: (WIKIPEDIA, 2007).

2.4 Sequenciador

Entendendo as possíveis formas de obtenção dos sinais sonoros, é necessário compreender que para uma bateria eletrônica, além dos timbres e sons, a sequência rítmica é um aspecto fundamental a se considerar. O sinal elétrico que será convertido em som precisa ser disparado conforme uma sequência que determina o ritmo. Nesse tópico, a questão a ser abordada não é mais “o que”, mas sim o “quando”, o momento em que se dispara cada sinal de áudio.

O sequenciador é uma tecnologia que permite sequenciar eventos determinados. No caso de uma bateria eletrônica, esse recurso permite sequenciar os múltiplos sinais de áudio que o dispositivo possui em memória ou sintetiza. No caso de um sequenciador de passos (abordado

nesse trabalho), a sequência é caracterizada por discretizações nomeadas de passos. Fazendo o uso de uma variável temporal para o controle dos passos, permite-se que o sequenciador transicione entre passos ao longo do tempo. Associando as discretizações ao disparo de um ou mais sinais de áudio da bateria eletrônica faz com que o proceder da sequência gere um ritmo com os sons do dispositivo.

Na forma mais básica, a sequência é linear e finita. A característica da sequência será linear fazendo com que a cada comando de transição, o passo seguinte será sempre o mesmo, isso é, toda vez que a sequência passa por um passo específico, por exemplo o 3°, o seguinte sempre será o 4° e depois o 5°, etc. Ou seja, a sequência não transiciona erratically ou aleatoriamente e não pode pular entre os passos que a compõem. O fato da sequência ser finita pressupõe que ela tem um passo inicial e um final. Para a repetição do ritmo definido pela sequência, geralmente após o último passo, retorna-se ao primeiro para repetir o padrão, como se fosse uma roleta ou um carrossel. Outro aspecto importante é que ao longo da sequência só se pode estar em um passo de cada vez, o que impede múltiplos passos serem o atual simultaneamente.

Apesar desse tipo de sequenciador ser o mais comum, vale notar que existe outra forma de sequenciamento que é definida como Sequenciamento de tempo real (em inglês, *Real-time sequencing*) que discretiza o tempo no qual ocorrerá a sequência numa resolução extremamente alta a fim de possibilitar ao usuário posicionar de forma mais orgânica os elementos ao longo do tempo (Sweetwater, 2022).

O comprimento da sequência, determinada pela quantidade de passos, que também pode ser variado a depender do dispositivo, define a quantidade de subdivisões temporais que o dispositivo faz. Esse aspecto pode determinar a assinatura de tempo que o ritmo está definido e a “resolução” da sequência (quanto mais passos, maior a resolução e maior as opções de posicionamento temporal dos disparos dos sinais de áudio).

Por meio de um um sinal elétrico externo de controle, o sequenciador transiciona de um passo para o outro, e se esse sinal pulsa continuamente, os sinais de áudio são disparados de forma a compor um ritmo uniforme. Em alguns casos, utiliza-se uma série de chaves elétricas (interruptores) associadas à cada passo da sequência para o disparo de um sinal de áudio específico, como geralmente é em *euro-racks*. Porém, na maioria dos casos, as baterias eletrônicas possuem um controle digital no qual o usuário, por meio de um *display* seleciona qual gerador de sinal de áudio é disparado em cada passo, centralizando o controle do aparelho e reduzindo o número de peças necessárias, porém diminuindo a intuitividade do uso do aparelho.

2.5 Gerador de sinal de *clock*

Com a possibilidade de sequenciar sinais de áudio, agora é necessário uma forma de fazer isso acontecer ao longo do tempo. Deseja-se um artifício que faça o sequenciador transicionar entre os passos em intervalos uniformes ao longo do tempo. Felizmente, geradores de sinais de *clock* são simples e aptos para essa situação. Fazendo uso de circuitos de multivibradores

astáveis pode-se realizar essa tarefa com facilidade.

Multivibradores são sistemas que possuem dois estados de saída possíveis, geralmente ALTO e BAIXO, e astável caracteriza a saída por estar em constante transição entre os estados (Boylestad, 2013). Esses dispositivos, de certa forma, podem ser entendidos como osciladores de dois estados, pois oscilam entre os dois sinais de saída possíveis ao longo do tempo. Utilizando o sinal de saída desses dispositivos para controlar a transição do sequenciador (que podemos chamar de sinal de *clock*), obtém-se uma sequência que procede ao longo dos passos em intervalos uniformes de tempo. O tempo em que o multivibrador demora para alterar sua saída determina o BPM (batidas por minuto) em que a sequência ocorre, e geralmente esse parâmetro pode ser facilmente ajustável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Dispositivos Utilizados

O processo de manufatura da bateria eletrônica Tungui I incluiu diversas etapas de âmbitos diferentes. Inicialmente, utilizou-se o software Kicad (KiCad. . . ,) para a diagramação de dois módulos de síntese. Ambos os circuitos utilizados foram reproduzidos baseados em (Sound, 2020) e (Klein, 2023), sendo esses de timbre de bumbo ou tom (Klein, 2023) e outro de ruído (Sound, 2020). Após isso foi feito o diagrama elétrico desses módulos no editor de esquemático que o programa oferece. Em seguida, procedeu-se à prototipagem da placa correspondente a cada um dos dois circuitos escolhidos. O programa gera um *layout* dos componentes na placa a partir do esquemático desenhado. Manualmente traçou-se os limites da placa e as linhas de conexão dos componentes assim como as quatro ilhas nas quais os pinos do tipo banana de encaixe foram inseridos. As imagens desse processo podem ser vistas no Apêndice A.

Nesse processo visou-se a elaboração de módulos pequenos, mas com espaço suficiente para que o usuário pudesse alterar os parâmetros com facilidade, sem obstruções no caminho dos dedos. Para os controles dos módulos, fez-se o uso de *trim-pots*, potenciômetros construídos em envólucros de plástico miniaturizados. Além de serem mais baratos, as dimensões destes possibilitaram a elaboração de placas com dimensões razoavelmente pequenas para garantir que todo o dispositivo não fosse muito grande. Após a diagramação e prototipação, as placas foram cortadas e os componentes e os conectores banana foram soldados nas placas de síntese. Utilizou-se o *software* Rhino (??) para a modelagem de *knobs* para os *trimpots*. Esse recurso permite o usuário variar os parâmetros dos módulos sem a utilização de uma chave de fenda, dando mais ergonomia ao dispositivo. Para a construção do gabinete, os principais fatores considerados foram as dimensões dos módulos de síntese, e consequentemente, as dimensões que as vagas precisariam ter para acomodar os parâmetros de controle e os módulos.

Portanto, a partir das medidas dos módulos (que possuem 6 cm de altura por 8 cm de largura), elaborou-se o painel principal para que coubessem encaixes para 4 módulos e os controles referentes a cada vaga. Considerou-se a necessidade de margens entre as vagas por questões estéticas e funcionais. Nesse processo, utilizou-se o *website* Tinkercad (??) que fornece uma ferramenta de modelagem 3D que pode ser usada para diagramação de painéis e gabinetes com a possibilidade de exportar arquivos para corte referentes ao projeto em questão. Imagens referentes a este processo encontram-se no apêndice B.

Foram utilizadas chapas de MDF de espessura de 3 mm para a construção do gabinete. Após cortadas e furadas, as chapas foram pintadas e coladas no formato do gabinete com exceção do painel principal que foi fixado no painel superior utilizando dobradiças de porta, parafusos e roscas. As chapas das faces que precisavam de mais firmeza foram duplicadas e coladas uma nas outras para garantir maior estabilidade da estrutura. Além disso, foram posicionados dois

alicerces de madeira dentro do gabinete para sustentar o painel principal com o uso de dois parafusos.

Após isso, foi construído o circuito da placa mãe da Tungui I e todos os componentes periféricos foram fixados no gabinete (como as sequências, potenciômetros de controles diversos, LEDs, etc.). Instalou-se a fonte de alimentação e conectou-se essa e os periféricos à placa mãe utilizando conectores do tipo KK.

Finalmente, após completamente construída, utilizou-se um osciloscópio da Tektronix do modelo TDS2014C em laboratório para a aquisição de informações pertinentes para o trabalho (como tensões, formas de onda, etc.). Foi necessário o uso do software OpenChoiceDesktop para se obter imagens da tela do dispositivo por meio de um cabo USB que conectava o computador no osciloscópio.

3.2 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados na construção do dispositivo são apresentados na lista a seguir:

1. Chapas de MDF de 3mm de espessura;
2. Tintas e materiais de pintura para pintar o gabinete da Tungui I;
3. Parafusos, dobradiças e colas para estruturar o gabinete;
4. Placas de prototipação para testar os circuitos da bateria eletrônica;
5. Soldador e solda para soldar os componentes e afins nas placas e no gabinete;
6. Filamento ABS para impressão dos *knobs* dos módulos.

Os componentes utilizados no gabinete foram:

1. placas ilhadas para solda;
2. cabos elétricos diversos;
3. 75 1N4148;
4. 16 PC817;
5. 15 Resistores 47k Ω ;
6. 13 Resistores 4.7k Ω ;
7. 12 Resistores 10k Ω ;
8. 2 Resistores 1k Ω ;
9. 1 Resistor 220 Ω ;

10. 6 Resistores $100\text{k}\Omega$;
11. 1 Resistor $1\text{M}\Omega$;
12. 2 Resistores $1\text{k}\Omega$;
13. 1 Potenciômetro $100\text{k}\Omega$;
14. 1 Potenciômetro $100\text{k}\Omega$;
15. 3 Potenciômetros $1\text{M}\Omega$;
16. 5 Potenciômetros $50\text{k}\Omega$;
17. 1 Potenciômetro $1\text{k}\Omega$;
18. 9 Capacitores 100nF ;
19. 3 Capacitores $1\mu\text{F}$;
20. 1 Capacitor $10\mu\text{F}$;
21. 1 Capacitor $47\mu\text{F}$;
22. 1 Capacitor $4.7\mu\text{F}$;
23. 3 Capacitores $1\mu\text{F}$;
24. 6 LEDs vermelhos;
25. 4 LEDs amarelos;
26. 1 LED verde;
27. 8 *dip-switch*;
28. 4 BC337;
29. 3 TL072;
30. 1 TL074;
31. 2 CD4017;
32. 1 LM555;
33. 5 Soquete estampado 14 pinos;
34. 2 Soquete estampado 8 pinos;
35. 2 Soquete estampado 16 pinos;

- 36. 2 Botões momentâneos;
- 37. 9 *Knobs*;
- 38. 1 Chave rotativa de 8 posições;
- 39. 4 Chaves de 1 via e 3 posições;
- 40. 2 Chaves de 1 via e 2 posições;
- 41. 1 Conector fêmea P10;
- 42. 16 Conectores fêmeas banana;
- 43. 1 Fonte 13.7Vcc;
- 44. 1 Cabo de tomada.

Componentes utilizados no módulo de bumbo / tom:

- 1. Placa cobreada;
- 2. 4 Conectores macho banana;
- 3. 3 Capacitores 10nF;
- 4. 1 Capacitor 47 μ F;
- 5. 1 Capacitor 10 μ F;
- 6. 2 1N4148;
- 7. 1 *Trimpot* 50k Ω ;
- 8. 1 *Trimpot* 100k Ω ;
- 9. 4 Resistores 100k Ω ;
- 10. 2 Resistores 47k Ω ;
- 11. 2 Resistores 4.7k Ω ;
- 12. 1 Resistor 1M Ω ;
- 13. 1 Resistor 1k Ω ;
- 14. 1 Resistor 470k Ω ;
- 15. 1 TL074;
- 16. 1 Soquete estampado 14 pinos.

Componentes utilizados no módulo de bumbo / tom:

1. Placa cobreada;
2. 4 Conectores macho banana;
3. 1 Capacitor $4.7\mu\text{F}$;
4. 1 Capacitor $22\mu\text{F}$;
5. 2 Capacitores 1nF ;
6. 2 Capacitores 100nF ;
7. 1 Capacitor 10nF ;
8. 1 Capacitor $10\mu\text{F}$;
9. 3 1N4148;
10. 3 BC337;
11. 2 Resistores $10\text{k}\Omega$;
12. 1 Resistor $1\text{k}\Omega$;
13. 1 Resistor $1\text{M}\Omega$;
14. 2 Resistores $4.7\text{k}\Omega$;
15. 1 Resistor $47\text{k}\Omega$;
16. 2 *Trimpots* $5\text{k}\Omega$;
17. 2 *Trimpots* $50\text{k}\Omega$;
18. 1 *Trimpot* $10\text{k}\Omega$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenvolvimento da bateria eletrônica

A Figura 5 apresenta uma fotografia da bateria eletrônica desenvolvida neste trabalho de conclusão de curso que foi nomeada de Tungui I. O projeto do gabinete foi pensado e desenvolvido pelo autor. Com sequencia completamente configurável e modular, a Tungui I possui vagas para

Figura 5 – A bateria eletrônica Tungui I.



Fonte: elaborada pelo autor.

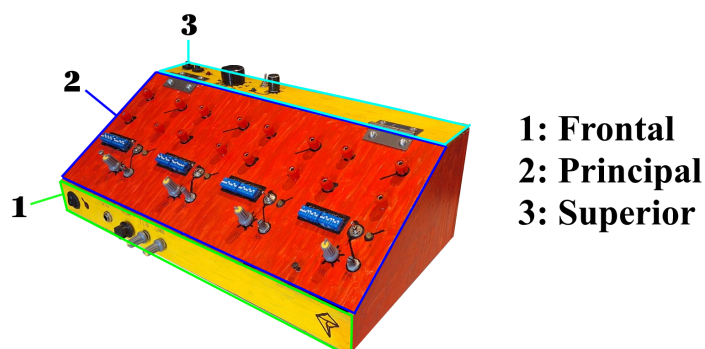
4 módulos de síntese de áudio que podem ser removidos e trocados sob demanda do usuário. Cada vaga possui seus controles de ativação, volume individual e atraso de disparo, além de possuir uma sequência individual completamente programável. O dispositivo também possui um sequenciador de 16 passos com controle de ativação, BPM, tamanho da sequência, e controles de trava e reinicialização. Em relação ao áudio de saída, a Tungui I fornece controle de ganho com ceifamento, filtro passa-baixo e volume geral das vagas. O sinal de saída pode ser obtido através de um conector P10 no painel frontal do dispositivo.

O gabinete faz uso também de dobradiças que prendem o painel principal no resto do corpo. Isso permite a fácil manutenção do aparelho, bastando apenas desparafusar os dois parafusos que seguram o painel principal na parte de baixo do gabinete. Além disso, é possível armazenar outros módulos na região vazia do gabinete, servindo como uma espécie de baú.

4.2 Informações gerais da Tungui I

Nessa seção serão abordados aspectos e informações gerais de utilização da Tungui I, visando contextualizar suas funcionalidades e controles. A Tungui I dispõe de três painéis que contém controles diversos para a operação do dispositivo, como mostrado na Figura 6. Cada um dos painéis são descritos nas sessões a seguir.

Figura 6 – Os painéis da Tungui I.

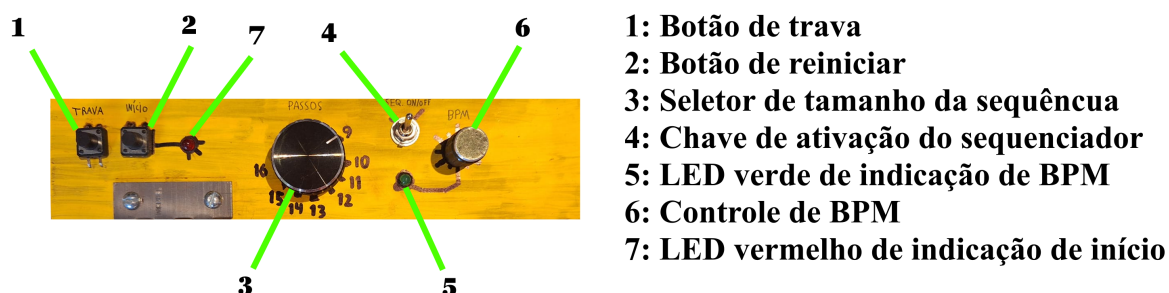


Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.1 O painel superior com os controles referentes ao sequenciador

O painel superior (Figura 7) possui os controles relativos ao sequenciador, como controle de ativação, BPM, trava e início e seletor de tamanho da sequência.

Figura 7 – Painel superior.



Fonte: elaborada pelo autor.

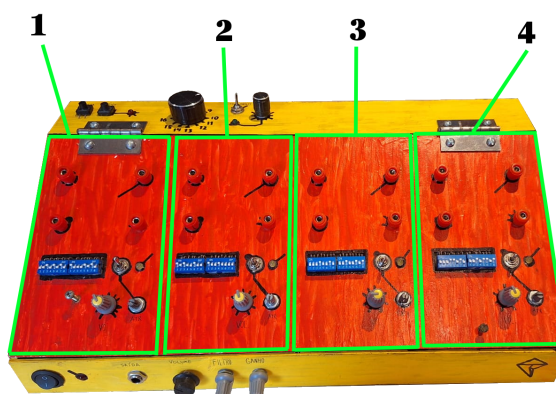
Ligando a chave de ativação do sequenciador (item 4 na Figura 7), inicia-se a contagem de passos, cuja a velocidade de contagem é determinada pelo controle de BPM (item 6 na Figura 7). O LED verde de passo (item 5 na Figura 7) pisca duas vezes a cada passo contado na sequência. Quando esta chega ao seu passo final, determinado pelo seletor de tamanho da sequência (item 3 na Figura 7), o LED vermelho indicador de início (item 7 na Figura 7) pisca uma vez. A sequência, que pode variar de 9 até 16, sempre irá reiniciar após o último passo, mas é possível forçar a reinicialização a qualquer momento utilizando o botão início (item 2 na Figura 7), que

quando pressionado retorna a sequência ao primeiro passo. Caso seja desejado parar a contagem, isto é, fazer com que o sistema ignore o sinal de *clock*, basta manter pressionado o botão Trava (item 1 na Figura 7), que manterá a sequência no passo e no momento em que for apertado. Vale notar que a possibilidade de alterar o tamanho da sequência dá liberdade ao usuário de utilizar assinaturas de tempo diversas, a fim de criar ritmos de naturezas diferentes.

4.2.2 Painel Principal

O painel principal contém as 4 vagas para encaixe dos módulos de síntese, cada uma contendo controles individuais da sequência, volume, disparo e atraso de disparo do módulo inserido, como pode ser visto na Figura 8. Nesse painel o usuário pode criar inúmeras combinações rítmicas e de timbres utilizando os módulos que desejar.

Figura 8 – Painel principal com as 4 vagas destacadas.

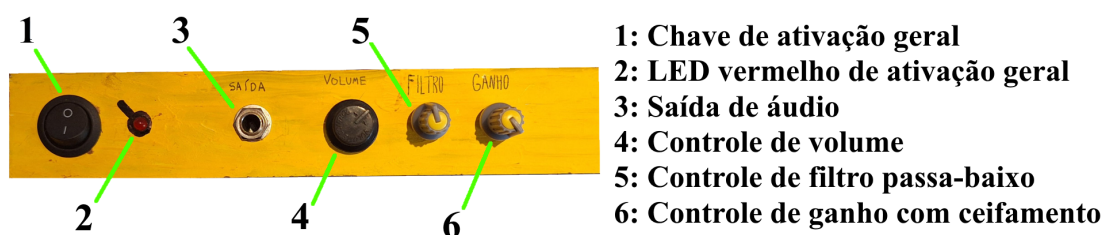


Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.3 Painel Frontal

Além da chave principal de ativação geral (1) e o LED vermelho de indicação de ativação (2), o painel frontal da Tungui I contém os controles de saída de áudio e de efeitos gerais de ganho com ceifamento e filtragem passa-baixa, como visto na Figura 9.

Figura 9 – Painel frontal.



Fonte: elaborada pelo autor.

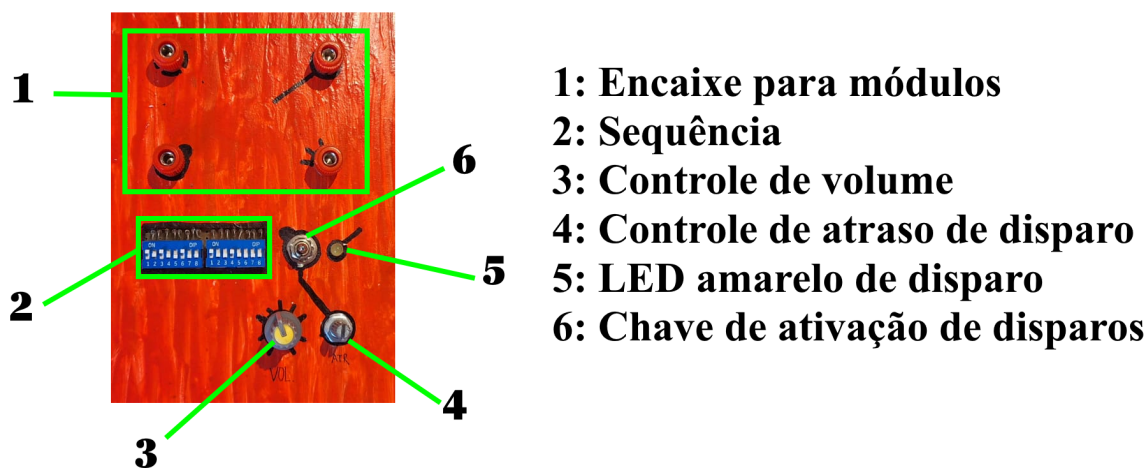
O sinal combinado dos módulos conectados às vagas pode ser modificado até chegar à saída do dispositivo. O sinal passa por um estágio de ganho com ceifamento (6), depois por um filtro passa-baixa (5) e em seguida por um controle de volume (4). Por meio do conector de saída P10 (3), pode-se extrair o sinal de áudio combinado, sequenciado e modificado para reproduzir em uma caixa de som amplificada.

4.2.4 Vagas da Tungui I

A vaga é um compartimento no qual encaixa-se o módulo sintetizador de áudio. Cada uma das quatro possuem controle de volume do módulo inserido, assim como uma chave de três posições na qual o usuário pode tanto desligar, ativar sem atraso no pulso de disparo e ativar a vaga com atraso no pulso de disparo.

Além disso, cada vaga possui uma sequência de 16 interruptores montados em 2 *dip-switch*, componentes com 8 mini interruptores embutidos. Isso fornece controle sobre cada passo possível da sequência determinada no sequenciador. Toda vez que a sequência caminha, o passo correspondente pulsará um sinal. Ativando a mini chave correspondente ao passo faz com que a vaga comande o módulo a disparar, isto é, faz com que o módulo forneça o sinal de áudio para o gabinete. A utilização de *dip-switch* para o controle dos passos da sequência foi uma implementação originada pelo autor e miniaturiza um dos controles que mais ocupa espaço em instrumentos sequenciados. A Figura 10 enumera o que cada componente da vaga é.

Figura 10 – Vaga e seus controles individuais.



Fonte: elaborada pelo autor.

Por cada vaga possuir sua própria sequência, é possível configurar individualmente cada passo para cada módulo conectado, dando ao usuário mais de 2^{64} possibilidades de combinações sequenciais com as quatro vagas (só contando as combinações de 16 passos).

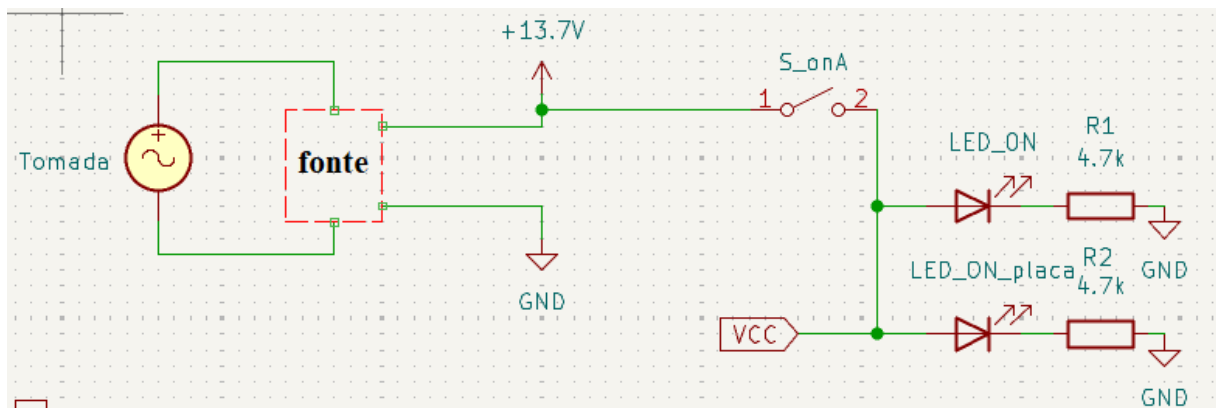
5 CIRCUITOS ELETRÔNICOS QUE COMPÕEM A TUNGUI I

Nessa seção serão abordados os circuitos que possibilitam o funcionamento da Tungui I. Apesar da maioria destes estarem soldados na mesma placa mãe, a abordagem que será utilizada visará analisar separadamente cada um deles para uma melhor compreensão.

Circuito de alimentação

A Tungui I faz uso de corrente contínua para operar. Para isso, utilizou-se uma fonte de corrente contínua que quando ligada na tomada fornece potenciais de 13.7V e 0V (terra) como visto no diagrama da Figura 11.

Figura 11 – Diagrama elétrico da alimentação da Tungui I.



Fonte: elaborada pelo autor.

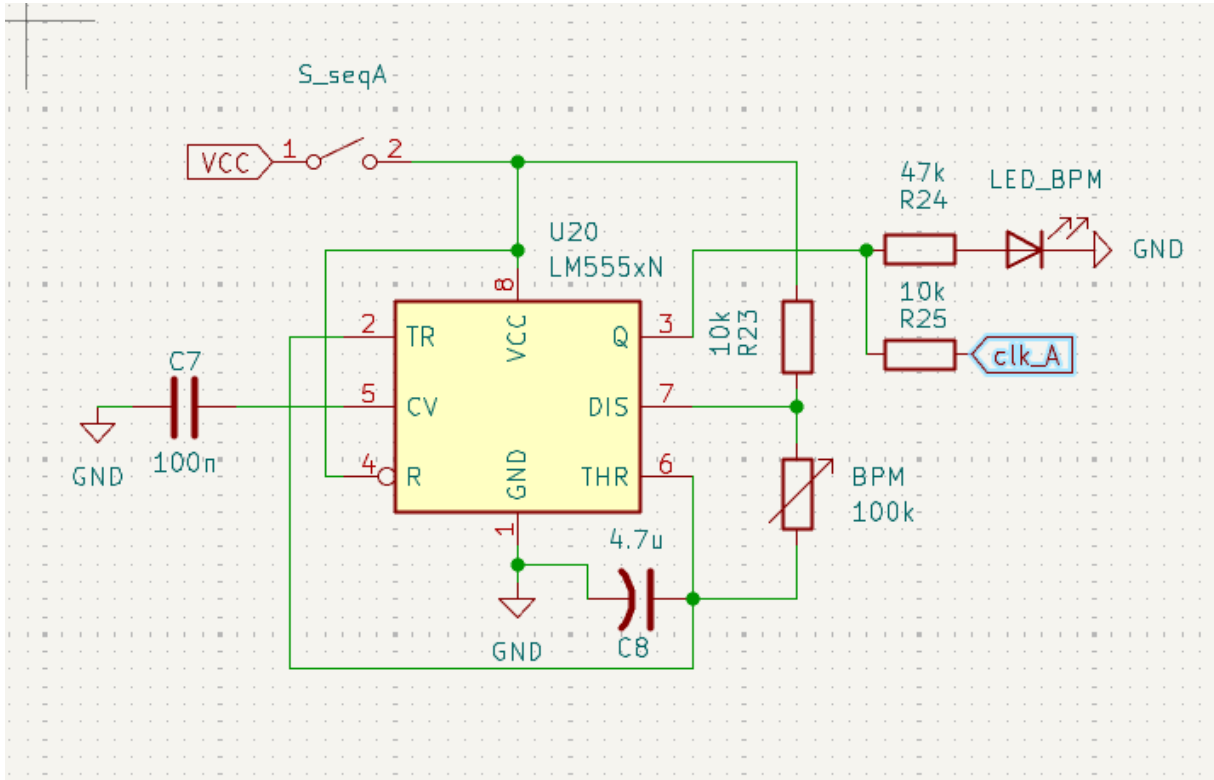
A chave S onA corresponde à chave de ativação geral do painel frontal. Quando essa chave está ativada, cria-se o potencial VCC e o terra que alimentam o circuito todo e ligam-se dois LEDs de indicação de ativação (um interno e outro externo ao gabinete).

5.1 Circuito gerador de sinal de *clock*

Para gerar o sinal de *clock* utilizado para o transicionamento de passos do sequenciador, fez-se uso de um circuito baseado no LM555 como pode ser visto na Figura 12.

O gerador de sinal de *clock* é ativado pela chave SseqA que fica localizada no painel superior. O componente tem seu pino 1 ligado ao terra e seu pino 8 ligado ao VCC quando a chave é ativada, alimentando o componente. O pino 4 é um pino de reinicialização, que quando ligado a um potencial próximo ao terra interrompe qualquer processo de temporização, e por isso liga-se esse pino ao VCC impedindo interrupções (ElectronicTutorials, 2022). No momento da ativação da chave, corrente flui pelo R23 e pelo potenciômetro BPM carregando o capacitor C8. A saída (pino 3) se configura com a saída ALTA, ligando o LED BPM e pulsando um sinal de *clock* no nó clkA (que é por onde o sequenciador recebe o sinal). Quando a tensão através do capacitor chega a $\frac{2}{3} VCC$, o pino 6 (pino de *threshold*, de limiar) faz com que a saída inverta

Figura 12 – Circuito de um multivibrador astável para a geração do sinal de *clock* utilizando o LM555.



Fonte: elaborada pelo autor.

para BAIXO (0v), aterrando também o pino 7 (pino *discharge*, de descarga), fazendo com que o capacitor descarregue através do potenciômetro BPM por este pino até o terra. Quando a tensão no capacitor cai para a $1/3 V_{cc}$, o pino 2 (pino *trigger*, de gatilho), faz com que a saída retorne para ALTA e o ciclo repete. O pino 5 é de controle com tensão, e como não está sendo utilizado, estabiliza-se este conectando-o a um capacitor de 100nf para o terra

Essa oscilação de nível ALTO e BAIXO é o que gera o sinal de *clock* que é utilizado para controlar o sequenciador. Nota-se que por oscilar entre dois estados possíveis resulta num formato de onda quadrada. A frequência de oscilação do circuito é definido pela relação da capacitância de C8 e das resistências do potenciômetro BPM e de R23. A equação que determina a frequência é dada a seguir (AllAboutCircuits, 2018):

$$f = \frac{1.44}{(R_{23} + 2R_{BPM}) \cdot C_8} \quad (1)$$

Variando o potenciômetro, varia-se a quantidade de corrente que flui pelo capacitor e consequentemente seu tempo de carga, alterando a frequência de oscilação do multivibrador.

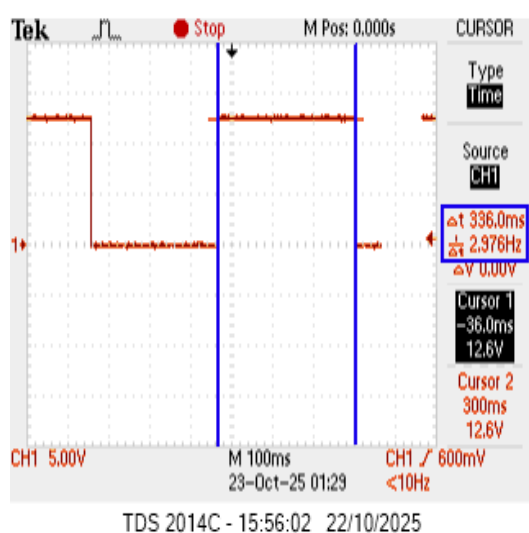
Dado o fato de que $C_8 = 4.7 \mu F$, $R_{23} = 10 k\Omega$ e que o potenciômetro *BPM* varia de 0 a 100 k Ω , a frequência do multivibrador pode variar de 1,45 Hz a 30,63 Hz. Em *BPM*, esses valores representam 87,54 BPM e 1838,30 BPM. Porém, como será mostrado posteriormente,

esses valores de BPM devem ser divididos por 2 para se obter os valores reais.

Em laboratório, realizou-se a medição real do alcance de frequências do multivibrador utilizando um osciloscópio. Ligando uma sonda à saída do LM555 (pino 3) e colocando marcadores temporais no início e no fim (destacados em azul na Figura 13) de um pulso alto do multivibrador, obteve-se os valores correspondentes ao período e frequência do circuito. Na Figura 13 é possível ver a forma de onda correspondente à saída do multivibrador configurado na menor frequência possível (Figura 13a), enquanto a Figura 13b mostra o circuito configurado na maior frequência possível.

Figura 13 – Medidas do sinal de saída do multivibrador quando configurado em sua frequência mínima e máxima. Os cursores em azul indicam o intervalo de tempo do semiciclo ALTO e os valores correspondentes às medidas de tempo e frequência estão destacadas em azul.

(a) Multivibrador configurado na menor frequência possível.



(b) Multivibrador configurado na maior frequência possível.



Fonte: elaborada pelo autor.

A partir dos dados fornecidos na Figura 13a pode-se concluir que a frequência mínima de operação do multivibrador é de cerca de 1,485 Hz (uma vez que foi medido apenas o semiciclo ALTO e que o ciclo de serviço é de aproximadamente 50%). Com os dados da Figura 13b pode-se concluir que a frequência máxima de operação do multivibrador sutilmente menor que 32,68 Hz (uma vez que foi medido apenas o semiciclo ALTO, e o semiciclo BAIXO é muito menor quando comparado com o ALTO).

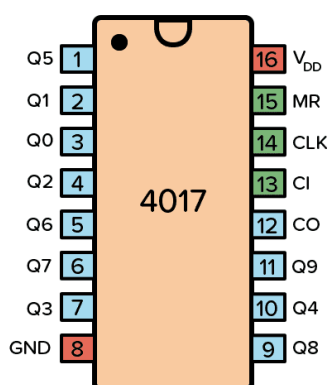
Nota-se também que o ciclo de operação do multivibrador aumenta conforme a frequência aumenta. Isso se dá pelo fato de que o ciclo de carga e descarga do circuito é definido pela relação entre duas resistências, e na configuração estabelecida varia-se apenas a que é responsável pelo

tempo de descarga. Isso causa uma assimetria temporal que faz com que o ciclo de serviço seja maior que 50%.

5.2 Sequenciador de 16 passos

Nessa subseção é explicado o sequenciador do dispositivo, a parte mais elaborada do circuito que compõe a Tungui I. O circuito que permite a contagem linear e finita dos 16 passos que a sequência da Tungui I possui é baseado no CD4017. Este componente é um contador de década CMOS que possui 10 saídas lógicas, como pode ser visto na figura 14.

Figura 14 – Pinagem do CD4017.



Fonte: (BuildElectronicCircuits, 2020).

Os pinos 8 e 16 são utilizados para fornecer alimentação ao componente. Quando iniciado, o CD4017 ativa sua porta Q0 com um nível lógico ALTO, enquanto todas as outras permanecem desligadas. Quando um pulso de tensão ocorre no pino CLK (“clock”) e o pino MR (“reset” e CL (“clock inhibit”) estão ligados ao nível baixo (geralmente por um resistor de “pull down” ao terra), o componente transiciona de porta: desliga a porta Q0 e ativa a porta Q1. Quando o pulso de clock ocorre novamente na porta CLK, o dispositivo desliga a porta Q1 e liga a porta Q2 e assim por diante até chegar na porta Q9. Quando chega nesse estágio e o sinal de clock ocorre novamente, o componente reativa a porta Q0 e desliga a Q9. Esse recurso cíclico de contagem com ativação individual das portas é o que possibilita a Tungui I de executar o sequenciamento.

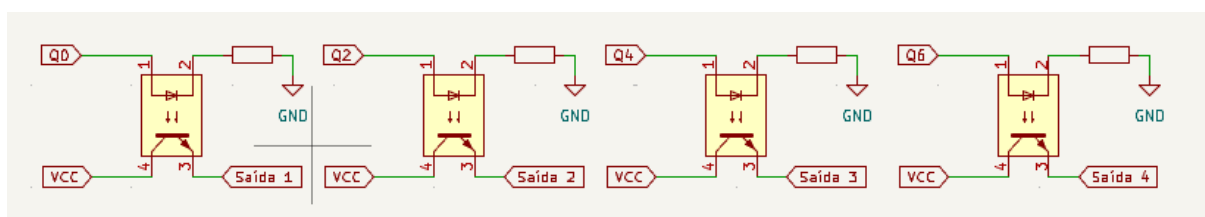
Além das saídas, é necessário também compreender os outros pinos que compõem o componente. O pino CO (“carry out”) fica ALTO quando a contagem está entre a porta Q5 e a Q9 (algo que não foi utilizado no circuito). O pino CI quando ligado a um nível lógico alto faz com que o componente “ignore” qualquer sinal de clock que faria as portas transicionarem. Já o pino MR quando pulsado com nível lógico alto faz com que o CD4017 recomece sua contagem da porta Q0 independente estágio estiver. Conectando MR à uma das saídas do componente faz com que o CD4017 recomece a contagem quando chegar na porta em questão. Por exemplo, conectando-se a porta Q5 ao pino MR faz com que esse só conte até a porta Q4 antes de reiniciar a contagem.

Porém, pode-se notar rapidamente que é necessário mais que um desses componentes para o circuito do dispositivo em questão, uma vez que esse precisa contar até 16 e não só até 10. Para solucionar essa questão, fez-se uso de dois CD4017 e outros componentes interligados em uma forma matricial. O princípio que motivou o autor a formular a estrutura do circuito do sequenciador foi a necessidade de gerar 16 saídas lógicas independentes que seriam utilizadas individualmente como os passos da sequência.

Um esquema matricial 4 x 4 se demonstrou promissor para a demanda, onde cada fileira da matriz é controlada por um dos CD4017 e cada coluna pelo outro (uma vez que estes podem contar até 4 utilizando o recurso da porta MR para reiniciar a contagem por meio de uma das saídas do componente). Associando cada elemento matricial com uma saída independente, pode-se obter as 16 saídas desejadas.

Eletronicamente, isso foi obtido utilizando 4 saídas do primeiro CD4017 (nomeado de UA) e ligando a cada uma delas o pino de alimentação de um opto-acoplador. Ligando o potencial VCC na entrada do opto-acoplador faz com que quando este seja ativado pelo 4017, sua saída possua tensão de aproximadamente VCC, obtendo-se uma saída lógica por opto-acoplador. É necessário notar que resistores de limitação de corrente para os opto-acopladores são necessários para não queimar os componentes, como pode ser visto na Figura 15.

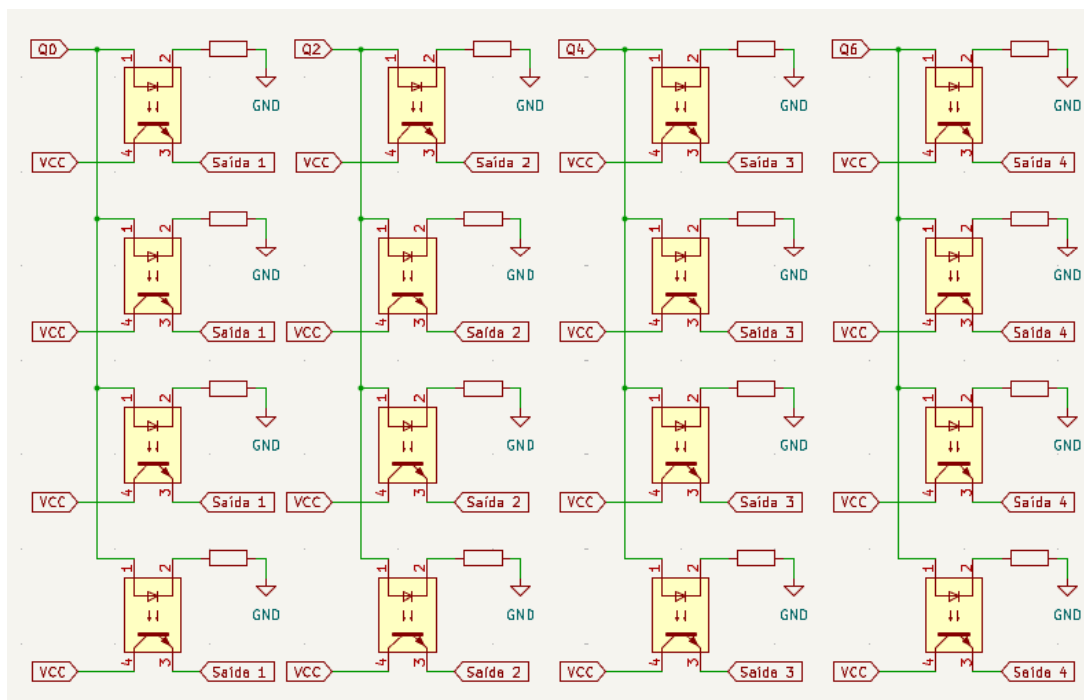
Figura 15 – Saídas do primeiro CD4017 ligadas em opto-acopladores.



Fonte: elaborada pelo autor.

Dessa forma teria-se apenas 4 saídas independentes, então adicionou-se mais 3 fileiras de opto-acopladores, resultando em 4 opto-acopladores por saída do UA, como visto na Figura 16. Nota-se que as saídas utilizadas não são as Q0, Q1, Q2 e Q3, algo que será esclarecido posteriormente porquê.

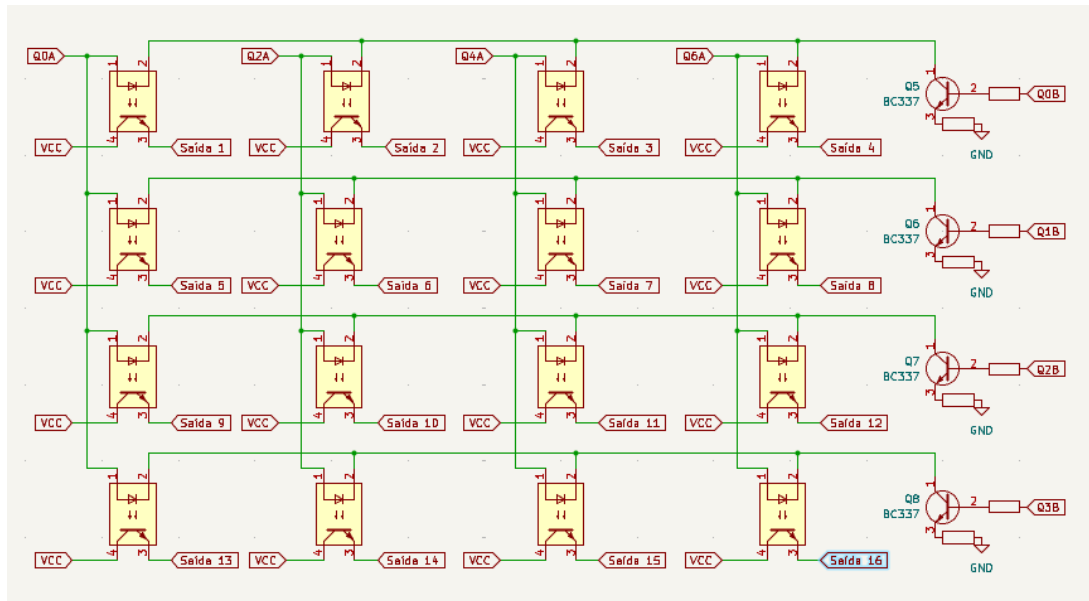
Figura 16 – 4 opto-acopladores ligados por saída do primeiro CD4017.



Fonte: elaborada pelo autor.

Porém, dessa forma quando o UA ativasse qualquer porta, 4 saídas ligariam simultaneamente, impossibilitando a obtenção de 16 saídas independentes (apenas uma deve estar ligada por vez, não quatro). Para resolver isso, foi necessário a utilização de um segundo CD4017 (nomeado de UB). Associando uma saída de UB a cada fileira de opto-acopladores, pôde-se ativar individualmente cada elemento de cada fileira. Eletronicamente, isso foi feito utilizando um transistor TBJ para controlar o fluxo de corrente de alimentação de cada fileira de opto-acopladores, mostrado na Figura 17.

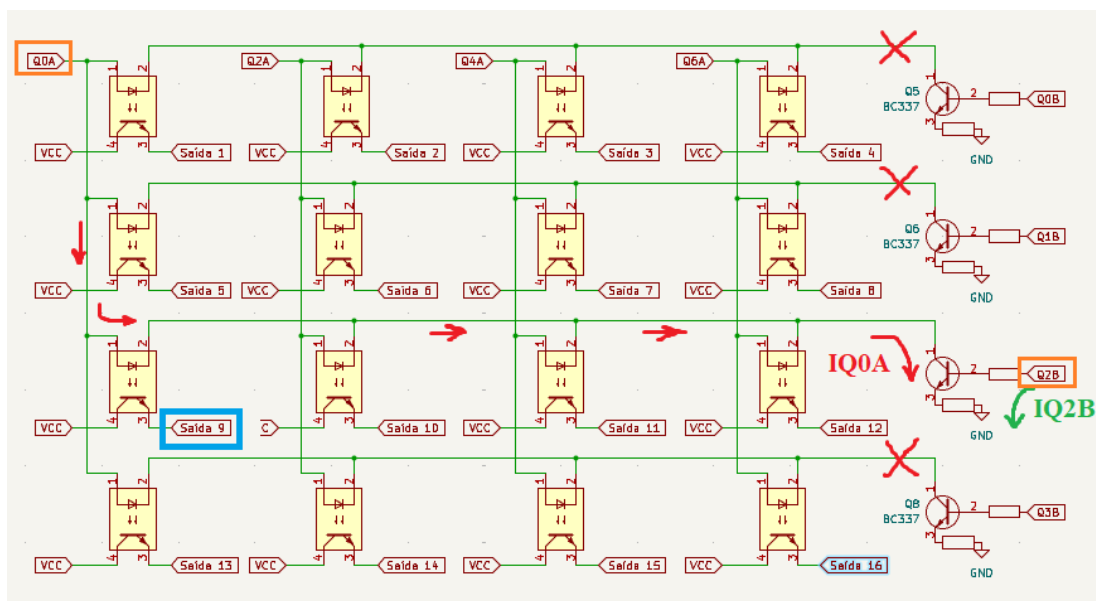
Figura 17 – Ativação individual de cada um dos opto-acopladores para a obtenção de 16 saídas independentes.



Fonte: elaborada pelo autor.

Agora, apesar de que 4 opto-acopladores estão ligados em cada saída de UA, apenas um deles pode ser ativado por vez, pois UB chaveia apenas um TBJ de controle de fileira por vez. Por exemplo, se Q0A e Q2B estão ativadas, UA vai fornecer o potencial de ativação para toda a primeira coluna de opto-acopladores, porém só a terceira coluna está ativada, logo a saída independente que será ativada será a Saída 9 quando a corrente oriunda de Q0A (I_{Q0A}) conseguir fluir até o terra por causa de corrente de Q2B (I_{Q2B}) que satura o transistor. A Figura 18 demonstra o exemplo.

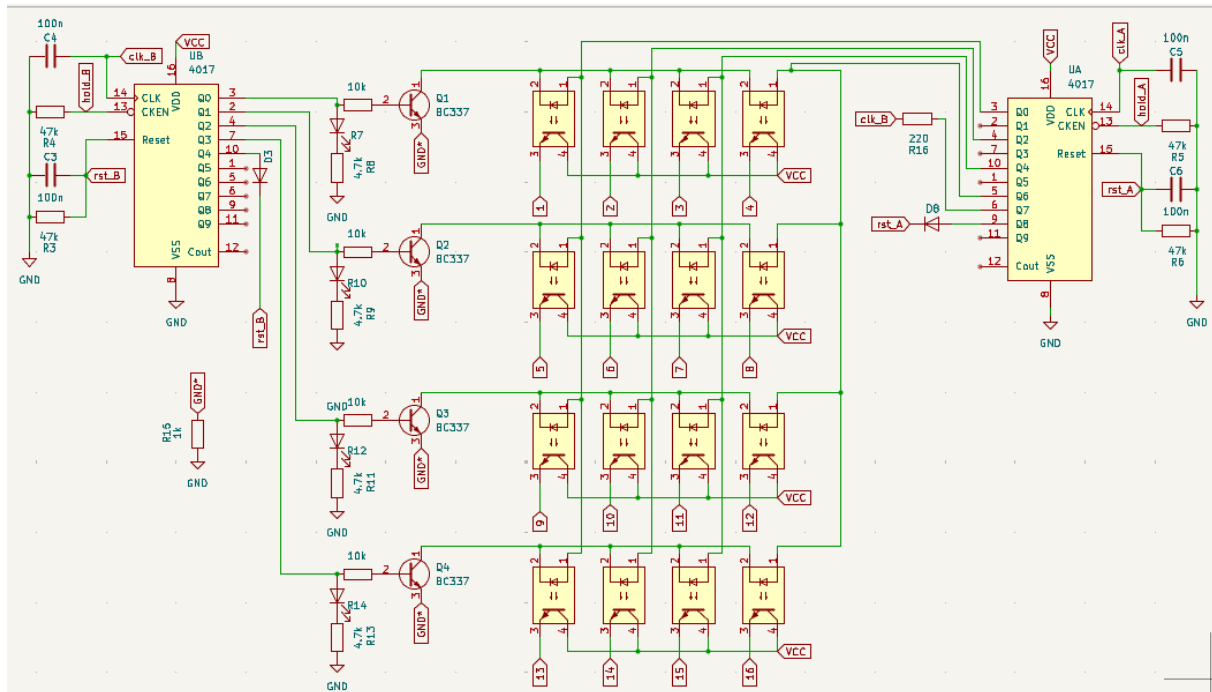
Figura 18 – Exemplo de ativação de uma das portas de saída por meio da operação sincronizada dos dois CD4017.



Fonte: elaborada pelo autor.

Com a arquitetura do circuito determinada, pode-se associar cada uma das 16 saídas a um passo individual da sequência. Porém, deve-se notar que para obter a característica linear da sequência, é necessário uma espécie de sincronia entre UA e UB. Para que a contagem seja feita da saída 1 até a 16 foi necessário a seguinte configuração: Quando iniciados, UA e UB ativam as portas Q0A e Q0B. Um comando pulsante de *clock* do multivibrador (nó clkA) na porta CLK de UA faz com que UA transicione até chegar na porta Q6A. Por Q0B estar ativado, as saídas 1, 2, 3 e 4 conseguiram ser ativadas em ordem. Porém, quando UA transiciona para Q7A, um comando de *clock* é enviado à porta CLK de UB, fazendo esse desligar o primeiro TBJ e ativar o da segunda fileira. Transicionando para a saída Q8A, UA envia um pulso ao seu próprio pino MR, fazendo esse retornar à porta Q0A. Assim, volta a contar até a porta Q8A novamente, porém agora apenas os opto-acopladores da segunda fileira estão ligados ao terra, fazendo com que as saídas 5, 6, 7 e 8 liguem. Esse ciclo se repete até o elemento da última fileira e da última coluna (saída 16) seja ativado. Após isso, UB envia um pulso ao seu próprio pino MR e retorna à saída Q0B, fazendo todo o ciclo de 16 contagens reiniciar. Estabelecida a arquitetura necessária para obter as 16 saídas, consolidou-se o circuito como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Arquitetura final do circuito sequenciador de 16 passos.

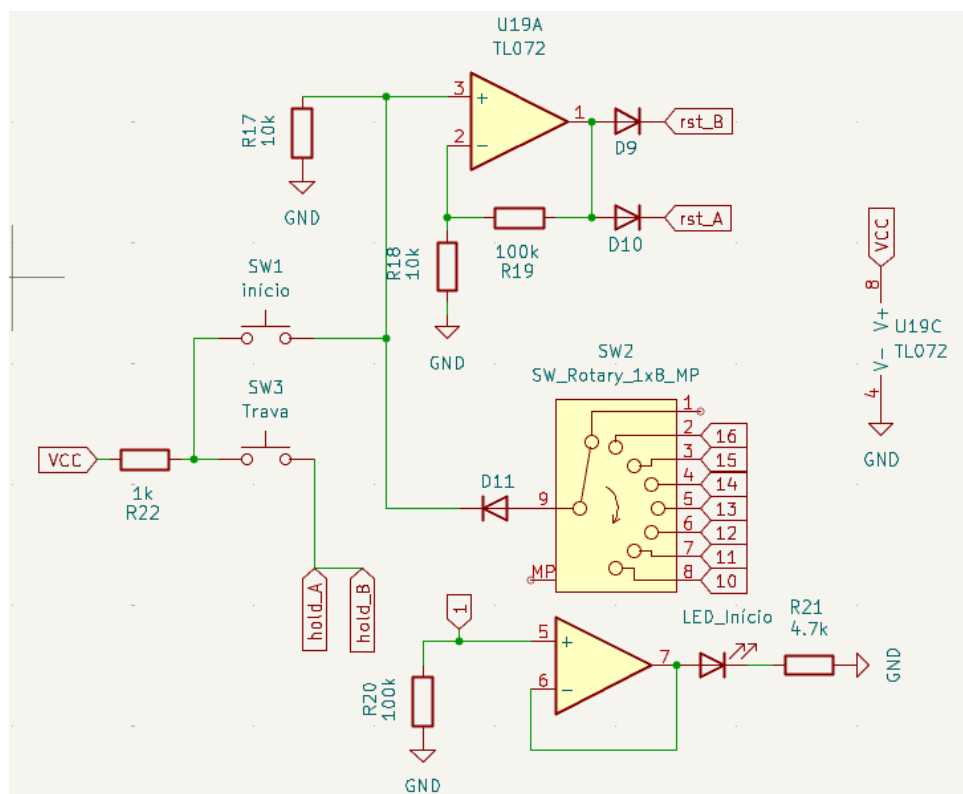


Fonte: elaborada pelo autor.

Além dos resistores de “pull down”, adicionou-se também capacitores de 100 nF às portas MR e CLK para melhorar a estabilidade, uma vez que quando testado sem esses componentes o circuito funcionava erráticamente. Adicionou-se também LEDs de indicação de qual fileira está ativada conectando esses em paralelo com as saídas de UB na placa. Utilizou-se apenas um resistor (R15) para limitar a corrente de todos os opto-acopladores, uma vez que apenas um deles é ativado por vez. A entrada clkA do 4017 UA é onde o multivibrador pulsa seu sinal quadrado que determina o BPM da sequência.

Nota-se que com essa configuração, pode-se apenas obter uma sequência de 16 passos. Além disso, o circuito ainda careceria dos controles de trava da sequência (botão que quando segurado mantém a sequência “congelada”) e o de reinicialização. Para isso, elaborou-se o seguinte circuito da Figura 20.

Figura 20 – Controle de tamanho, trava e reinicialização da sequencia.



Fonte: elaborada pelo autor.

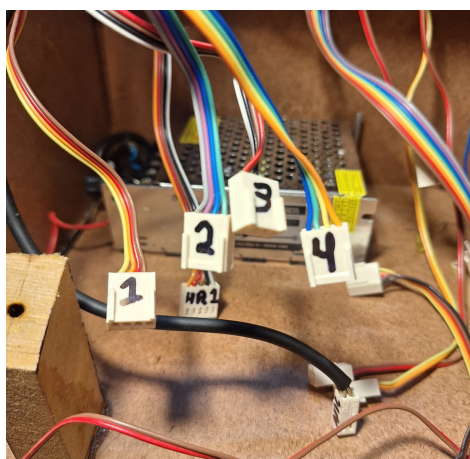
Segurando o botão “Trava”, aplica-se um potencial ALTO nas portas CI dos CD4017, fazendo com que ambos ignorem a contagem do multivibrador, assim congelando a sequencia. Pressionando uma vez o botão início gera-se um pulso de corrente que o amplificador operacional superior amplifica e retifica utilizando os diodos D9 e D10. Esse amplificador configurado como não inversor foi necessário como uma espécie de “*buffer*” que satura a saída com seus sinais lógicos de entrada, pois o sinal de reinício oriundo das saídas selecionáveis da chave rotatória não eram capazes de causar a reinicialização. A implementação desse saturador permite a geração de um sinal de tensão igual a VCC com uma baixa impedância de saída. A utilização dos diodos D9 e D10 se deu para evitar que corrente flua para dentro da saída do amplificador operacional quando os CD4017 enviassem pulsos às suas respectivas portas MR. Um resistor de 1K foi utilizado por segurança para limitar a corrente dos controles de trava e reinício.

A chave seletora funciona trazendo o sinal das últimas 7 saídas das 16 possíveis e usando esses sinais para causar a reinicialização dos dois CD4017. Utilizando a saída 16 para reiniciar, a sequencia conta até 15. Utilizando a 15, a sequencia vai até a 14 e assim por diante. Fez-se com que o tamanho máximo selecionável da sequencia fosse 16 e o tamanho mínimo de 9 passos. O diodo D11 foi colocado para impedir que corrente flua para as saídas a partir do pressionamento do controle de Início. Utilizando o outro amplificador operacional que o TL072 fornece, criou-se um seguidor de tensão para ativar o LED Início (localizado no painel superior) toda vez que a sequência voltasse para a saída 1 sem causar queda de tensão no pulso da primeira saída.

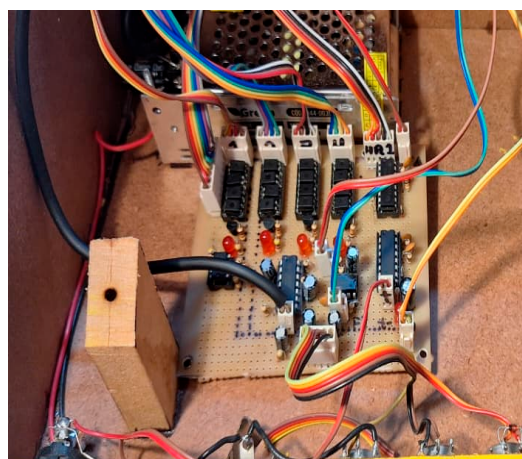
Após construído o sequenciador, foi necessário elaborar uma forma de conectar as 16 saídas para as sequencias das vagas no painel principal. Para isso, utilizou-se 4 cabos de 4 vias (um para cada fileira de opto-acopladores), conectados à placa mãe via conectores do tipo KK. Isso permite a remoção dos cabos caso aja necessidade da manutenção da placa mãe da Tungui I. Cada cabo foi numerado com a fileira que corresponde, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Conectores do tipo KK utilizados no sequenciador e na placa mãe Tungui I.

(a) Cabos dos passos do sequenciador com conectores do tipo KK fêmea.



(b) Placa mãe da Tungui I com cabos conectados via conectores do tipo KK.

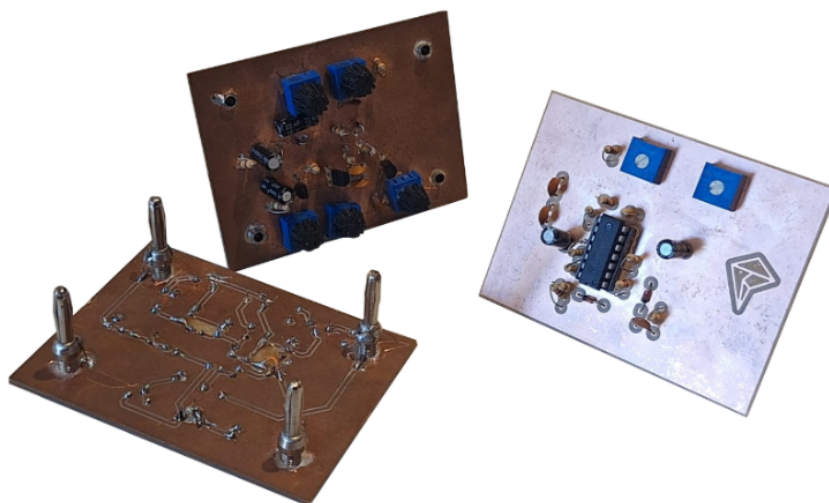


Fonte: elaborada pelo autor.

5.3 Módulos

Nessa subseção serão abordados os módulos de síntese de áudio. Uma foto de alguns dos módulos pode ser vista na Figura 22.

Figura 22 – Módulos da Tungui I.



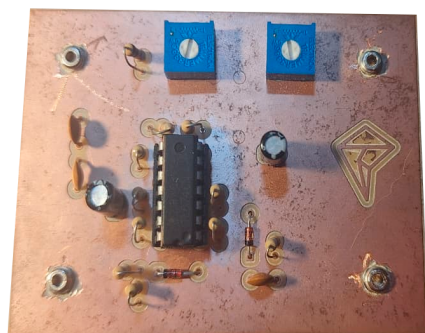
Fonte: elaborada pelo autor.

Os módulos são os circuitos responsáveis por gerar os sinais de áudio que a Tungui I fornece em sua saída. Esses circuitos foram baseados em circuitos já utilizados por amadores de síntese de áudio dada a necessidade de poucas peças para montá-los. Para obter as características dos sinais de saída dos módulos, foram construídos 4 módulos, 2 dos quais são iguais e reproduzem um sinal análogo ao som de um tambor ou bumbo ou tom (Figura 23a), e os outros dois (também iguais) reproduzem um som ruidoso que em algumas configurações remete ao som de um chimbal (Figura 23b). Uma fotografia dos dois módulos distintos pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 – Módulos construídos para a Tungui I.

(a) Módulo de síntese de bumbo ou tom.

(b) Módulo de síntese de ruído.



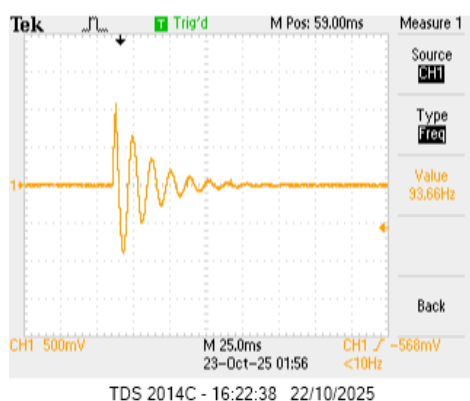
Fonte: elaborada pelo autor.

5.3.1 Módulo de bumbo ou tom

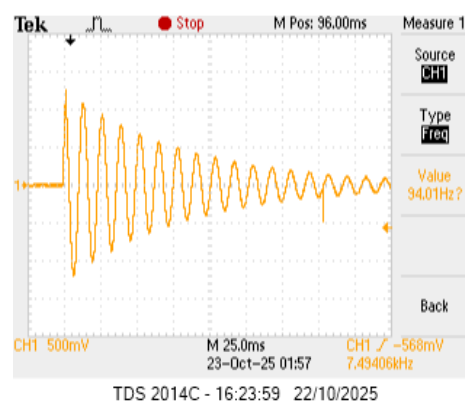
Esse módulo utiliza um circuito que gera um sinal senoidal amortecido quando disparado. Tal característica é muito similar ao comportamento de um sistema massa-mola amortecido (como um tambor). Nesse módulo o usuário tem liberdade de alterar a frequência de ressonância do circuito, isto é, a frequência fundamental que o circuito oscila quando excitado por um sinal externo (nesse caso, o sinal de disparo da sequência da vaga na qual o módulo está inserido). Por ser construído com a intenção de simular o som de um tom ou bumbo, essa oscilação tem comportamento próximo a um sinal senoidal, assemelhando-se a um tom puro. Além desse parâmetro, o usuário pode alterar a taxa na qual o sinal decai em amplitude (e consequentemente o seu volume) por meio do controle de amortecimento da oscilação. Na Figura 24a e b pode-se ver a diferença entre um amortecimento alto e baixo. Caso o parâmetro de amortecimento seja

Figura 24 – Comportamentos do sinal do módulo de bumbo ou tom variando-se o controle de amortecimento.

(a) Amortecimento alto.



(b) Amortecimento baixo.



Fonte: elaborada pelo autor.

completamente zerado, o circuito entra em auto-oscilação e gera um sinal de saída senoidal sem a necessidade de um impulso para gerar-lo. Esse comportamento foi utilizado para testar partes do circuito como será apresentado posteriormente.

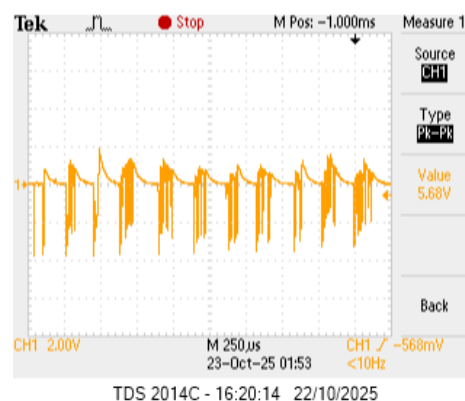
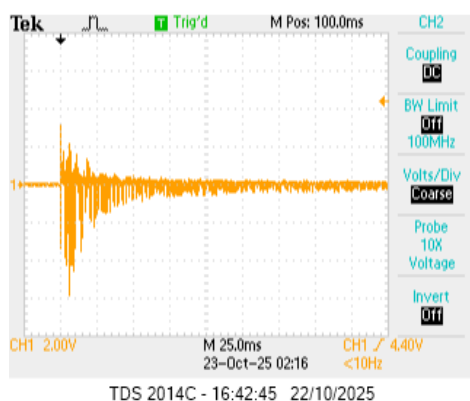
5.3.2 Módulo de ruído

Esse módulo faz uso de um gerador de ruído que possui dois controles da envoltória do sinal (ataque e decaimento) e três que controlam interdependente e imprevisivelmente o timbre e pulsação do sinal de áudio. Dois exemplos de formas de onda do módulo podem ser vistos na Figura 25.

Figura 25 – Exemplos de comportamentos possíveis do módulo de ruído.

(a) Decaimento alto.

(b) Sinal pulsado.

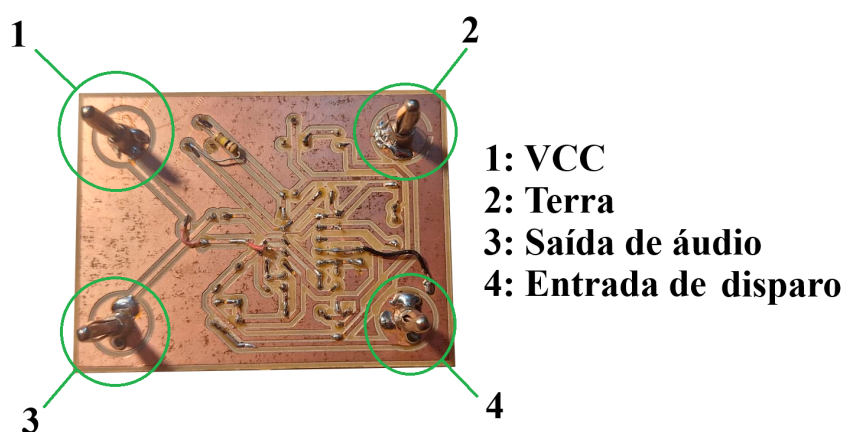


Fonte: elaborada pelo autor.

5.3.3 Detalhes dos módulos

Além de garantir firmeza e acoplamento ao gabinete, os quatro conectores do tipo banana dos módulos servem para interligar os circuitos de síntese e o da Tungui I, e cada um deles possui um papel diferente, como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Pinagem dos módulos de síntese.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os pinos 1 e 2 servem para a alimentação do módulo. O pino 4 é por onde o disparo da sequencia faz com que o módulo emita seu sinal de áudio pelo pino 3.

Algo importante para se considerar a respeito do disparo dos módulos é que esse só funciona quando o pulso de disparo varia de nível alto e depois para baixo. Caso os sinais de disparo não tivessem intervalos de nível baixo entre si, ou seja, não tivessem períodos nos quais há

uma interrupção antes de vir o próximo, a entrada de disparo dos módulos ficaria saturada e só dispararia uma vez. É por esse motivo que no circuito de sequenciador optou-se por não utilizar as saídas Q0, Q1, Q2 e Q3 do CD4017 (UA) em sequência, mas sim uma intercalação de saídas: Q0, Q2, Q4 e Q6. Dessa forma, a saída ocorre de forma alternada entre intervalos de nível lógico ALTO e nível lógico BAIXO (correspondente às portas que foram ignoradas), possibilitando os módulos pulsarem continuamente. Isso por outro lado custou o fato de que o LED que indica a frequência pisca duas vezes mais rápido que o BPM estabelecido.

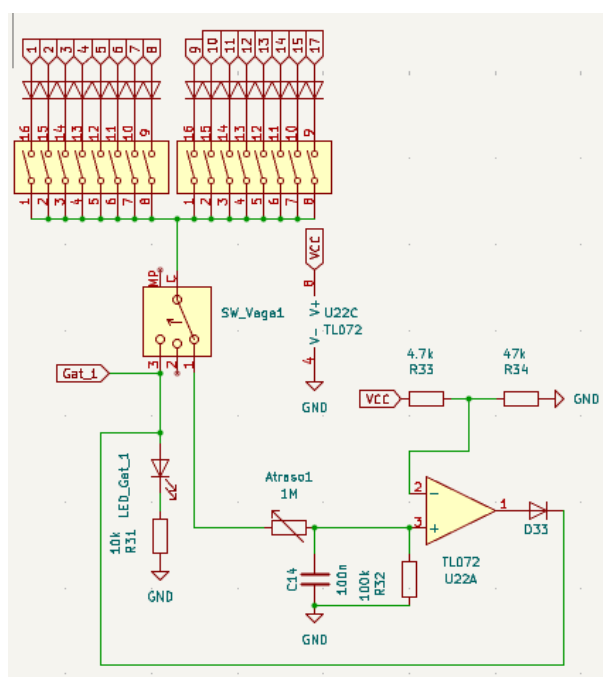
5.4 Vagas

Nessa subseção será explicado a disposição dos terminais de encaixe, controle de volume e o sistema de disparo das vagas para os módulos emitirem seus sinais de áudio. A Figura 28 mostra o que compõe uma das vagas de dentro do gabinete.

5.4.1 O sistema de disparo

Após analisar o multivibrador gerador de sinal de *clock* e o sequenciador que conta até 16, é necessário compreender como se faz uso dessas 16 saídas como passos da sequência e como cada vaga pode ter a sua própria sequência de disparos independentemente da configuração das outras. A estrutura apresentada na Figura 27 é a mesma para as quatro vagas da Tungui I e basta compreender o funcionamento de uma para entender todas.

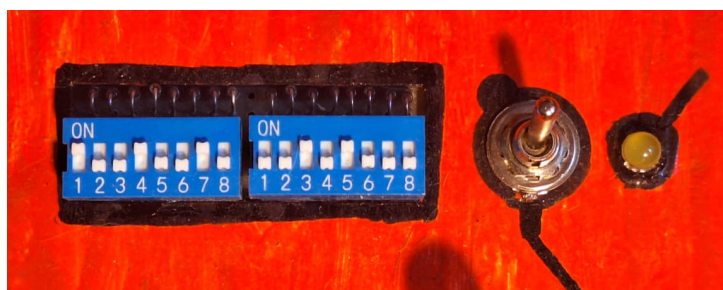
Figura 27 – Controles de sequência de uma das quatro vagas.



Fonte: elaborada pelo autor.

As sequências das vagas são compostas por dois “*dip-switch*” de 8 chaves. Esses componentes são mini interruptores encapsulados dentro de um só gabinete. Utilizando duas peças obtém-se 16 mini chaves que são usadas como os seletores dos passos nos quais a vaga dispara seu módulo. Essa abordagem foi elaborada pelo autor e apresenta enorme vantagem para a disposição de um controle de sequência de tamanho ínfimo. Enquanto baterias eletrônicas de *euro rack* fazem uso de chaves individuais para cada passo (ocupando uma área enorme no painel do dispositivo), a utilização de *dip-switch* possibilita o uso de um painel que pode ser notavelmente menor, dando espaço para outros controles diversos, uma otimização pensada pelo autor. Um exemplo de quão simples é configurar uma sequência rítmica na Tungui I é apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Sequência de uma das vagas composta por dois *dip-switch* configurada em um ritmo de funk carioca.



Fonte: elaborada pelo autor.

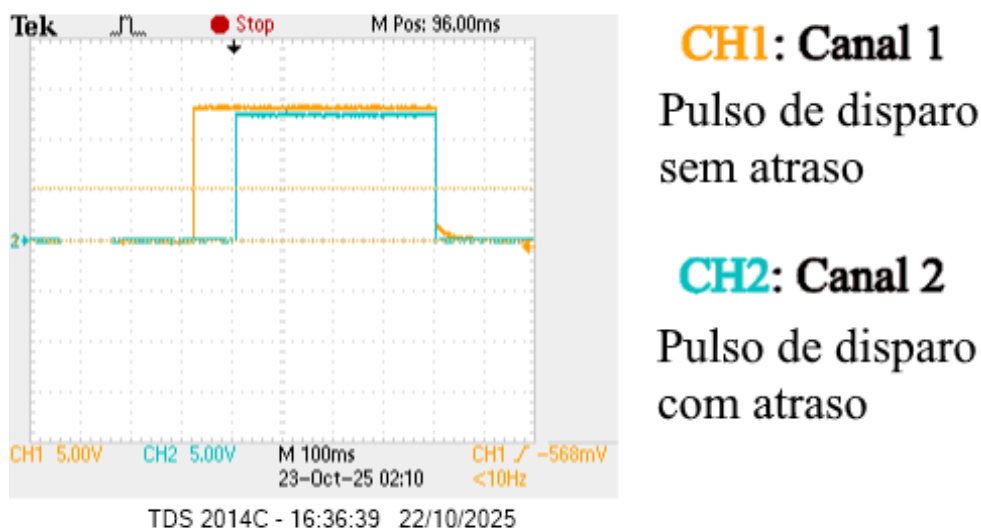
Todas as mini chaves da vaga tem um de seus terminais em curto para onde vai os pulsos de ativação do módulo. Conectando as 16 saídas no outro terminal das 16 mini chaves, pode-se decidir em qual passo a vaga dispara o módulo, isto é, qual das 16 saídas dos opto-acopladores pulsará nível alto para a vaga em questão. Esse recurso é o que define o padrão rítmico em que a vaga vai operar. A utilização de um diodo para cada passo é absolutamente necessário esses impedem das sequências de outras vagas interferirem entre si.

Por meio da chave SWVaga1 (chave de 3 posições e uma via) o usuário pode escolher se a vaga conecta-se ou não à sua sequência. Na posição 2 a chave desconecta a sequência do sistema de disparo. Na posição 3 qualquer passo ativado da sequência pulsará um sinal lógico ALTO instantaneamente para o conector de disparo da vaga (Gat1), piscando o LEDGat1 para indicar o pulso.

Caso a chave esteja ligada na posição 1, o pulso de disparo passa por um circuito atrasador, que apenas cria um sinal alto com um breve atraso comparado com os de disparo oriundos dos opto-acopladores. Pulsando um nível alto na posição 1 da chave SWVaga1 faz com que corrente flua através do potenciômetro Atraso1 e pelo capacitor C14 e pelo resistor R32. Essa configuração faz com que a tensão na entrada não inversora do amplificador operacional cresça conforme o capacitor é carregado através do potenciômetro. Quando a tensão do capacitor supera a tensão estabelecida pelo divisor de tensão na entrada inversora, o amplificador operacional

muda sua saída para nível ALTO, enviando o sinal atrasado para o pino de disparo da vaga. O tempo de atraso do disparo é determinado pela taxa em que o capacitor carrega, algo controlável pelo potenciômetro Atraso1. O resistor R32 é usado para descarregar o capacitor uma vez que não esteja mais sendo carregado, evitando saturação. Uma comparação entre os sinais de disparo sem e com atrasos pode ser visto na Figura 29.

Figura 29 – Comparação do pulso de disparo (amarelo) e o mesmo pulso atrasado (azul).



Fonte: elaborada pelo autor.

Observando a Figura 29, nota-se que o sinal em azul ocorre depois do sinal em amarelo, adicionando-se um atraso ao disparo do módulo da vaga. Apesar de funcional, o sistema de atraso de pulso possui uma falha intrínseca à arquitetura do circuito. A energia de um pulso individual fornecida ao sistema de atraso (oriunda dos opto-acopladores) é determinada pela frequência do multivibrador, sendo menor em maiores frequências e maior em menores frequências. Isso ocorre pois em baixas frequências, o pulso é mais alongado temporalmente, possuindo mais energia e vice versa.

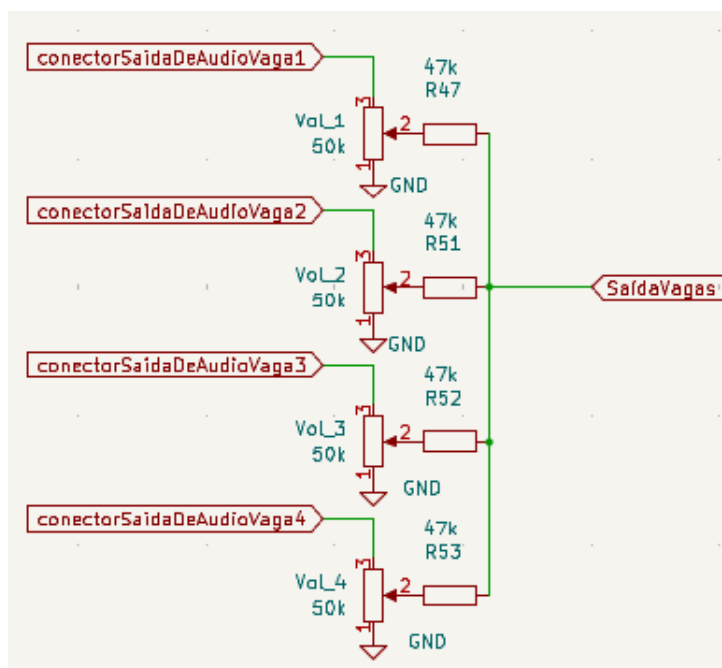
Por esse motivo, dependendo da resistência estabelecida no potenciômetro Atraso1 e da frequência do multivibrador, existe possibilidade que a energia fornecida ao capacitor em um pulso individual não seja o suficiente para superar a tensão da entrada inversora do amplificador operacional, fazendo com que esse não dispare o sinal atrasado de disparo.

E termos práticos, isso significa que em um BPM baixo, pode-se estender o atraso do disparo da vaga com maior liberdade (uma vez que o pulso de disparo dos opto-acopladores duram mais tempo), enquanto em BPM maiores pouco pode-se atrasar o disparo. O usuário pode notar que a partir de um certo grau da rotação do potenciômetro de atraso (que varia com o BPM), a vaga para de receber os pulsos de disparo assim não disparando o módulo.

5.4.2 Volume da vaga

Quando disparado por um pulso do sequenciador pelo conector de disparo da vaga, o módulo emite seu sinal de áudio pelo conector de saída de áudio. Esse conector por sua vez está ligado em um controle de volume individual da vaga cuja saída é misturada com a saída de volume de todas as outras vagas. O diagrama elétrico dessa parte do circuito é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Controle de volume das vagas.



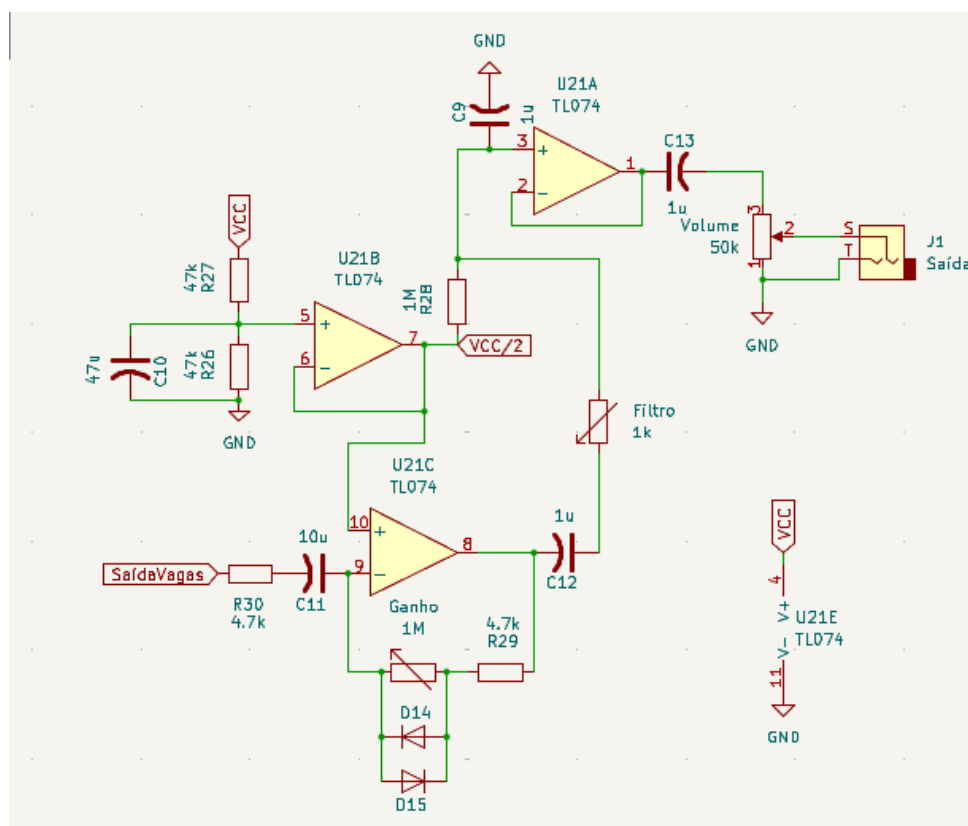
Fonte: elaborada pelo autor.

O volume de cada vaga pode ser controlado rotacionando o potenciômetro. Quando girado totalmente à direita, faz-se um curto entre o conector de saída (a saída de áudio do módulo) e a saída de áudio da vaga, providenciando volume máximo. Quando rotacionado totalmente à esquerda, faz-se um curto entre o terra e a saída de áudio da vaga, anulando qualquer possível sinal oriundo do módulo da vaga. Os resistores ligados após a saída de áudio da vaga (em série com os potenciômetros de volume) servem para aumentar a impedância entre as vagas impedindo que a alteração de volume de uma interfira substancialmente no volume da outra, permitindo a mistura (soma das amplitudes) dos sinais de todas as vagas. O sinal misturado das vagas passa então para o próximo estágio do circuito.

5.5 Efeitos e saída de áudio

Após o sinal de todas as vagas serem misturados, o sinal resultante é levado aos últimos estágios do dispositivo: efeitos de áudio, volume geral e saída geral da Tungui I. Nota-se que todos os controles referentes à essa parte do circuito estão dispostos no painel frontal do dispositivo. O diagrama elétrico dessa seção pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Diagrama elétrico do circuito de efeitos e saída de áudio baseado-se no uso de amplificadores operacionais.



Fonte: elaborada pelo autor.

5.5.1 Tensão de referência

Para analisar essa parte do circuito, é crucial começar pelo U21B e seu papel nesse estágio. R27 e R26 configuram um divisor de tensão de 1:2 criando um potencial de $V_{CC}/2$ na entrada não inversora do amplificador operacional U21B. O capacitor C10 serve para garantir estabilidade na tensão de referência criada e o amplificador operacional em configuração de seguidor de tensão recria o potencial de $V_{CC}/2$ em sua saída. Este fornece o potencial estabilizado aos outros dois amplificadores operacionais do circuito. Essa tensão de referência é necessária pois o circuito lida com sinais que oscilam entre potenciais positivos e negativos, porém a alimentação no fornecida ao dispositivo não conta com uma com potencial negativo fixo (apenas 13.7 V e 0 V), e os amplificadores operacionais não podem fornecer valores de tensão em sua saída que não estão presentes em sua alimentação. Isso impossibilitaria os amplificadores operacionais operarem corretamente com sinais em ciclos de tensão negativa. Criando a tensão de referência $V_{CC}/2$ pode-se deslocar os sinais no eixo da tensão a ponto de que toda a onda permaneça acima do valor mínimo de 0V, assim não corrompendo o sinal.

5.5.2 Estágio de ganho com ceifamento

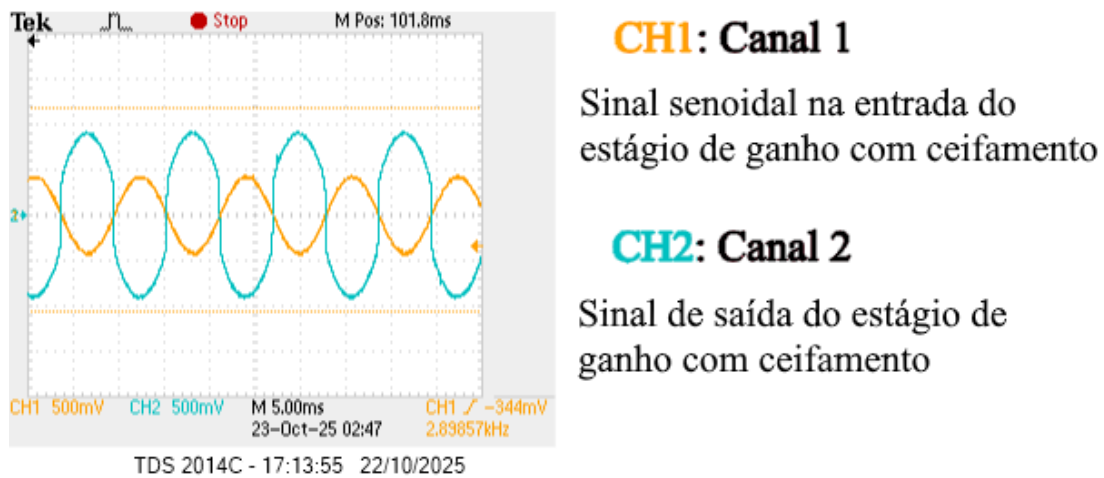
Criada a tensão de referência $VCC/2$ estabilizada, conecta-se à ela a entrada não inversora do amplificador operacional U21C. O sinal misturado das vagos passa pelo capacitor C11 de desacoplamento que impede qualquer resquício de corrente contínua de passar. Em seguida, inicia-se o estágio de ganho com o amplificador operacional U21C com o sinal deslocado para $VCC/2$ na sua entrada inversora. A equação do ganho de tal amplificador inversor é conhecida:

$$Av = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (2)$$

Onde R_2 corresponde a $(R_{\text{Ganho}} + R_{29})$, que configuram a impedância de realimentação do amplificador, e R_1 corresponde a R_{30} , a impedância de entrada. Nota-se que o ganho mínimo do amplificador em questão se dá quando o potenciômetro “Ganho” tem resistência mínima, fazendo com que o valor do ganho seja -1. Isso estabelece um mínimo de ganho para o sistema. No caso oposto, o ganho teórico máximo é de -213.77 V/V (Sedra, 2007).

Porém, nota-se a presença de dois diodos em anti-paralelo na malha de realimentação, o que invalida a equação previamente apresentada (pelo menos a partir de um ponto). Em termos práticos, são esses dois componentes que permitem a funcionalidade do ceifamento suave (em inglês *soft-clip*), um tipo de distorção que baseia-se no achatamento do sinal de saída que consequentemente introduz mais harmônicos ao sinal. Esse achatamento ocorre quando a tensão de saída excede em módulo a tensão de condução direta dos diodos (no caso foi utilizado o 1N4148 que possui tal parâmetro entre 0.4 e 0.9 V, a depender da corrente (VISHAY, 2024)), assim diminuindo a resistência da malha de realimentação e consequentemente diminuindo o ganho de tensão, o que causa o achatamento do sinal. Uma demonstração do efeito de ceifamento do amplificador inversor utilizando o módulo de bumbo como fonte de sinal pode ser vista na Figura 32.

Figura 32 – Comparação de um sinal de tensão senoidal de entrada (amarelo) e o sinal resultante na saída (azul) do estágio de ganho com ceifamento.



Fonte: elaborada pelo autor.

Percebe-se inicialmente uma defasagem de 180° dos sinais, o que se dá pelo fato do circuito amplificador utilizado ser inversor. Também nota-se que a forma de onda é amplificada e fica distorcida: o sinal parece crescer ou diminuir numa taxa mais alta até aproximadamente os 0.4 V (módulo), tensão na qual essa variação de tensão cai abruptamente em módulo. Essa mudança repentina de ganho se dá quando os diodos passam a conduzir. A utilização de dois diodos em anti-paralelo justifica-se pela inserção dessa distorção nos dois ciclos do sinal (um diodo conduz para o ciclo positivo e outro no negativo). Nota-se que o circuito utilizado não é capaz de fazer um ceifamento pleno (como um *hard-clip*). Isso se dá pelo fato de que os diodos não oferecem resistência nula quando conduzem, o que impede o amplificador de “achatar” completamente a saída. Em termos sonoros, esse ceifamento não introduz tanta distorção harmônica como poderia desejar-se, mas pela simplicidade do circuito entrega resultados razoáveis.

5.5.3 Filtro passa-baixo

Após o estágio de ganho, o sinal passa por um capacitor de desacoplamento e chega à um estágio de filtragem configurado pelo potenciômetro nomeado de “Filtro” e o capacitor C9. O módulo da função transferência de tal filtro é dada pela equação:

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}}. \quad (3)$$

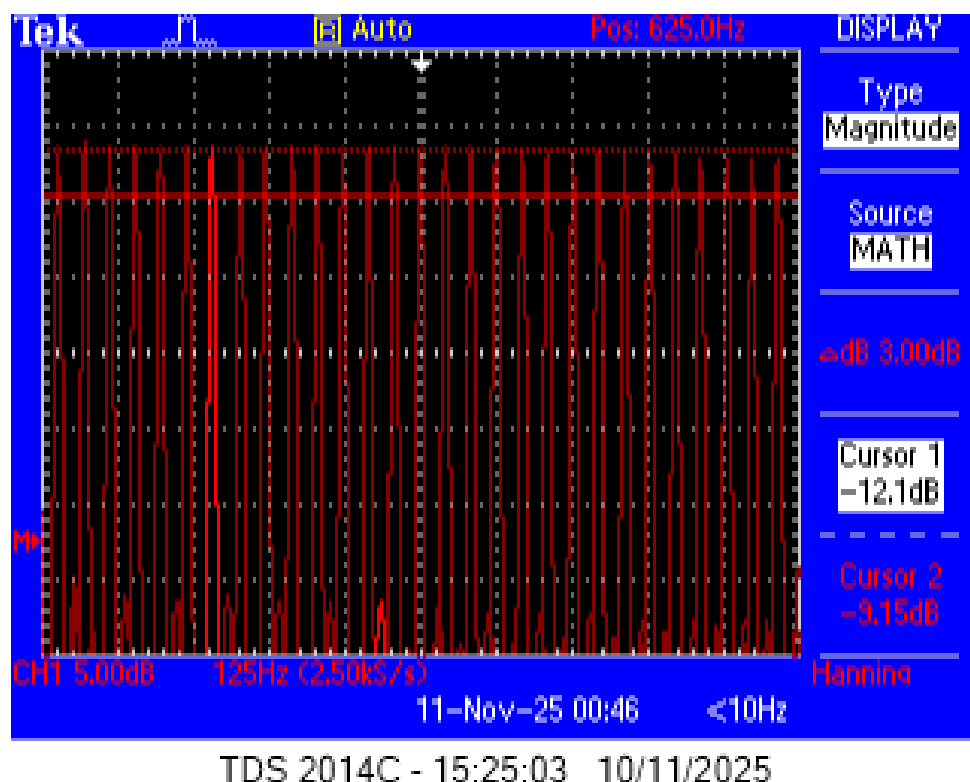
Onde R corresponde ao potenciômetro “Filtro” e C ao capacitor C9. A frequência de corte (frequência na qual a potência cai pela metade) é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (4)$$

Teoricamente, com um capacitor de $1\ \mu\text{F}$ e um potenciômetro de $1\ \text{k}\Omega$, obtém-se um filtro cuja frequência de corte varia de $159\ \text{Hz}$ até $15,9\ \text{kHz}$ (supondo que o potenciômetro consiga variar até $10\ \Omega$).

Para caracterizar o filtro construído, utilizou-se um gerador de função no modo varredura. Configurado dessa forma, o gerador de função gera um sinal senoidal cuja frequência varia de um valor inicial até um valor final em um intervalo de tempo (parâmetros configuráveis pelo usuário). Inicialmente, reduziu-se a resistência do potenciômetro de $1\ \text{k}\Omega$ e conectou-se a um canal do osciloscópio à saída do filtro (nó onde o capacitor C_9 está ligado) e ativou-se o modo FFT e persistência do cursor. Depois disso, a saída do gerador de função foi ligada à entrada do filtro e o resultado obtido pode ser visto na figura 33.

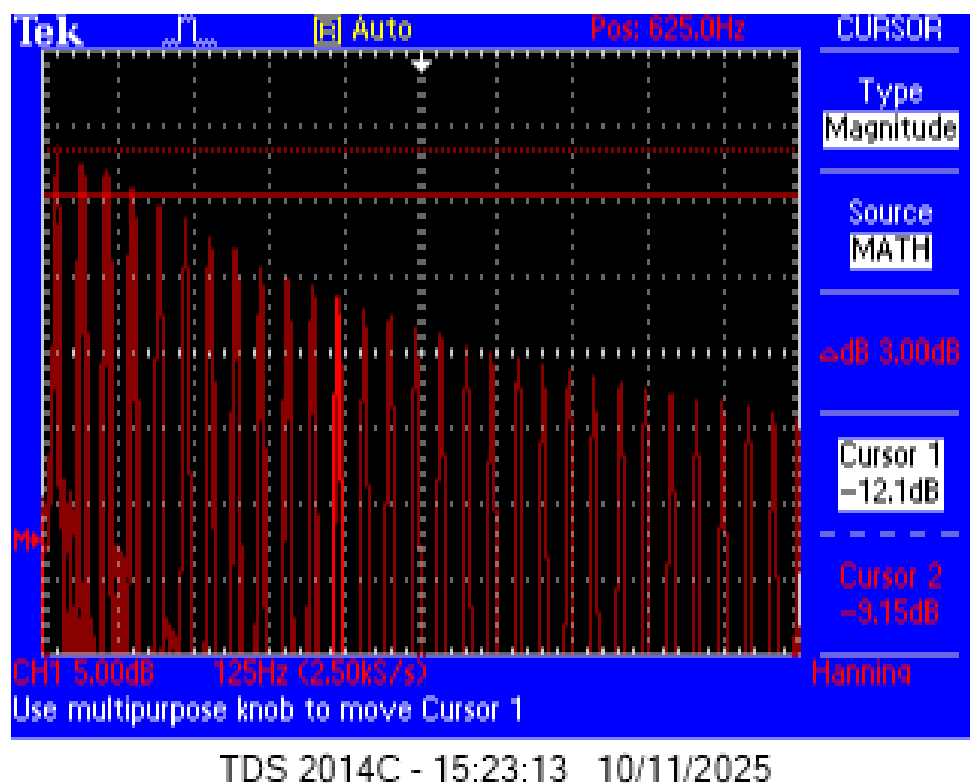
Figura 33 – Comportamento do sinal de varredura na saída filtro quando R_{Filtro} está com resistência mínima.



Fonte: elaborada pelo autor.

Após isso, aumentou-se a resistência de R_{Filtro} para seu máximo de $1\ \text{k}\Omega$ como pode ser visto na figura 34. Pode-se notar o comportamento de filtragem passa-baixa pois o sinal de varredura tem sua amplitude cada vez mais atenuada conforme a frequência aumentava. Ademais, colocando os cursores de amplitude na tela do osciloscópio, pôde-se notar que a frequência de corte do filtro ficou entorno de $175\ \text{Hz}$, valor próximo do que foi previsto na teoria.

Figura 34 – Comportamento do sinal de varredura na saída do filtro quando R_{Filtro} está com resistência máxima.



Fonte: elaborada pelo autor.

5.5.4 Saída de áudio

Por fim, após o filtro passa-baixa, o sinal passa por um capacitor de desacoplamento e retorna a oscilar em torno de 0 V. Um potenciômetro de saída controla o volume do sinal combinado, amplificado e filtrado que chega ao conector P10 no painel frontal do aparelho. A potência de saída da Tungui I não é suficiente para alimentar um alto-falante, logo é necessário a utilização de um amplificador de áudio para a excitação de uma caixa de som para o usuário poder ouvir o som da bateria eletrônica.

6 CONCLUSÃO

Os módulos acabaram tendo grande área de suas placas inutilizadas, o que demonstra a possibilidade de reduzir ainda mais suas dimensões definidas para o projeto. Todavia, a utilização de *trimpots* para o controle de parâmetros dos módulos (que só foi possível por conta do uso dos *knobs* impressos na impressora 3D), demonstrou aptidão para o contexto dadas algumas necessárias otimizações para fixação da peça na placa, e foi o principal fator que permitiu a elaboração de placas pequenas. Além disso, no processo de diagramação dos módulos no *software* Kicad, utilizou-se apenas uma das faces das placas para traçar as trilhas e ilhas para os componentes, e em alguns casos foi necessário o uso de fios externos para fazer conexões de componentes distantes. O uso das duas faces facilitaria ainda mais o processo, reduzindo o número de peças necessárias para a montagem dos módulos.

Por outro lado, o processo de instalação dos *knobs* acabou sendo muito difícil, dada a necessidade de colar-se uma peça muito pequena com supercola no eixo da resistência variável, que muitas vezes resultava na cola penetrando o componente e travando completamente a rotação do eixo. Aplicando menos cola resultou muitas vezes numa fixação frágil entre o *knob* e o *trimpot*, o que dificulta ainda mais o processo de fixação das duas peças. Essa etapa de construção demonstrou-se ser uma das que mais demanda otimização dada a quantidade de peças perdidas por colagens ruins.

Já a em relação à placa mãe da Tungui I, que foi construída em placas de circuito ilhadas, acabou demandando grandes quantidades de fios de conexões entre partes do circuito na placa. Provavelmente, se a placa mãe tivesse sido diagramada e cortada como os módulos, seria poupado muito tempo de trabalho e fios de conexões entre componentes (o que aumenta a fragilidade da placa).

Analisando o resultado final da Tungui I, pode-se afirmar que o objetivo de se construir um dispositivo de operação intuitiva visando o minimalismo foi alcançado, uma vez que existem poucos parâmetros para controlar a bateria eletrônica, sendo que muitos deles se repetem para cada vaga do dispositivo. O uso das mini-chaves *dip switch* foi essencial para possibilitar um gabinete mais compacto, além de intuitivamente representar uma linha do tempo discretizada em passos para que o usuário criasse seus ritmos de forma fácil e visual. Complementando ao minimalismo operacional, em termos estéticos a Tungui I se demonstrou convidativa para usuários de todas as idades e propósitos, algo que o autor priorizou ao longo do planejamento e *design* do aparelho, uma vez que a experiência de usuário não foi pensada de forma exclusiva para usuários de experiência musical elevada, mas sim para que todos pudessem desfrutar da forma que for. Já em termos de acessibilidade financeira, o projeto da Tungui I conseguiu atingir a meta de baixo custo para fabricação. Fazendo uso de componentes de fácil acesso e baixo custo, a bateria eletrônica foi construída completamente por menos de R\$ 700, e dadas as possíveis otimizações de processos, esse custo pode ser reduzido ainda mais.

REFERÊNCIAS

- ALLABOUTCIRCUITS. Timer astable oscillator circuit 555. **AllAboutCircuits**, 2018. Acesso em: 6 out. 2025. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/tools/555-timer-astable-circuit>.
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos**. [S.l.]: Pearson, 2012.
- BOYLESTAD, R. L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. [S.l.]: Pearson, 2013.
- BUILDELECTRONICCIRCUITS. **CD4017 A Decade Counter**. 2020. <https://www.build-electronic-circuits.com/4000-series-integrated-circuits/ic-4017/>. Acessado em: 06 dez. 2025.
- ELECTRONICTUTORIALS. 555 timer tutorial. **ElectronicTutorials**, 2022. Acesso em: 5 out. 2025. Disponível em: <https://www.electronics-tutorials.ws/waveforms/555oscillator.html>.
- GEEKSFORGEEKS. Difference between uniform and non-uniform quantization. **GeeksForGeeks**, 2025. Acesso em: 9 set. 2025. Disponível em: <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/difference-between-uniform-and-non-uniform-quantization>.
- KICAD EDA. <https://www.kicad.org/>. Acessado em: 06 dez. 2025.
- KLEIN, M. **Designing a simple analog kick drum from scratch**. 2023. Vídeo. Disponível em: <https://youtu.be/yz37Yz315eU?si=D0hYfFvFRVBRo8U>.
- LLAMAMUSIC. **Roland S-50**. 2025. Website. <https://llamamusic.com/s50s550/s-50s-550.html>.
- MARIANO, C. C. Uma história das drum machines no brasil. **Volume Morto**, 2019. Acesso em: 8 set. 2025. Disponível em: <https://volumemorto.com.br/historia-drum-machines-brasil>.
- REVERB. **Electric Rhythm: The History of the Drum Machine | Reverb**. 2019. Vídeo. Disponível em: <https://youtu.be/4d89S-jOsfY?si=nZEKpJ1CAVITGN1i>.
- Rhino RHINO. <https://www.rhino3d.com/>. Acessado em: 06 dez. 2025.
- SALFORD, U. of. Principles of sound synthesis. 2011. Acesso em: 9 set. 2025. Disponível em: https://web.archive.org/web/20160120080457/http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics_info/sound_synthesis/?content=index.
- SEDRA, K. C. S. A. S. **Microeletrônica**. [S.l.]: Pearson, 2007.
- SOUND, C. **Project XII Modular Part 10: Hi-Hat Snare**. 2020. Vídeo. Disponível em: https://youtu.be/Na_zttkX7ls?si=axQObxC5So74g3Q.
- SWEETWATER. **What Is a Sequencer? – Daniel Fisher**. 2022. Vídeo. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=1jbbLUEA8Et=193s>.
- SYNTHROTEK. **DS-M - Analog Drum Synth Module**. 2014. Texto. Disponível em: https://store.synthrotek.com/ds-m_analog_drum_synth_module?srsltid=AfmBOodKePdGk8fq2pynpu93HXWjnPGhpTmJ9JyMBzHNsC2Qj9FOz.

Tinkercad TINKERCAD. <https://www.tinkercad.com/>. Acessado em: 06 dez. 2025.

VISHAY. 1n4148. 2024. Acesso em: 9 out.. 2025. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/81857/1n4148.pdf>.

WEIK, M. Communications standard dictionary. 1995. Acesso em: 9 set. 2025.

WIKIPEDIA. Clipping (signal processing). 2007. Acesso em: 23 out. 2025. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Clipping_\(signal_processing\)&action=history](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Clipping_(signal_processing)&action=history).

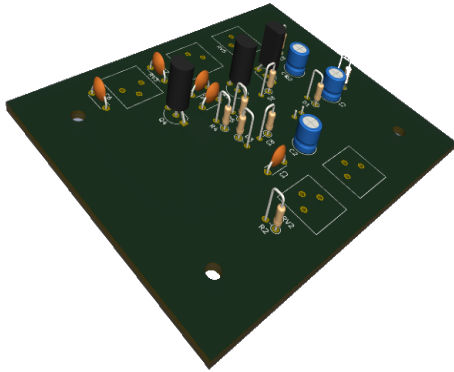
WIKIPEDIA. Rhythmicon. 2012. Acesso em: 8 set. 2025. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rhythmicon>.

WIKIPEDIA. Eurorack. 2021. Acesso em: 10 set. 2025. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Eurorack>.

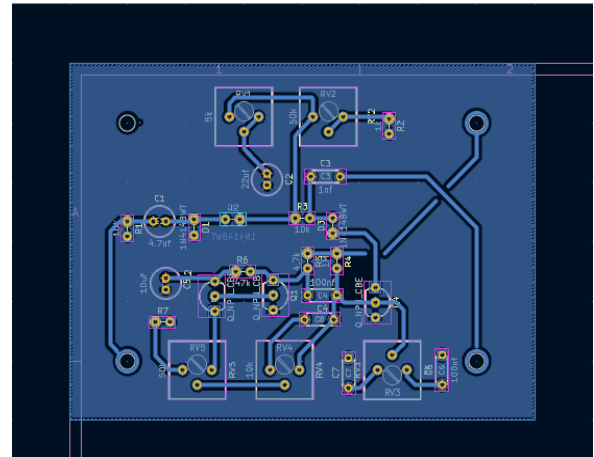
APÊNDICE A – IMAGENS DAS PLACAS DOS MÓDULOS NO PROGRAMA KICAD

Figura 35 – Projeto do módulo de ruído.

(a) Modelo 3D do módulo de ruído.



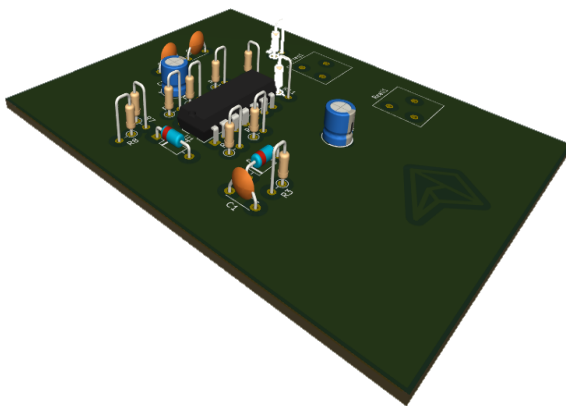
(b) *Layout* da placa do módulo de ruído.



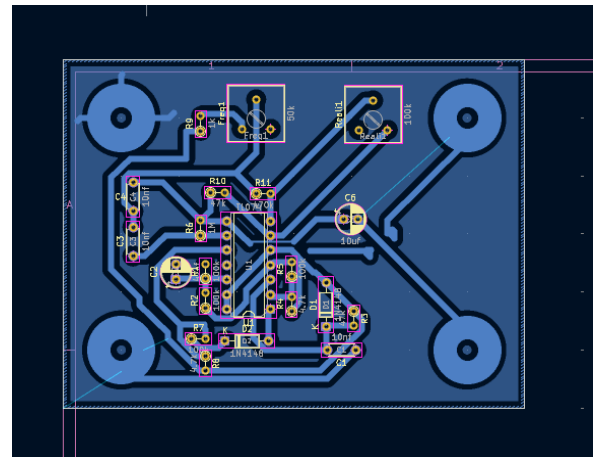
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 36 – Projeto do módulo de bumbo ou tom.

(a) Modelo 3D do módulo de bumbo ou tom.



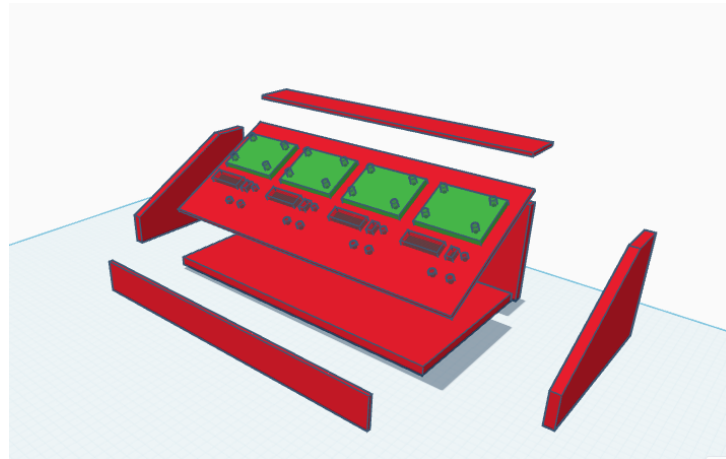
(b) *Layout* da placa do módulo de bumbo ou tom.



Fonte: elaborada pelo autor.

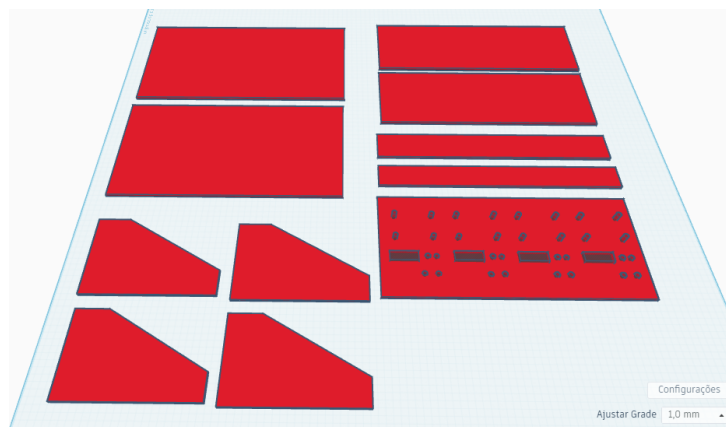
APÊNDICE B – IMAGENS DO GABINETE NO TINKERCAD

Figura 37 – Gabinete explodido.



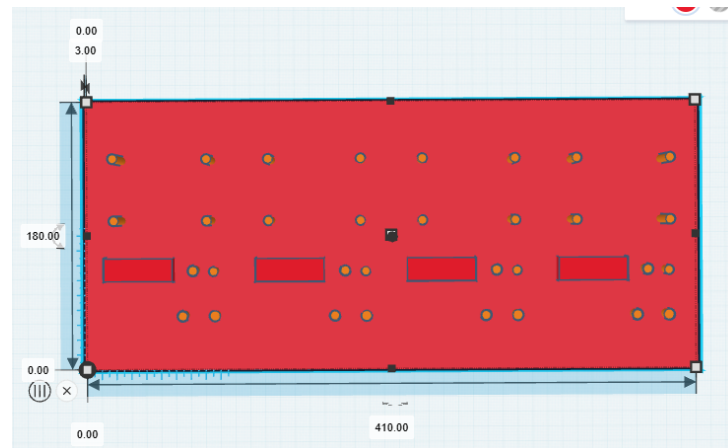
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 38 – Chapas utilizadas no gabinete.



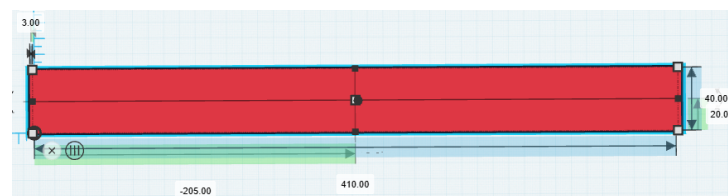
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 39 – Dimensões do painel principal.



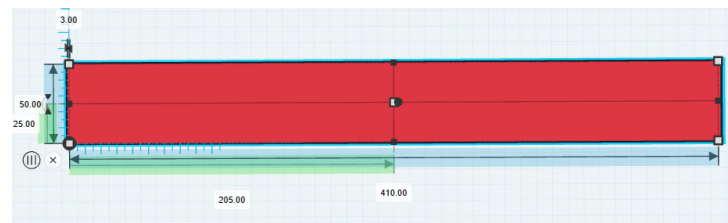
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 40 – Dimensões do painel frontal.



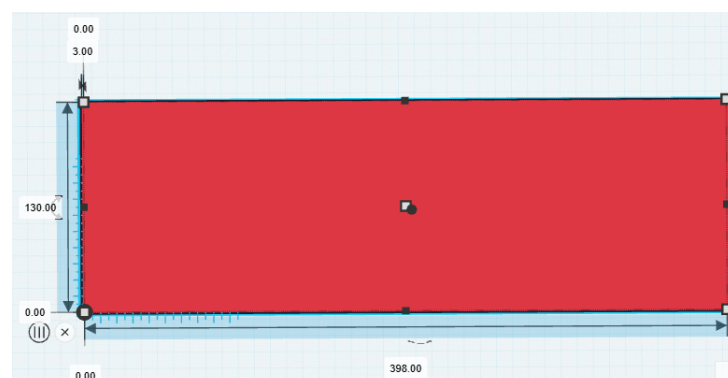
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 41 – Dimensões do painel superior.



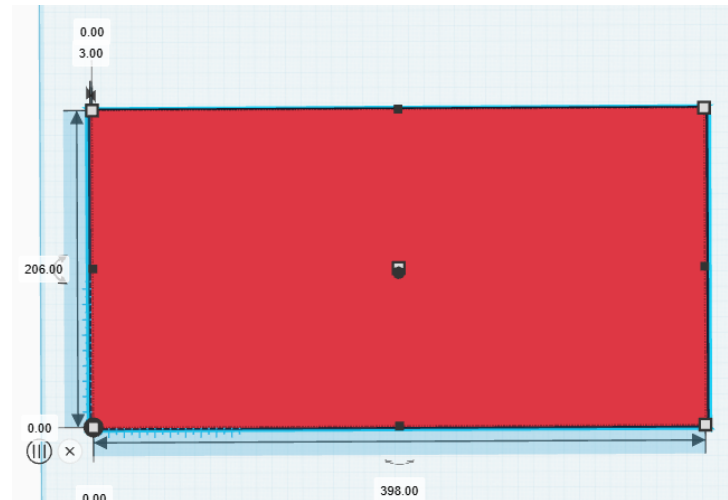
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 42 – Dimensões da chapa traseira.



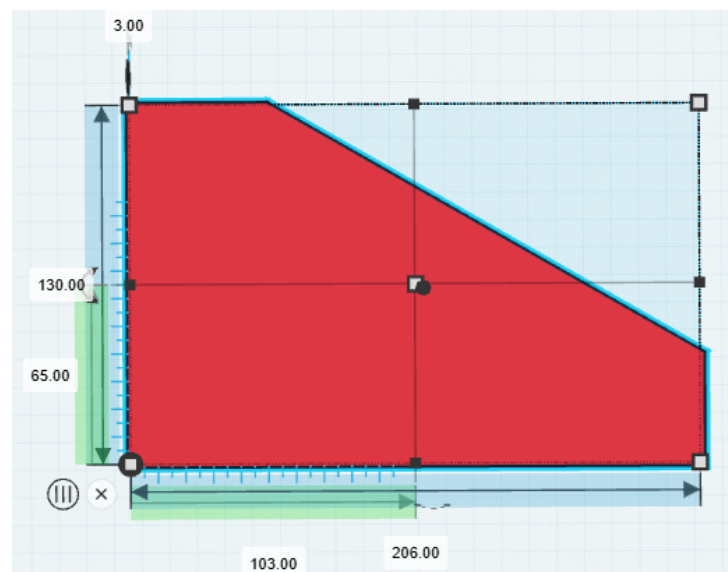
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 43 – Dimensões da chapa de baixo.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 44 – Dimensões da chapa lateral.



Fonte: elaborada pelo autor.