

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DAELN - DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

FELIPE HONJO IDE
HENRIQUE MIGUEL KAEHLER MARTINI

DESENVOLVIMENTO DE UM SINTETIZADOR DE ÁUDIO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2019

FELIPE HONJO IDE
HENRIQUE MIGUEL KAEHLER MARTINI

DESENVOLVIMENTO DE UM SINTETIZADOR DE ÁUDIO

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Miguel Antonio Sovierzoski
DAELT - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica -UTFPR

CURITIBA
2019

FELIPE HONJO IDE
HENRIQUE MIGUEL KAEHLER MARTINI

DESENVOLVIMENTO DE UM SINTETIZADOR DE ÁUDIO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico, do curso de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Os alunos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Curitiba, 10 de julho de 2019.

Prof. Dr. Robinson Vida Noronha
Coordenador de Curso
Engenharia Eletrônica

Prof^a. Dr^a. Carmen Caroline Raserá
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Eletrônica do DAELN

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Miguel Antonio Sovierzoski
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Dr. Antonio Carlos Pinho
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Bruno Sens Chang
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

HONJO IDE, Felipe; KAEHLER MARTINI, Henrique Miguel. Desenvolvimento de um sintetizador de áudio. 2019. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A música é uma atividade cultural que acompanha a humanidade desde os primórdios, sendo reproduzida por diversos princípios físicos, através de instrumentos de percussão, de corda e sopro. O avanço da eletrônica permitiu o desenvolvimento de sistemas sintetizadores de áudio, como o RCA Mark I na década de 1950 e o Moog Synthesizer na década de 1960. Os sintetizadores de áudio são circuitos eletrônicos que podem ser controlados para gerar diferentes formas de onda, realizar modulações em amplitude e variações em frequência. Com o tempo, estes equipamentos se tornaram populares como acompanhamento de outros instrumentos musicais e até mesmo para uso em composições completas de trilhas sonoras. Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica tem como objetivo desenvolver e produzir em placa de circuito impresso um sintetizador de áudio monofônico com especificações técnicas similares aos sintetizadores de mercado, contendo uma entrada MIDI para interface com dispositivos externos e módulos de processamento analógico de sinais, denominados *Voltage Controlled Oscillator (VCO)*, *Voltage Controlled Filter (VCF)*, *Low Frequency Oscillator (LFO)*, *Envelope Generator (EG)* e *Voltage Controlled Amplifier (VCA)*. O protótipo do produto desenvolvido foi amplamente testado e avaliado, e atendeu as especificações de projeto.

Palavras-chave: Sintetizador de Áudio. Oscilador. Processamento analógico de sinais.

ABSTRACT

HONJO IDE, Felipe; KAEHLER MARTINI, Henrique Miguel. Development of an audio synthesizer. 2019. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Music is a cultural activity that accompanies humanity since its beginnings, and is reproduced by various physical principles, such as percussion, strings and wind instruments. The advance of the electronics allowed the development of audio synthesizer systems, such as the RCA Mark I, in the 1950s, and the Moog Synthesizer, in the 1960s. Audio synthesizers are electronic circuits that can be controlled in order to generate various waveforms, perform amplitude modulations and frequency variations. With time, these instruments became popular accompaniment of other musical instruments and even as the only instrument for entire soundtrack compositions. This Electronic Engineering Undergraduate Thesis aims to develop and produce a printed circuit board of a monophonic audio synthesizer with technical specifications similar to other equipment in the market, containing a MIDI input to allow communication with other audio devices and analog signals processing modules, denominated Voltage Controlled Oscillator (VCO), Voltage Controlled Filter (VCF), Low Frequency Oscillator (LFO), Envelope Generator (EG) and Voltage Controlled Amplifier (VCA). The developed prototype was richly tested and evaluated and complied with all project specifications.

Keywords: Audio synthesizer. Oscillator. Analog signals processing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem do Music Synthesizer Mark I, da RCA Corporation.	10
Figura 2 – Imagem de Sr. Robert Arthur Moog (1934-2005), à esquerda, com seu sintetizador, Moog Synthesizer.	11
Figura 3 – Diagrama de blocos do sintetizador desenvolvido.	11
Figura 4 – Símbolo do amplificador de transcondutância, LM13700, da Texas Instruments.	15
Figura 5 – Circuito elétrico interno do amplificador de transcondutância da Texas Instruments, LM13700.	16
Figura 6 – Circuito equivalente do par de transistores do LM13700.	16
Figura 7 – Diagrama de blocos do VCO.	18
Figura 8 – Circuito de OTAs para a geração de ondas triangular e quadrada.	19
Figura 9 – Diagrama de blocos do LFO.	20
Figura 10 – Diagrama de blocos do VCF.	20
Figura 11 – Fluxograma de um <i>state variable filter</i>	21
Figura 12 – Circuito elétrico do <i>state variable filter</i>	21
Figura 13 – Diagrama de blocos do EG.	23
Figura 14 – Diagrama de funcionamento do <i>envelope generator</i> com os estágios de <i>Attack</i> , <i>Decay</i> , <i>Release</i> e <i>Sustain</i>	23
Figura 15 – Circuito equivalente do <i>envelope generator</i>	24
Figura 16 – Diagrama de blocos do VCA.	26
Figura 17 – Circuito equivalente do VCA.	27
Figura 18 – Circuito para interface MIDI.	30
Figura 19 – Representação protocolo de comunicação serial MIDI	30
Figura 20 – Circuito de proteção de entrada da fonte de alimentação.	32
Figura 21 – Circuito elétrico da fonte de +9V.	33
Figura 22 – Circuito elétrico da fonte de +5V.	33
Figura 23 – Circuito elétrico da fonte de -12V.	34
Figura 24 – Circuito elétrico da fonte de -9V.	34
Figura 25 – Diagrama de entradas e saídas do microcontrolador	35
Figura 26 – Kit de desenvolvimento MSP-EXP432P401R, da Texas Instruments	37
Figura 27 – Diagrama de funcionamento do <i>firmware</i>	39
Figura 28 – Circuito elétrico da primeira tentativa de implementação do VCO.	41
Figura 29 – Circuito elétrico do gerador de onda senoidal a partir de uma onda triangular.	42
Figura 30 – Regulagem da onda senoidal entre uma triangular e quadrada.	43
Figura 31 – Regulagem da simetria onda senoidal.	43

Figura 32 – Exemplo de onda senoidal corretamente ajustada.	43
Figura 33 – Circuito para conversão de um ganho linear para exponencial.	44
Figura 34 – Circuito elétrico de tratamento do sinal de <i>gate</i> usado na simulação.	45
Figura 35 – Simulação da resposta do EG ao sinal de <i>gate</i>	45
Figura 36 – Circuito elétrico do acionamento do estágio de <i>Attack</i> do EG.	46
Figura 37 – Simulação da saída do EG em resposta ao sinal de <i>gate</i>	47
Figura 38 – Circuito elétrico para adição do <i>offset</i> na saída do EG.	47
Figura 39 – Circuito elétrico do VCA.	48
Figura 40 – Fotos da PCI das fontes de alimentação fabricadas	49
Figura 41 – Fotos da primeira versão do sintetizador com alterações.	50
Figura 42 – Circuito elétrico do amplificador operacional no EG que causava inversão de fase.	51
Figura 43 – Fotos da segunda versão do sintetizador	52
Figura 44 – Relação entre tensão de entrada e frequência de oscilação do VCO para baixas frequências e altas frequências	52
Figura 45 – Onda triangular do LFO em seus valores mínimo e máximo de frequência de oscilação.	53
Figura 46 – Onda quadrada do LFO em seus valores mínimo e máximo de frequência de oscilação.	54
Figura 47 – Onda senoidal do LFO em seus valores mínimo e máximo de frequência de oscilação.	54
Figura 48 – Magnitude da resposta em frequência do VCF.	54
Figura 49 – Exemplos de formas de onda filtradas pelo VCF.	55
Figura 50 – Formas de onda do EG com sua componente de <i>Attack</i> ajustada em seu valor mínimo e máximo.	55
Figura 51 – Formas de onda do EG com sua componente de <i>Decay</i> ajustada em seu valor mínimo e máximo.	56
Figura 52 – Formas de onda do EG com sua componente de <i>Sustain</i> ajustada em seu valor mínimo e máximo.	56
Figura 53 – Formas de onda do EG com sua componente de <i>Release</i> ajustada em seu valor mínimo e máximo.	57
Figura 54 – Exemplo de uma configuração do ADSR.	57
Figura 55 – VCO modulado com um LFO senoidal através do VCA.	57
Figura 56 – VCO modulado com um EG através do VCA.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADSR	Anagrama de <i>Attack, Decay, Release</i> e <i>Sustain</i>
API	<i>Application Programming Interface</i> , Interface de Programação de Aplicação
ARM	<i>Acorn RISC Machine</i>
CMSIS	<i>Cortex Microcontroller Software Interface Standard</i> , padrão de interface de software de microcontrolador Cortex
EG	<i>Envelope Generator</i> , gerador de envelope
FPU	<i>Floating-point Unit</i> , unidade de ponto flutuante
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> , circuito inter-integrado
LED	<i>Light Emitting Diode</i> , diodo emissor de luz
LFO	<i>Low Frequency Oscillator</i> , oscilador de baixa frequência
MIDI	<i>Musical Instrument Digital Interface</i> , interface digital de instrumento musical
OTA	<i>Operational Transconductance Amplifier</i> , amplificador operacional de transcondutância
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , modulação por largura de pulso
RAM	<i>Random-Access Memory</i> , memória de acesso aleatório
RTOS	<i>Real-time Operating System</i> , sistema operacional de tempo real
SMD	<i>Surface Mounted Device</i> , dispositivo montado em superfície
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> , interface periférica serial
SVF	<i>State Variable Filter</i> , filtro de estado variável
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> , receptor/transmissor assíncrono universal
VCA	<i>Voltage Controlled Amplifier</i> , amplificador controlado por tensão
VCF	<i>Voltage Controlled Filter</i> , filtro controlado por tensão
VCO	<i>Voltage Controlled Oscillator</i> , oscilador controlado por tensão

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	10
1.1 Contexto	10
1.2 Visão geral do projeto	11
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo geral	12
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 Estrutura do trabalho	13
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Amplificador de transcondutância (OTA)	15
2.2 <i>Voltage Controlled Oscillator</i> (VCO)	17
2.2.1 Ondas triangular e quadrada	18
2.2.2 Onda senoidal	18
2.3 <i>Low Frequency Oscillator</i> (LFO)	19
2.4 <i>Voltage Controlled Filter</i> (VCF)	20
2.5 <i>Envelope Generator</i> (EG)	23
2.5.1 Sinal de <i>Gate</i>	24
2.5.2 Estágio <i>Attack</i> do <i>Envelope Generator</i>	24
2.5.3 Estágio <i>Decay</i> do <i>Envelope Generator</i>	25
2.5.4 Estágio <i>Sustain</i> do <i>Envelope Generator</i>	25
2.5.5 Estágio <i>Release</i> do <i>Envelope Generator</i>	25
2.5.6 Uso do ADSR	26
2.6 <i>Voltage Controlled Amplifier</i> (VCA)	26
2.7 Protocolo de mensagens MIDI	27
2.8 Comunicação serial	29
2.9 Comentários	30
3 – DESENVOLVIMENTO	32
3.1 Fontes de alimentação	32
3.1.1 Fontes de +9V e +5V	32
3.1.2 Fonte de -9V	33
3.2 Microcontrolador	35
3.2.1 Sinais de entrada	35
3.2.2 Sinais de saída	36
3.2.3 Tecnologias escolhidas	36
3.2.3.1 Kit de desenvolvimento	36

3.2.3.2	Linguagem de programação e bibliotecas	37
3.2.4	Sistema operacional	38
3.2.5	Funcionamento do <i>firmware</i>	38
3.3	<i>Voltage Controlled Oscillator</i> (VCO)	41
3.4	<i>Low Frequency Oscillator</i> (LFO)	44
3.5	<i>Voltage Controlled Filter</i> (VCF)	44
3.6	<i>Envelope Generator</i> (EG)	45
3.7	Voltage Controlled Amplifier (VCA)	47
3.8	Comentários	48
4	– RESULTADOS	49
4.1	Placa de fontes de alimentação	49
4.2	Primeiro protótipo do sintetizador	50
4.3	Segundo protótipo e versão final do sintetizador	51
4.3.1	<i>Voltage Controlled Oscillator</i> (VCO)	51
4.3.2	<i>Low Frequency Oscillator</i> (LFO)	53
4.3.3	<i>Voltage Controlled Filter</i> (VCF)	53
4.3.4	<i>Envelope Generator</i> (EG)	55
4.3.5	<i>Voltage Controlled Amplifier</i> (VCA)	55
4.4	Especificações do sintetizador de áudio projetado	56
4.5	Comentários	58
5	– CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	Referências	61
	Apêndices	63
	APÊNDICE A –Especificações do sintetizador de áudio	64
	APÊNDICE B –Circuito elétrico usado para a simulação do <i>Envelope Generator</i>	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A primeira forma de síntese eletrônica de tons musicais foi criada durante a década de 1960, por Herbert Belar e Harry Olson, na empresa RCA (OLSON; BELAR; TIMMENS, 1960). Esta máquina, denominada Music Synthesizer Mark I e ilustrada na figura 1, era capaz de reproduzir sons transcritos em papéis com a manipulação de diversos relés e motores elétricos.

Figura 1 – Imagem do Music Synthesizer Mark I, da RCA Corporation.



Fonte: (OLSON; BELAR; TIMMENS, 1960)

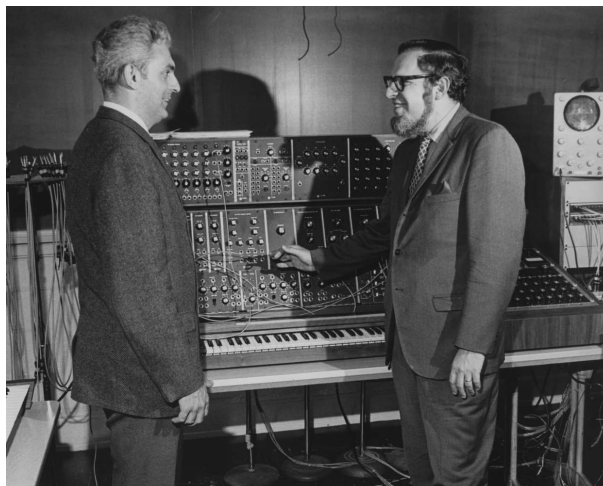
Alguns anos depois, em 1964, após a popularização dos transistores, Robert Moog desenvolveu o primeiro sintetizador modular, o Moog Synthesizer, ilustrado na figura 2 (MOOG, 1965). Este produto se popularizou em grupos musicais, incentivando a indústria eletrônica a iniciar um constante desenvolvimento e melhoria de sintetizadores, difundindo-os como legítimos instrumentos musicais, como usados atualmente.

A popularização dos sintetizadores na indústria musical despertou o interesse do público em produção de música eletrônica e, portanto, na aquisição destes instrumentos musicais.

Porém, como estes equipamentos apresentam grande complexidade devido ao elevado número de componentes internos, eles acabam se tornando inacessíveis para músicos amadores.

Este elevado preço de compra é ainda mais acentuado em países onde não existem empresas que desenvolvem ou revendem estes instrumentos, como o Brasil. Aqueles interessados em adquirir um sintetizador são obrigados a pagar taxas adicionais de impostos de importação e custos de transporte, tornando este *hobby* em uma atividade proibitivamente cara.

Figura 2 – Imagem de Sr. Robert Arthur Moog (1934-2005), à esquerda, com seu sintetizador, Moog Synthesizer.



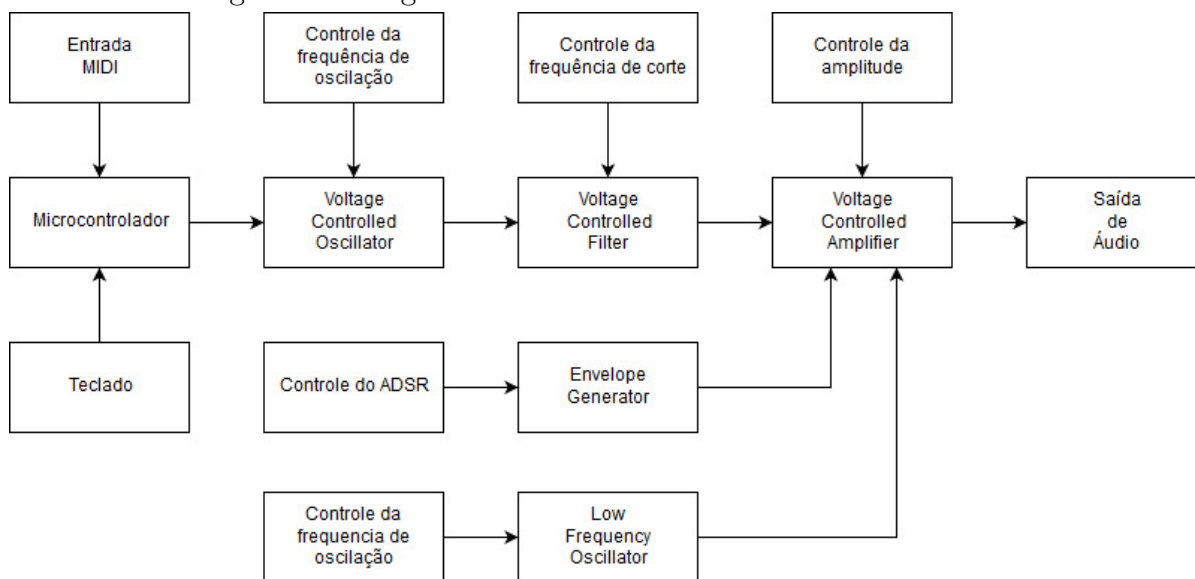
Fonte: (MOOG MUSIC, 2014)

1.2 Visão geral do projeto

Este projeto tem como objetivo desenvolver um sintetizador de áudio acessível à músicos amadores e com características similares aos sintetizadores presentes no mercado.

Para isto, o equipamento desenvolvido contém diversos módulos, comumente presentes em outros sintetizadores, conforme apresentado na figura 3.

Figura 3 – Diagrama de blocos do sintetizador desenvolvido.



Fonte: Autoria própria.

Entrada MIDI: Interface e condicionamento do sinal de entrada através do protocolo MIDI.

Microcontrolador: Microcontrolador que realiza a tradução do sinal MIDI em um sinal em PWM, usado para definição da frequência de oscilação do VCO.

Teclado: 13 botões, equivalentes à uma oitava e uma tecla, para a reprodução de sons, como alternativa para a interface MIDI.

Voltage Controlled Oscillator (VCO): Oscilador principal, que recebe o nível de tensão do microcontrolador e gera ondas na frequência selecionada pela interface MIDI ou um dos botões do teclado. Um potenciômetro permite que o usuário adicione um *offset* à frequência da onda gerada. Uma chave permite a seleção entre uma onda senoidal, triangular ou quadrada.

Voltage Controlled Filter (VCF): Arranjo de filtros passa-altas, passa-faixa e passa-baixas para tratamento do sinal produzido pelo VCO. A frequência de corte é controlada por um potenciômetro, e o tipo de filtro por uma chave seletora.

Envelope Generator (EG): Circuito responsável por gerar uma forma de onda proporcional ao envoltório de amplitude do sinal desejado. Permite o controle das características de *Attack*, *Decay*, *Sustain* e *Release* do sinal.

Low Frequency Oscillator (LFO): Oscilador similar ao VCO, mas operando em baixa frequência para modular a amplitude do sinal de saída do VCO. O controle da frequência de oscilação é realizado por um potenciômetro, e uma chave seletora permite o uso de uma onda senoidal, triangular, quadrada ou remove o LFO do circuito.

Voltage Controlled Amplifier (VCA): Circuito que faz a combinação dos sinais de saída do VCO com o EG e LFO, e permite o controle da amplitude de tensão do sinal de saída do sintetizador.

Saída de áudio: Conector de saída de áudio.

Devido à natureza do trabalho, todos os nomes dos módulos funcionais do sintetizador foram representados na língua inglesa, para não confundir o leitor com conhecimento prévio destes termos, e manter a terminologia técnica usada na indústria musical.

No capítulo 2, Fundamentação teórica, são apresentados os detalhes de cada módulo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um sintetizador de áudio que contenha os módulos comumente encontrados em equipamentos no mercado: VCO, LFO, VCF, EG e VCA.

Para atingir estes objetivos preservando a melhor qualidade de áudio possível, os módulos serão construídos com eletrônica analógica e um microcontrolador será usado para fazer a conversão do protocolo MIDI.

1.3.2 Objetivos específicos

O sintetizador deve conter uma interface MIDI, possibilitando a interface com dispositivos externos, como teclados e computadores.

O VCO e LFO devem gerar ondas triangular, quadrada e senoidal, com frequências entre 20 e 20kHz, e 1 a 20Hz, respectivamente.

O VCF deve conter os filtros do tipo passa-baixas, passa-faixa e passa-altas, com frequência de corte que percorra toda a faixa de frequência do VCO.

O EG deve conter os estágios de *Attack*, *Decay*, *Release* e *Sustain*, todos configuráveis de forma independente pelo usuário.

O VCA deve realizar a integração dos módulos descritos e oferecer ao usuário o controle de amplitude de tensão da forma de onda final do sintetizador. Este sinal de saída deve ser fornecido por um conector de áudio de 6,35mm ou 3,5mm e com amplitude de 4dBu, equivalente ao nível de sinal para equipamentos de áudio profissional.

O tratamento de sinais em todos os módulos citados deve ser realizado com eletrônica analógica, sem o uso do microprocessador.

1.4 Estrutura do trabalho

Na primeira fase deste projeto, foi realizada uma pesquisa de mercado a fim de encontrar sintetizadores mais simples, analisando os módulos presentes nestes equipamentos e seus preços. Com isto, foi possível levantar as especificações técnicas do sintetizador a ser desenvolvido.

Durante esta pesquisa inicial, foi possível obter alguns manuais técnicos dos equipamentos profissionais, que ajudaram a entender como cada módulo dos sintetizadores eram construídos, assim como identificar similaridades entre produtos, como componentes ou circuitos elétricos comumente usados.

Com base no conhecimento obtido, foi iniciada a etapa de pesquisa e desenvolvimento teórico, detalhado no capítulo 2 deste documento.

Após esta pesquisa técnica, a primeira versão do projeto foi montada no software de simulação de circuitos elétricos, PsPice, a fim de simular cada módulo projetado. Como algumas partes deste circuito apresentavam maior complexidade, foi decidido montá-los em *protoboard* para comprovar seu funcionamento em prática. A fim de testar estes circuitos com maior praticidade, foi fabricada uma placa de fontes de alimentação que recebia uma entrada de +12VDC e fornecia tensões de +9V, -9V, 5V e 3,3V. Para montar esta fonte e os circuitos em *protoboard*, foi realizada uma compra de componentes eletrônicos na Digikey.

Com todos os módulos simulados e parcialmente testados em *protoboard*, uma primeira versão da placa de circuito impresso do sintetizador foi desenhada através do software OrCad e fabricada. Com esta placa de circuito impresso, foi possível testar todos

os módulos projetados, identificando alterações e melhorias que deveriam ser realizadas nos circuitos elétricos e na construção mecânica da placa.

Assim, uma segunda versão da placa foi projetada, corrigindo os problemas encontrados no primeiro protótipo. Com esta placa foi possível revalidar todos os circuitos e desenvolver o *firmware* de interface MIDI e controle da frequência do VCO.

Todo o desenvolvimento e testes realizados em *protoboard* e nas duas versões de placas produzidas estão apresentadas com mais detalhes no capítulo 3. Os resultados obtidos durante as simulações e testes são expostas nos resultados do projeto.

A partir do desenho da placa, foi possível exportar um arquivo formato .dxf, que contém as posições e contornos das chaves seletoras e potenciômetros de interface com o usuário para a confecção do invólucro mecânico, painel e etiqueta de identificação de cada botão.

Finalmente, as melhorias técnicas foram listadas no capítulo 5, descrevendo alterações para uma possível revisão do equipamento, e até mesmo a possibilidade de criar um novo produto com maior complexidade técnica.

Consta ainda, a lista de abreviaturas e siglas usadas neste trabalho, e o apêndice A apresenta as especificações técnicas do sintetizador desenvolvido.

O apêndice B apresenta o esquema elétrico do EG, como acompanhamento de sua explicação no tópico 3.6, a fim de facilitar o entendimento deste módulo.

Este documento segue a formatação fornecida pela comissão de TCC, recebida em junho de 2019.

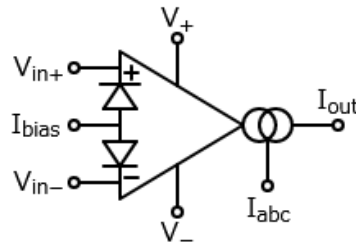
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta elementos para a compreensão do funcionamento de todos os módulos do sintetizador, e alguns cálculos para o projeto dos circuitos elétricos analógicos.

2.1 Amplificador de transcondutância (OTA)

Para facilitar o entendimento dos módulos do sintetizador, é necessário entender o funcionamento de um dos principais componentes deste equipamento, o amplificador operacional de transcondutância (OTA), LM13700, ilustrado na figura 4 (TEXAS INSTRUMENTS, 2015a).

Figura 4 – Símbolo do amplificador de transcondutância, LM13700, da Texas Instruments.



Fonte: Datasheet do LM13700 (TEXAS INSTRUMENTS, 2015a).

O amplificador operacional de transcondutância é capaz de transformar um sinal de tensão diferencial entre os pinos V_{in+} e V_{in-} em um sinal de corrente com ganho proporcional ao valor de corrente aplicado ao pino I_{ABC} .

Esta operação é realizada através de um par diferencial de transistores, representados como Q4 e Q5 no diagrama funcional do LM13700, ilustrado na figura 5.

Para entender o funcionamento básico do amplificador de transcondutância, este circuito pode ser simplificado como apresentado na figura 6:

A corrente de emissor de cada transistor é dada por:

$$I_{e4} = \frac{I_s}{\alpha} e^{\left(\frac{V_{in+} - V_e}{V_T}\right)} \quad (1)$$

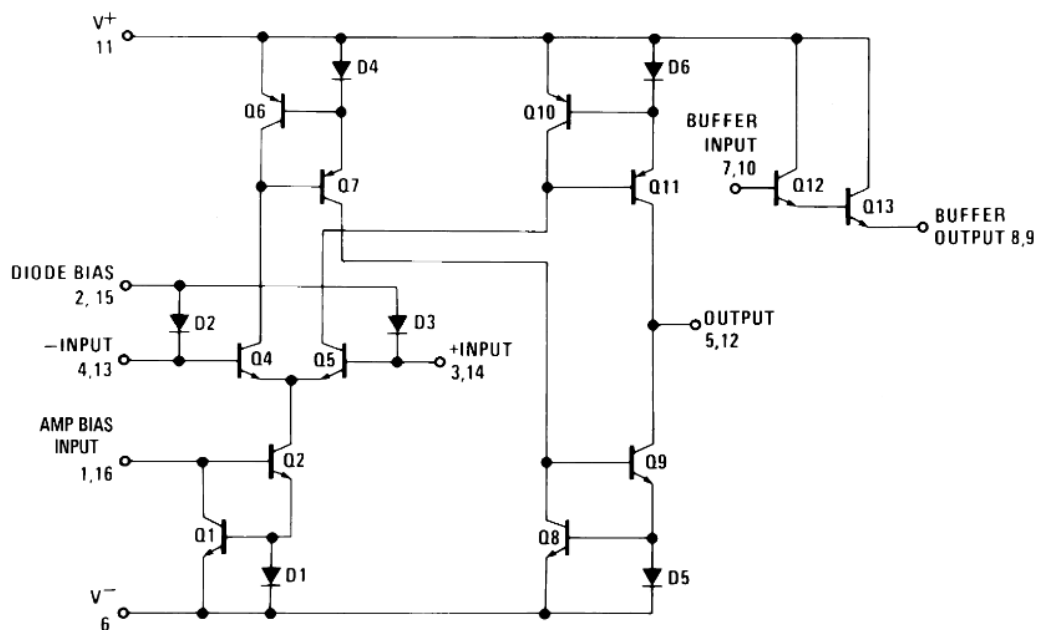
e

$$I_{e5} = \frac{I_s}{\alpha} e^{\left(\frac{V_{in-} - V_e}{V_T}\right)} \quad (2)$$

A razão entre estas duas correntes pode ser representada como:

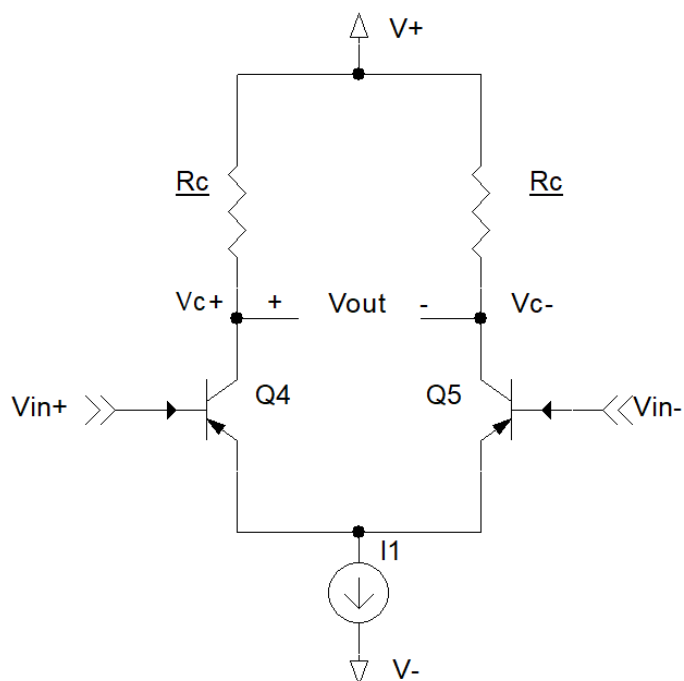
$$\frac{I_{e4}}{I_{e5}} = e^{\left(\frac{V_{in+} - V_{in-}}{V_T}\right)} \quad (3)$$

Figura 5 – Circuito elétrico interno do amplificador de transcondutância da Texas Instruments, LM13700.



Fonte: Datasheet do LM13700 (TEXAS INSTRUMENTS, 2015a).

Figura 6 – Circuito equivalente do par de transistores do LM13700.



Fonte: Autoria própria.

Ou seja,

$$I_{e4} = I_{e5} e^{\left(\frac{V_{in+} - V_e}{V_T}\right)} \quad (4)$$

Adicionando I_{e_5} nos dois lados da equação:

$$I_{e_4} + I_{e_5} = I_{e_5} e^{\left(\frac{V_{in_+} - V_e}{V_T}\right)} + I_{e_5} \quad (5)$$

Podemos agrupar I_{e_5} do lado direito:

$$I_{e_4} + I_{e_5} = I_{e_5} \left(e^{\left(\frac{V_{in_+} - V_e}{V_T}\right)} + 1 \right) \quad (6)$$

Dividindo os dois lados por I_{e_5} :

$$\frac{I_{e_4} + I_{e_5}}{I_{e_5}} = e^{\left(\frac{V_{in_+} - V_e}{V_T}\right)} + 1 \quad (7)$$

E, finalmente, invertendo a equação:

$$\frac{I_{e_5}}{I_{e_4} + I_{e_5}} = \frac{1}{e^{\left(\frac{V_{in_+} - V_e}{V_T}\right)} + 1} \quad (8)$$

Como $I_{e_4} + I_{e_5} = I_{ABC}$,

$$\frac{I_{e_5}}{I_{ABC}} = \frac{1}{e^{\left(\frac{V_{in_+} - V_e}{V_T}\right)} + 1} \quad (9)$$

Obtemos a equação de I_{e_4} e I_{e_5} em função de I_{e_5} e a tensão diferencial de entrada, $V_+ - V_e$.

$$I_{e_5} = \frac{I_{ABC}}{e^{\left(\frac{V_{in_+} - V_e}{V_T}\right)} + 1} \quad (10)$$

A diferença entre I_{e_4} e I_{e_5} é, então, dada por:

$$I_{e_4} - I_{e_5} = I_{ABC} \tanh\left(\frac{V_{in_+} - V_{in_-}}{2V_T}\right) \quad (11)$$

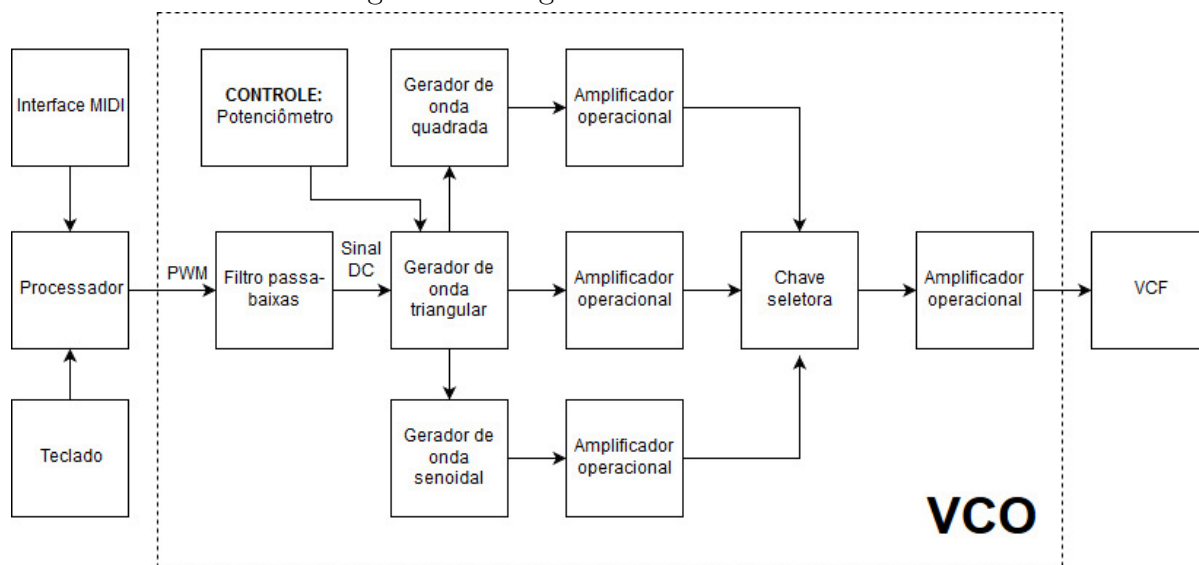
Assim, é possível perceber que a corrente de saída do par diferencial de transistores é proporcional à sua tensão de entrada (PATIL, 2010). Ademais, este circuito apresenta um comportamento tangencial hiperbólico, que será útil para a geração dos sinais senoidais dos circuitos osciladores do sintetizador (KAEWPOONSUK et al., 2006).

2.2 Voltage Controlled Oscillator (VCO)

O VCO é o primeiro estágio do sintetizador, responsável pela geração das formas de onda a partir de um comando da interface MIDI ou de uma das teclas do equipamento, como mostrado no diagrama da figura 7.

A nota enviada pelo teclado via MIDI ou por uma das teclas do sintetizador é recebida pelo microprocessador, que gera um sinal PWM com *duty cycle* proporcional à frequência da nota a ser tocada. Este sinal PWM é, então, inserido em um filtro passa baixa, transformando esta forma de onda em um nível DC.

Figura 7 – Diagrama de blocos do VCO.



Fonte: Autoria própria.

Este nível DC é usado em um arranjo de dois amplificadores operacionais operando como integrador e comparador, que geram ondas triangular e quadrada, respectivamente, como ilustrado na figura 8.

2.2.1 Ondas triangular e quadrada

Na figura 8, a partir de um estado inicial no qual a saída do segundo OTA, U8B, está em um nível alto em relação à referência do circuito, a diferença de tensão positiva entre os pinos “+” e “-” do primeiro OTA, U8A, resultará em uma corrente em sua saída que carregará o capacitor, C4, gerando uma rampa ascendente de tensão, que é repetida sobre o resistor R13.

Como U8B é um comparador, assim que o valor de tensão sobre R13 e, portanto, sobre o pino “-”, atingir o nível do pino “+”, sua saída passará para um valor negativo. Com isto, a saída de U8A é desligada, descarregando o capacitor C4, resultando em uma rampa descendente de tensão, até atingir 0V, que repetirá o ciclo de carga e descarga do circuito.

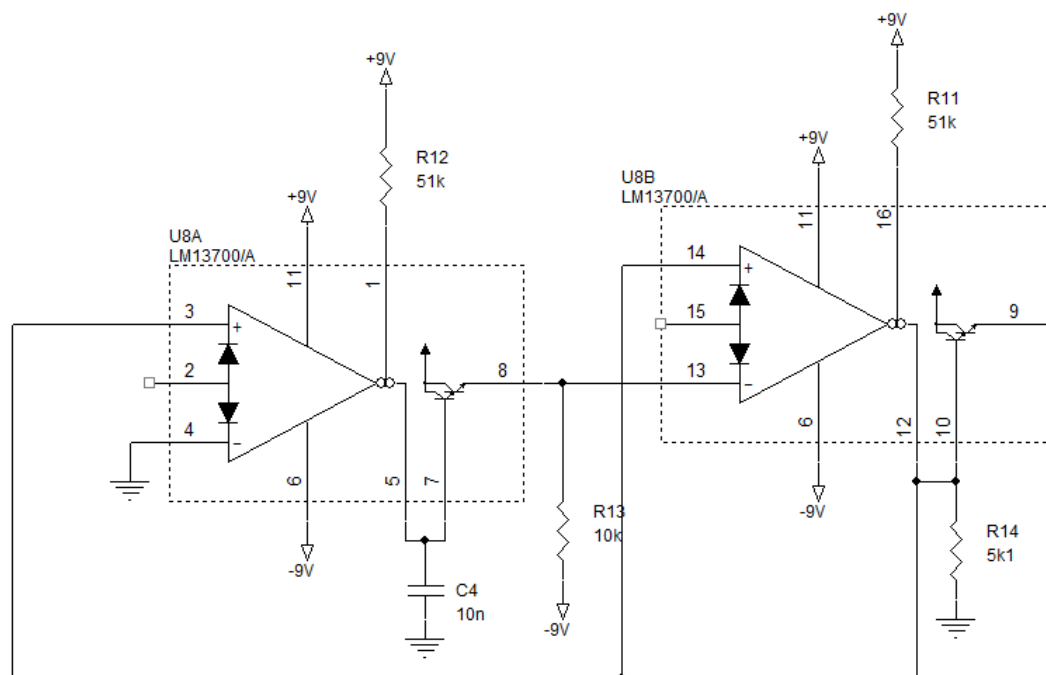
Assim, é possível extrair uma onda triangular, equivalente à carga e descarga do capacitor C4; e uma onda quadrada, a partir da troca de nível da saída do componente U8B (TEXAS INSTRUMENTS, 2002b).

A taxa de carga e descarga do capacitor é dada através do ganho de U1A, que é definida pela corrente I_{ABC} .

2.2.2 Onda senoidal

A onda triangular é, então, inserida em um OTA para a geração da onda senoidal.

Figura 8 – Circuito de OTAs para a geração de ondas triangular e quadrada.



Fonte: Autoria própria.

Esta senóide é obtida fazendo uso do comportamento hiperbólico tangencial do amplificador de transcondutância, apresentado na equação 11.

Os primeiros elementos da série de Taylor da função seno e da função tangente hiperbólica, são apresentados pelas equações 12 e 13:

$$\sin(x) \approx x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} \quad (12)$$

$$\tanh(x) \approx x - \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{5} \quad (13)$$

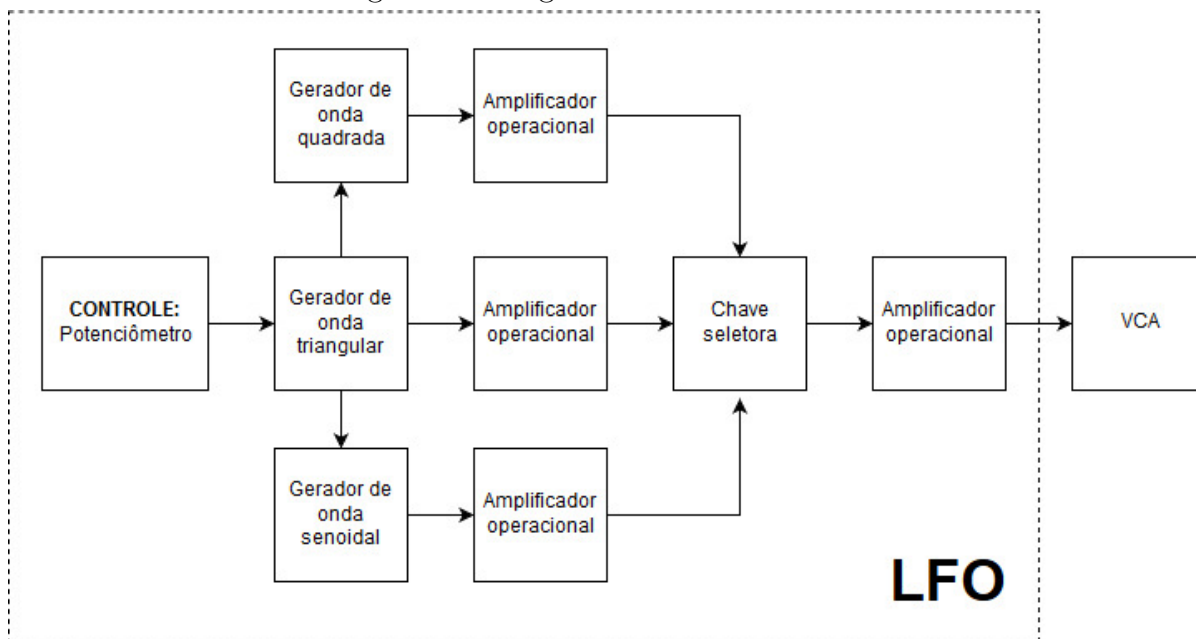
Conclui-se que, limitando a amplitude da onda triangular, é possível obter uma forma de onda praticamente senoidal. Esta limitação é feita adicionando um divisor resistivo na entrada do OTA (ANALOG DEVICES, 2019).

2.3 Low Frequency Oscillator (LFO)

O LFO apresenta os mesmos circuitos do VCO para a geração de ondas triangular, quadrada e senoidal, mas com valores de componentes alterados para gerar sinais abaixo da frequência audível ao ser humano, como ilustrado no diagrama da figura 9.

Este oscilador é usado para modular a amplitude das ondas geradas pelo VCO a fim de criar efeitos sonoros como o tremolo (PEARSALL, 2019).

Figura 9 – Diagrama de blocos do LFO.



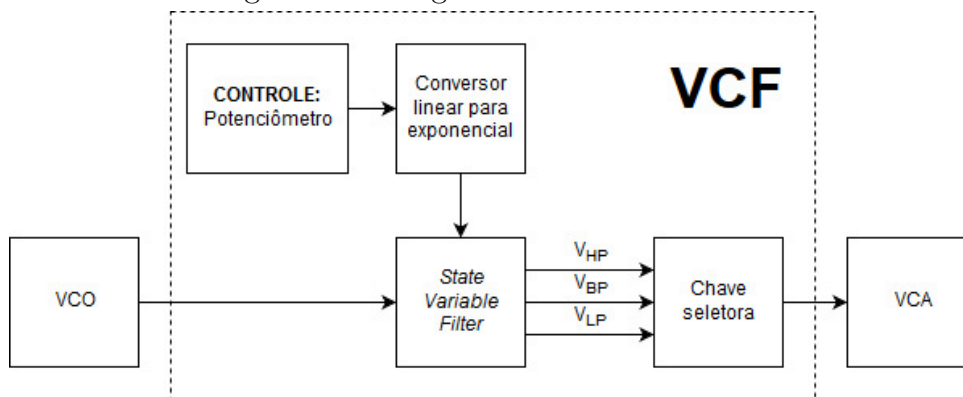
Fonte: Autoria própria.

Como este módulo não é comandado pela interface MIDI, o controle de frequência é feito somente através de um potenciômetro, que limita a corrente fornecida no pino I_{ABC} do amplificador de transcondutância da figura 8 a fim de regular a frequência das ondas geradas.

2.4 Voltage Controlled Filter (VCF)

O VCF recebe a forma de onda gerada pelo VCO e aplica um filtro passa-baixas, passa-altas ou passa-faixa com uma frequência de corte selecionada pelo usuário, como ilustrado no diagrama da figura 10.

Figura 10 – Diagrama de blocos do VCF.



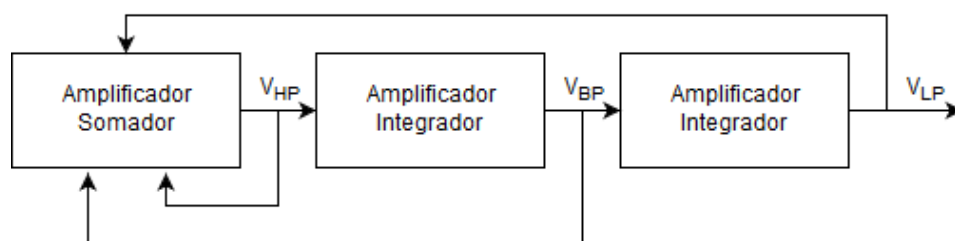
Fonte: Autoria própria.

A implementação do VCF é feita através de um *state variable filter* (SVF), um filtro ativo de segunda ordem capaz de gerar os três tipos de filtros simultaneamente e, portanto, reduzindo a quantidade de componentes eletrônicos necessários.

Ademais, este tipo de filtro permite o ajuste de seus três parâmetros, ganho, frequência de corte, e fator de qualidade, de forma independente entre eles. Assim, para o seu uso no sintetizador, seu ganho e fator de qualidade são mantidos constantes, enquanto a frequência de corte dos três filtros é controlada por um único potenciômetro.

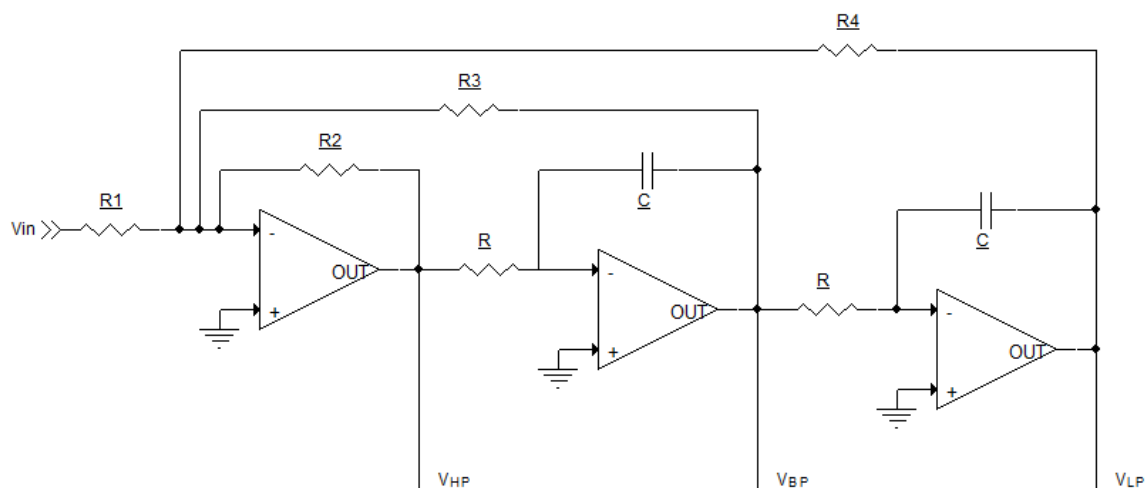
O SVF é constituído por dois amplificadores operacionais integradores ligados em cascata e um somador, que combina a saída dos dois primeiros circuitos, como mostrado no diagrama da figura 11 (ZUMBAHLEN, 2012).

Figura 11 – Fluxograma de um *state variable filter*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Circuito elétrico do *state variable filter*.



Fonte: Autoria própria.

Um amplificador operacional integrador apresenta a seguinte resposta:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{2\pi f_c RC} \tag{14}$$

Assim, a saída dos filtros passa-faixa, V_{BP} , e passa-baixas, V_{LP} , podem ser dados por:

$$\frac{V_{BP}}{V_{HP}} = \frac{1}{2\pi f_c RC} \quad (15)$$

e

$$\frac{V_{LP}}{V_{BP}} = \frac{1}{2\pi f_c RC} \quad (16)$$

Assim, V_{LP} , pode ser dado por:

$$\frac{V_{LP}}{V_{HP}} = \frac{1}{2\pi f_c RC} \frac{1}{2\pi f_c RC} = \frac{1}{(2\pi f_c RC)^2} \quad (17)$$

Como a corrente de entrada de um amplificador operacional é zero,

$$i_+ = i_- = 0 \quad (18)$$

Calculando a corrente de entrada do amplificador operacional somador:

$$\frac{V_{IN} - (V_-)}{R1} + \frac{V_{HP} - (V_-)}{R2} + \frac{V_{BP} - (V_-)}{R3} + \frac{V_{LP} - (V_-)}{R4} = 0 \quad (19)$$

Considerando $R1=R2=R3=R4$ a fim de facilitar os cálculos e o projeto do VCF,

$$\frac{V_{IN} - (V_-)}{R1} + \frac{V_{HP} - (V_-)}{R1} + \frac{V_{BP} - (V_-)}{R1} + \frac{V_{LP} - (V_-)}{R1} = 0$$

$$V_{IN}R1 - V_-R1 + V_{HP}R1 - V_-R1 + V_{BP}R1 - V_-R1 + V_{LP}R1 - V_-R1 = 0$$

$$V_{IN}R1 + V_{HP}R1 + V_{BP}R1 + V_{LP}R1 - 4V_-R1 = 0$$

Substituindo V_{HP} e V_{BP} por V_{LP} a partir das equações 17 e 16, e, como $V_- = V_+ = 0$,

$$V_{IN}R1 + V_{LP}(2\pi f_c RC)^2 R1 + V_{LP}(2\pi f_c RC)R1 + V_{LP}R1 = 0$$

$$V_{IN}R1 + V_{LP}[(2\pi f_c RC)^2 R + (2\pi f_c RC)R + R] = 0$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{IN}} = -\frac{1}{R + R(2\pi f_c RC) + R(2\pi f_c RC)^2} \quad (20)$$

É possível perceber que a equação 20 é uma função de transferência de segunda ordem, que define o comportamento do filtro (ELECTRONICS TUTORIALS, 2018).

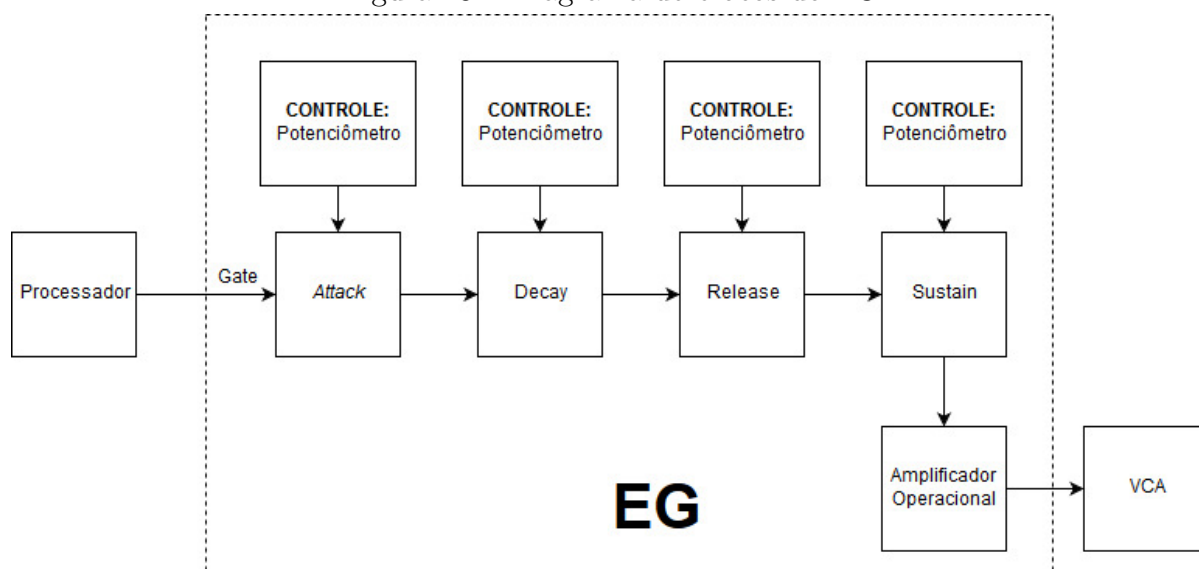
A frequência de corte é, então, dada por:

$$f_c = -\frac{1}{2\pi RC} \quad (21)$$

2.5 Envelope Generator (EG)

O *Envelope Generator* é o módulo do sintetizador que dá forma ao som gerado pelo VCO. Com ele, é possível transformar simples formas de onda em sons característicos de específicos instrumentos musicais, como ilustrado no diagrama da figura 13.

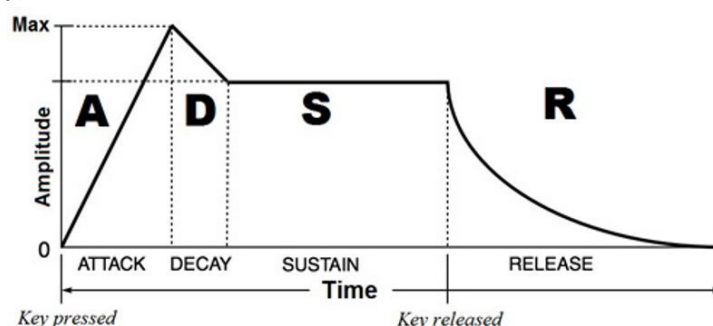
Figura 13 – Diagrama de blocos do EG.



Fonte: Autoria própria.

Este módulo é constituído comumente por quatro estágios: *Attack*, *Decay*, *Release* e *Sustain*. As iniciais de cada estágio forma o anagrama ADSR. A progressão deste módulo em função do tempo é apresentada na figura 14 (VAIL, 2014):

Figura 14 – Diagrama de funcionamento do *envelope generator* com os estágio de *Attack*, *Decay*, *Release* e *Sustain*.

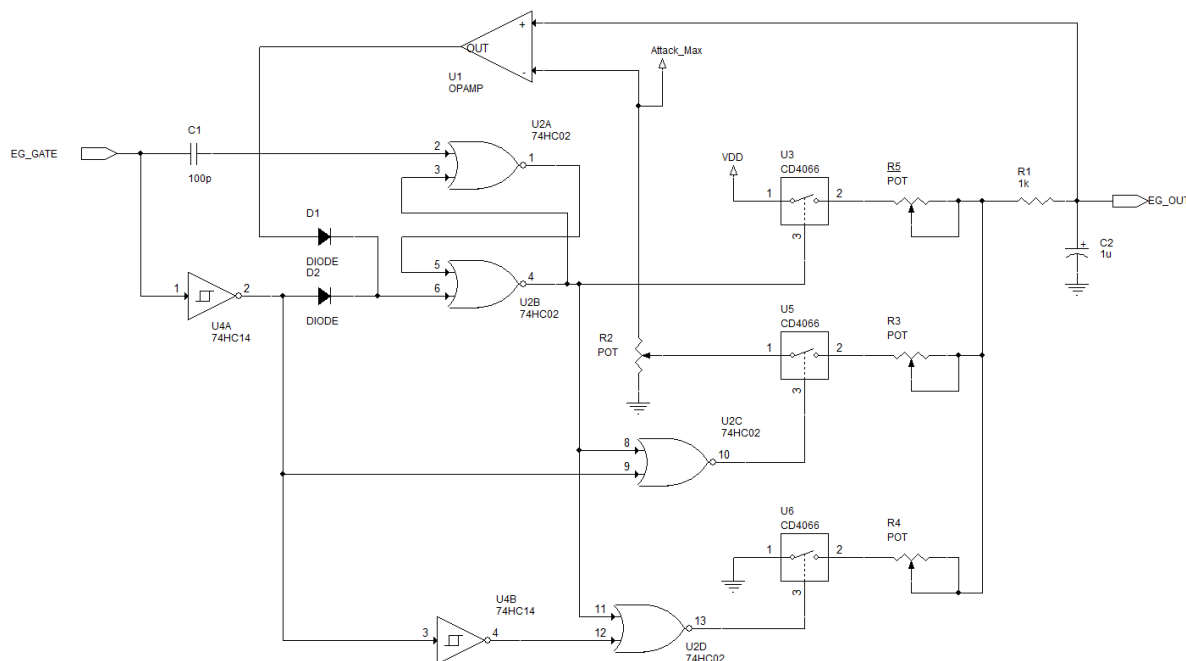


Fonte: <http://www.a-mc.biz>

Como pode ser observado na figura 14, as rampas de subida e descida de amplitude podem ser implementadas com a carga e descarga de um capacitor. Já a troca de estágios podem ser realizadas por portas lógicas.

Assim, o EG do sintetizador foi implementado com o circuito equivalente apresentado na figura 15.

Figura 15 – Circuito equivalente do *envelope generator*.



Fonte: Autoria própria.

2.5.1 Sinal de *Gate*

Além do comando enviado ao VCO para a geração da onda na frequência desejada, ao pressionar uma tecla, o microprocessador envia, também, um comando denominado “*gate*” ao EG, que inicia o procedimento do ADSR com o estado de *Attack*.

Caso a tecla seja solta durante os estágios de *Attack* ou *Decay*, o ADSR é interrompido, dando início ao *Release*.

Teclas pressionadas repetidamente durante o ADSR fazem com que o mesmo seja reiniciado a partir do seu primeiro estágio, *Attack*.

2.5.2 Estágio *Attack* do *Envelope Generator*

Ao pressionar uma tecla, o estágio *Attack* é iniciado. Durante este período, a amplitude do sinal de saída do EG é incrementada a uma taxa definida pelo usuário até atingir sua amplitude máxima.

No circuito implementado na figura 15, o comando de Gate é transformado em um único pulso através do capacitor C1. Este pulso é recebido no arranjo de portas NOR U2A e U2B, configuradas como *Flip-Flop* tipo JK, que aciona sua saída.

Esta saída, então, aciona a chave U3, que permite o fluxo de corrente de VDD ao capacitor C2. Esta corrente é limitada pelo potenciômetro R5, no qual o usuário faz o controle do tempo de carga de C2.

Este capacitor é carregado até atingir o valor de tensão “Attack_Max”, que define a amplitude máxima do EG.

2.5.3 Estágio *Decay* do *Envelope Generator*

Durante o estágio *Decay*, o EG reduz a amplitude do sinal à uma taxa definida pelo usuário, até atingir o seu valor de *Sustain*.

Quando o valor “EG_OUT” alcança o valor “Attack_Max”, a saída do amplificador operacional comparador U1, da figura 15, é alterada para seu valor positivo, enviando um sinal de *reset* ao *Flip-Flop*.

Como a tecla ainda está pressionada, EG_GATE está em “1”, e a porta inversora U4A altera este valor para “0”. Portanto, ao receber o valor “0” do *Flip-Flop*, a porta NOR U2C altera sua saída para “1”, acionando a chave U5.

Com isto, a tensão de saída do EG decai em razão do valor do potenciômetro R3.

2.5.4 Estágio *Sustain* do *Envelope Generator*

Logo após o estágio de *Decay*, é iniciado o estágio de *Sustain*, que define o nível de tensão do sinal enquanto a tecla é mantida pressionada.

Este nível é controlado pelo potenciômetro R2, da figura 15, que opera como um divisor resistivo entre a tensão máxima, Attack_Max, e a referência do circuito.

Portanto, é possível anular o estágio de *Decay* mantendo o *Sustain* em seu valor máximo. Da forma análoga, ao configurar o valor de *Sustain* em 0, é possível fazer que o pressionamento da tecla gere apenas pequenos pulsos, independente da duração do sinal de *Gate*.

2.5.5 Estágio *Release* do *Envelope Generator*

Ao soltar a tecla, o estágio final, *Release*, é iniciado, que reduz a tensão de saída do EG à uma taxa definida pelo usuário até zerar a amplitude da nota reproduzida.

Quando o Gate é alterado para “0”, o par de inversores U4A e U4B, da figura 15, insere um nível “0” em uma das entradas da porta NOR U2D.

Como o *Flip-Flop* está em estado de *reset*, definido anteriormente no estado de *Decay*, U2D, que está com suas duas entradas em “0”, aciona a chave U6.

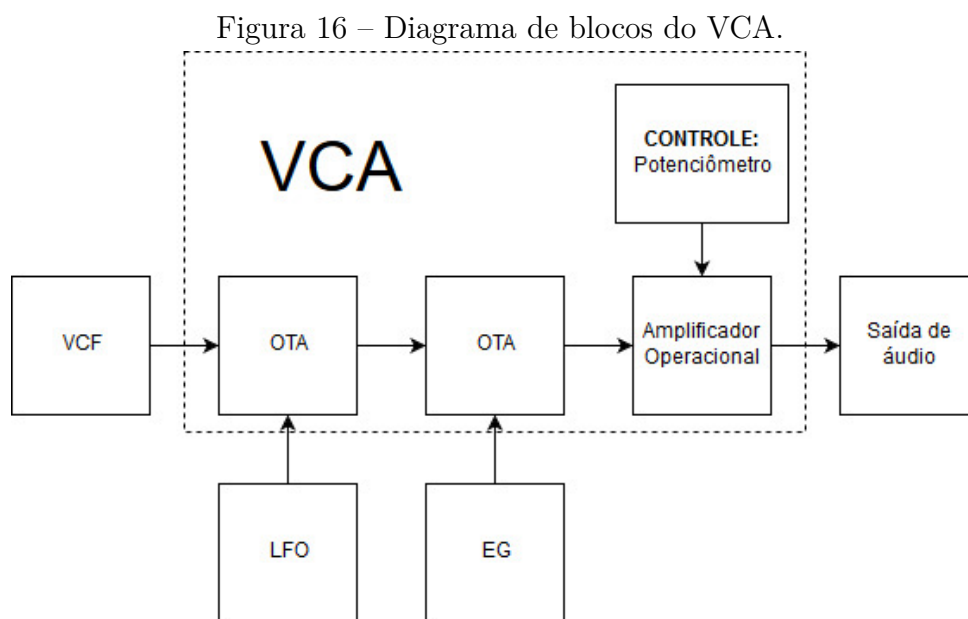
Esta chave faz com que C2 seja descarregado para a referência do circuito através do potenciômetro R4.

2.5.6 Uso do ADSR

O fenômeno de *Attack*, *Decay*, *Release* e *Sustain* é presente em todos os instrumentos musicais e tem formatos relativos à maneira em que seu som é gerado. Por exemplo, instrumentos de sopro, como o saxofone, tem cada estágio do ADSR definido pela intensidade do sopro do músico. Porém, outros tipos de instrumentos musicais fornecem menor controle do usuário, podendo não apresentar alguns dos estágios do ADSR, como os instrumentos de corda, que tem um estágio de *Attack* extremamente rápidos, acionados ao tocar uma de suas cordas. Em seguida, o instrumento passa para um estágio de *Release* lento cuja velocidade é relativa ao comprimento e espessura da corda tocada.

2.6 Voltage Controlled Amplifier (VCA)

O VCA, último estágio do sintetizador, é responsável pela integração dos estágios anteriores, assim como o controle da amplitude final do sinal de saída, como ilustrado no diagrama da figura 16.



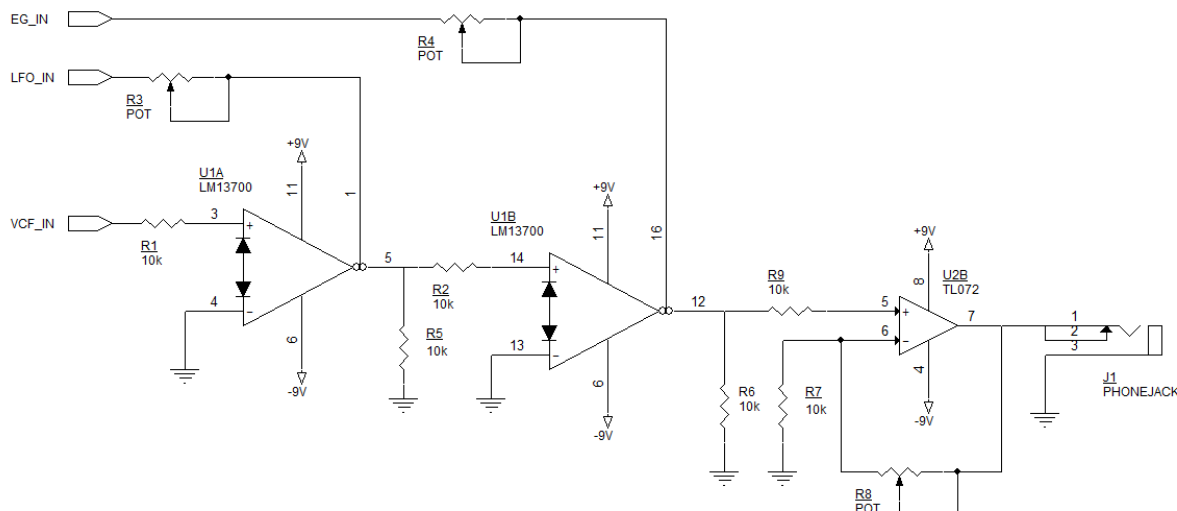
Fonte: Autoria própria.

Este módulo é composto por dois LM13700 e um amplificador operacional operando como amplificadores, como apresentado na figura 17. O primeiro componente recebe a saída do VCO em sua entrada e modula este sinal em função da forma de onda do LFO, aplicado no pino I_{BIAS} .

No segundo LM13700, esta onda é modulada novamente, dessa vez em função do EG.

A amplitude das ondas moduladoras é controlada através dos potenciômetros R3 e R4, em série com os pinos I_{BIAS} , que limitam a corrente fornecida ao LM13700.

Figura 17 – Circuito equivalente do VCA.



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, um amplificador operacional permite o controle da amplitude do sinal de saída.

2.7 Protocolo de mensagens MIDI

O protocolo de mensagens MIDI é utilizada para transmitir informações de quando e quais notas devem ser reproduzidas por um determinado equipamento. O ponto importante é que as mensagens MIDI não definem o som em si, mas apenas a sequência de instruções para criar o som no instrumento alvo. Além disso, cada mensagem é enviada exatamente no momento em que deve ser interpretada. Ao tocar uma determinada nota musical, a mesma está associada à uma frequência de oscilação. O mapeamento de frequência de cada nota musical pode ser demonstrado pela tabela 1.

As mensagens MIDI são enviadas como uma sequência de um ou mais bytes. O primeiro byte é chamado de byte de status e contém o tipo de comando MIDI e o número do canal. O primeiro *nibble* deste byte informa ao dispositivo MIDI o que ele está fazendo, como início de uma nota (NOTE ON, bits 1001) ou término de uma nota (NOTE OFF, bits 1000). O segundo nibble define o canal (bits CCCC), que é usado para diferenciar entre dispositivos que estão no mesmo barramento MIDI e varia de 0 a 15. Para o sintetizador em questão, não há diferenciação de canais. Ou seja, todos os canais são interpretados juntamente como um único canal.

O segundo byte é o byte que define o tom, simplesmente representando a nota sendo tocada. Para cada tom, está associado uma frequência de oscilação, como apresenta a tabela 1. O primeiro bit desse byte é sempre 0, e os outros 7 bits armazenam a informação

Nota	MIDI	Hz	Nota	MIDI	Hz	Nota	MIDI	Hz	Nota	MIDI	Hz
C -	0	8,176	G# 1	32	51,913	E 4	64	329,63	C 7	96	2093,0
C# -	1	8,662	A 1	33	55,000	F 4	65	349,23	C# 7	97	2217,5
C -	0	8,176	G# 1	32	51,913	E 4	64	329,63	C 7	96	2093,0
C# -	1	8,662	A 1	33	55,000	F 4	65	349,23	C# 7	97	2217,5
D -	2	9,177	A# 1	34	58,270	F# 4	66	369,99	D 7	98	2349,3
D# -	3	9,723	B 1	35	61,735	G 4	67	391,99	D# 7	99	2489,0
E -	4	10,301	C 2	36	65,406	G# 4	68	415,31	E 7	100	2637,0
F -	5	10,913	C# 2	37	69,295	A 4	69	440,00	F 7	101	2793,8
F# -	6	11,562	D 2	38	73,416	A# 4	70	466,16	F# 7	102	2960,0
G -	7	12,250	D# 2	39	77,781	B 4	71	493,88	G 7	103	3136,0
G# -	8	12,978	E 2	40	82,406	C 5	72	523,25	G# 7	104	3322,4
A -	9	13,750	F 2	41	87,307	C# 5	73	554,37	A 7	105	3520,0
A# -	10	14,568	F# 2	42	92,499	D 5	74	587,33	A# 7	106	3729,3
B -	11	15,434	G 2	43	97,998	D# 5	75	622,25	B 7	107	3951,1
C 0	12	16,352	G# 2	44	103,82	E 5	76	659,26	C 8	108	4186,0
C# 0	13	17,324	A 2	45	110,00	F 5	77	698,46	C# 8	109	4434,9
D 0	14	18,354	A# 2	46	116,54	F# 5	78	739,99	D 8	110	4698,6
D# 0	15	19,445	B 2	47	123,47	G 5	79	783,99	D# 8	111	4978,0
E 0	16	20,601	C 3	48	130,81	G# 5	80	830,61	E 8	112	5274,0
F 0	17	21,826	C# 3	49	138,59	A 5	81	880,00	F 8	113	5587,7
F# 0	18	23,124	D 3	50	146,83	A# 5	82	932,32	F# 8	114	5919,9
G 0	19	24,499	D# 3	51	155,56	B 5	83	987,77	G 8	115	6271,9
G# 0	20	25,956	E 3	52	164,81	C 6	84	1046,5	G# 8	116	6644,9
A 0	21	27,50	F 3	53	174,61	C# 6	85	1108,7	A 8	117	7040,0
A# 0	22	29,135	F# 3	54	184,99	D 6	86	1174,7	A# 8	118	7458,6
B 0	23	30,867	G 3	55	195,99	D# 6	87	1244,5	B 8	119	7902,1
C 1	24	32,703	G# 3	56	207,65	E 6	88	1318,5	C 9	120	8372,0
C# 1	25	34,648	A 3	57	220,00	F 6	89	1396,9	C# 9	121	8869,8
D 1	26	36,708	A# 3	58	233,08	F# 6	90	1480,0	D 9	122	9397,3
D# 1	27	38,890	B 3	59	246,94	G 6	91	1568,0	D# 9	123	9956,1
E 1	28	41,203	C 4	60	261,63	G# 6	92	1661,2	E 9	124	10548,1
F 1	29	43,653	C# 4	61	277,18	A 6	93	1760,0	F 9	125	11175,3
F# 1	30	46,249	D 4	62	293,66	A# 6	94	1864,7	F# 9	126	11839,8
G 1	31	48,999	D# 4	63	311,13	B 6	95	1975,5	G 9	127	12543,9

Tabela 1 – Relação entre notas musicais, frequência e mapeamento MIDI.

Fonte: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-notenames.htm>

do tom, que está no intervalo de 0 a 127.

O terceiro byte define a velocidade com a qual a nota foi reproduzida, que é uma forma de representar como a nota evolui ao decorrer do tempo. Ao bater fortemente na tecla de um piano e liberar a mesma rapidamente, além do aumento do volume (*Attack*), o som tende a decair rapidamente. Ao pressionar uma tecla de forma suave e lentamente, a mesma possui um volume quase constante que decai lentamente. Tal diferenciação é definida pelo byte de velocidade, que no nosso caso é negligenciada, pois as características do som com o passar do tempo é controlada pelo circuito de envelope (*ADSR*). Assim como o byte de tom, o byte de velocidade possui o primeiro bit como 0, e os outros 7 bits armazenam a informação do velocidade, com grandeza de 0 a 127.

Existe um caso especial onde o término de uma nota pode ser representada com primeiro byte de status informando o início de uma nota (1001 CCCC) mas com o terceiro byte com velocidade 0. Tal caso é tratado pelo microcontrolador, pois muitos equipamentos MIDI utilizam essa variante do protocolo. Ao enviar uma mensagem *NOTE ON* para um instrumento, essa nota começa a tocar. Enquanto isso, é possível enviar outras mensagens *NOTE ON*, com notas de tons diferentes, para produzir um acorde. Ao enviar uma mensagem de *NOTE OFF*, o instrumento deve parar de reproduzir a nota naquela frequência apenas.

Outras mensagens implementadas pelo protocolo MIDI, apesar de não interpretadas pelo sintetizador em questão, são: seleção de instrumentos; notas de instrumentos de bateria, os quais não possuem a grandeza de velocidade associada; seleção de canais; nível de volume do instrumento; seleção de banco de som; pedal de sustenido; variação de frequência de uma nota sendo tocada; etc.

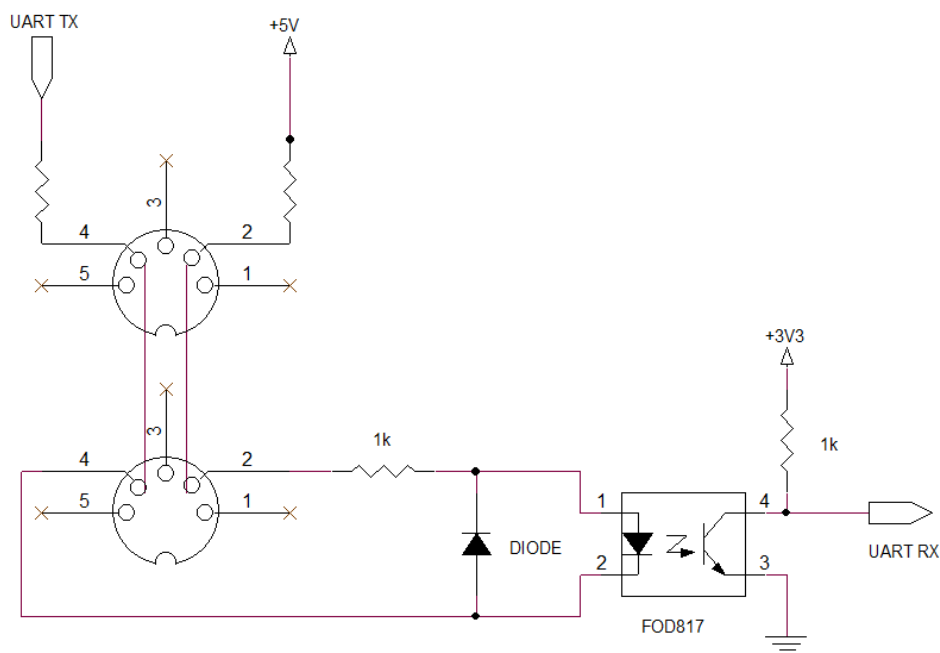
2.8 Comunicação serial

Além de definir o protocolo de mensagens, a interface MIDI também define um padrão para a interface física entre equipamentos. Essa última consiste de uma conexão elétrica com um *loop* de corrente unidirecional (*simplex*), enviando dados de comunicação serial assíncrona a 31250 bits por segundo (*baudrate*). Também utiliza o formato 8-N-1, que possui um *start bit* (deve ser 0), oito bits de dados, nenhum bit de paridade e um *stop bit* (deve ser 1).

Somente uma extremidade do *loop* é referenciada ao terra, com a outra extremidade "flutuando", para evitar *loops* de terra que podem causar interferência e zumbido nos sinais de áudio analógicos. O *loop* de corrente no lado do transmissor aciona o LED de um opto-isolador no lado do receptor, como demonstrado na figura 18.

Na camada física (cabo MIDI), um par de fios transporta o sinal MIDI. A diferença de tensão é normalmente 0 volts (ambos em potencial positivo referenciados ao terra) no estado inativo, que é visto como um '1' no receptor MIDI devido à inversão lógica pelo opto-isolador. Um bit de início de mensagem MIDI (0) causa um diferencial de tensão

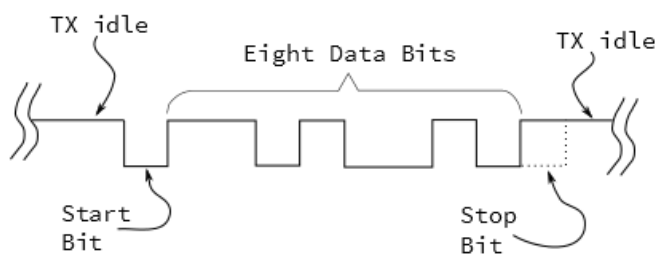
Figura 18 – Circuito para interface MIDI.



Fonte: Autoria própria.

no par de fios (loop de corrente) que é visto no receptor MIDI como '0'. Os 8 bits de dados podem ser '0' (baixo) ou '1' (alto) com o bit de parada (1) visto no receptor MIDI como '1'.

Figura 19 – Representação protocolo de comunicação serial MIDI



Fonte:

<<https://learn.sparkfun.com/tutorials/midi-tutorial/hardware--electronic-implementation>>

2.9 Comentários

Este capítulo apresentou a fundamentação teórica dos principais circuitos necessários para o sintetizador de áudio.

O próximo capítulo apresenta o desenvolvimento dos módulos, simulações dos circuitos, seus ensaios e testes até a integração no sintetizador.

3 DESENVOLVIMENTO

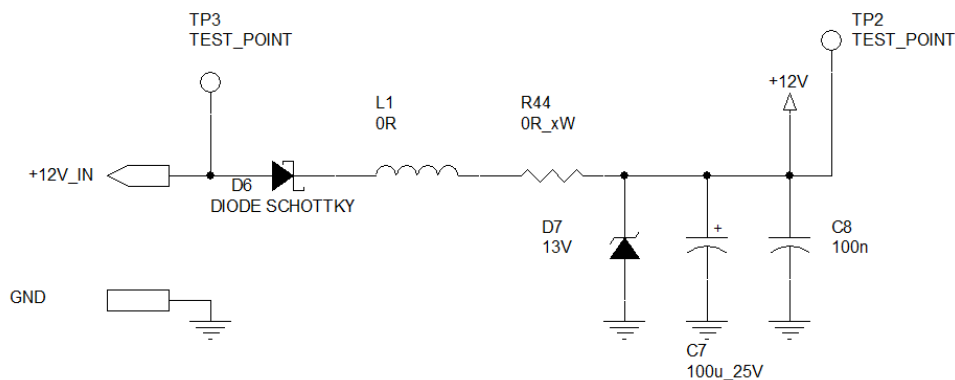
Este capítulo apresenta informações do desenvolvimento do projeto, cálculos de componentes eletrônicos, simulações de circuitos elétricos e detalhes de engenharia.

3.1 Fontes de alimentação

O sintetizador é alimentado por uma fonte externa de 12VDC. Com isto, o usuário tem a liberdade de usar uma fonte que suporte sua tensão, frequência e padrão de conector de tomada. Ademais, esta decisão foi feita a fim de simplificar o projeto, minimizar o tamanho e custo do produto, já que o desenvolvimento de fontes reguladas não é o foco deste trabalho.

O conector da fonte de alimentação é localizado próximo a um circuito de proteção de entrada, que protege o equipamento caso sua alimentação seja invertida, limita a corrente de consumo caso haja um curto no sintetizador, protegendo o circuito de alimentação externa e, por fim, filtra a tensão de 12V, reduzindo oscilações que poderiam danificar ou reduzir a vida útil dos componentes. Este circuito é apresentado na figura 20.

Figura 20 – Circuito de proteção de entrada da fonte de alimentação.

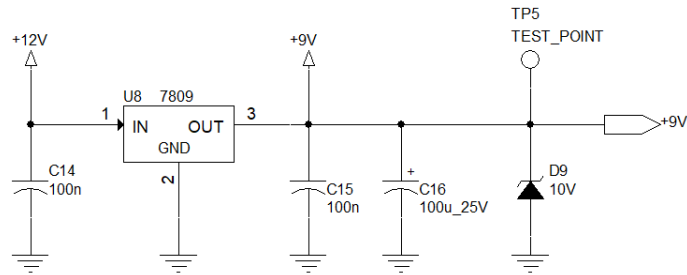


Fonte: Autoria Própria.

3.1.1 Fontes de +9V e +5V

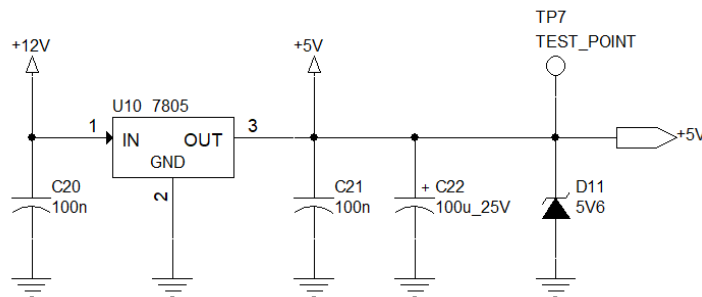
Foram usados dois reguladores lineares conectados diretamente ao 12V filtrado, gerando tensões fixas de +9V e +5V para a alimentação dos amplificadores operacionais e circuitos lógicos, respectivamente, apresentados pelas figuras 21 e 22.

Figura 21 – Circuito elétrico da fonte de +9V.



Fonte: Autoria Própria

Figura 22 – Circuito elétrico da fonte de +5V.



Fonte: Autoria Própria

3.1.2 Fonte de -9V

Para a geração da alimentação negativa dos amplificadores operacionais, foi usado um conversor *Ćuk*, que converte o +12V em uma tensão intermediária próxima de -12V e, em seguida, um regulador linear que reduz este valor para -9V, apresentados pelas figuras 23 e 24.

Este conversor regula sua tensão de saída através do divisor resistivo no pino 3, NFB, de acordo com a seguinte equação (TEXAS INSTRUMENTS, 2015b):

$$V_{out} = -1,23\left(1 - \frac{R63}{R65}\right) \quad (22)$$

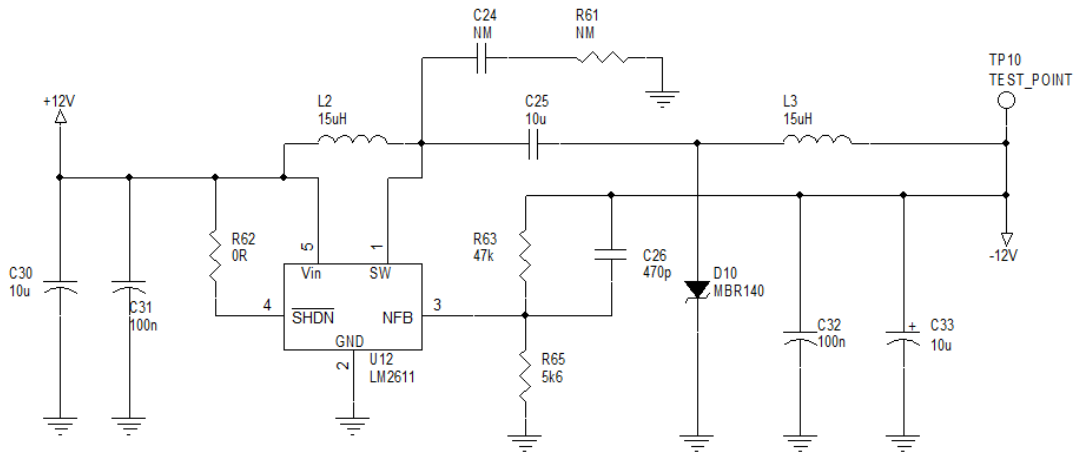
Para obter uma tensão V_{out} próxima de 12V, obtemos um divisor resistivo de:

$$\frac{R63}{R65} = 8,8 \quad (23)$$

Como o datasheet do componente recomenda valores menores que 50k Ω , R63 é fixado em 47k Ω , obtendo R65:

$$R65 = 5367,7[\Omega] \quad (24)$$

Figura 23 – Circuito elétrico da fonte de -12V.



Fonte: Autoria Própria

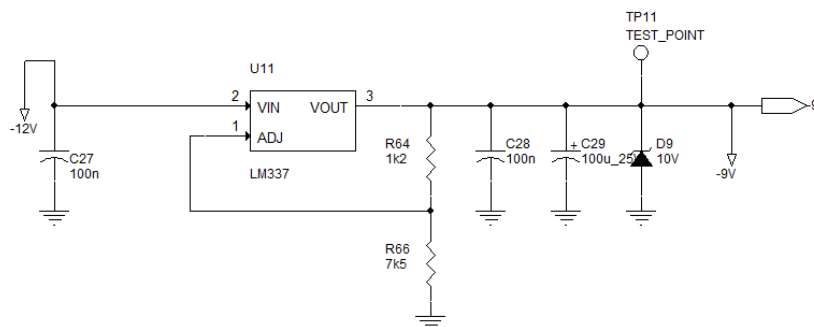
Então, é possível escolher o valor de resistor comercial mais próximo, 5,6k, que resulta na tensão:

$$V_{out} = -1,23 \left(1 - \frac{10000}{5600}\right)$$

$$V_{out} = -11,55[V]$$

Com isto, é possível usar este valor de tensão para alimentar um regulador linear, LM337, para a geração do -9V.

Figura 24 – Circuito elétrico da fonte de -9V.



Fonte: Autoria Própria

A saída do LM337 é dada por (ON SEMICONDUCTORS, 2015):

$$V_{out} = 1,25 \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \tag{25}$$

Assim, para obter uma saída de $-9V$, a razão entre $R2$ e $R1$ deve ser:

$$\frac{R2}{R1} = 6,2 \quad (26)$$

Fazendo arranjos com resistores da série E12, é possível encontrar os valores de $1,2k\Omega$ para $R1$ e $7,5k\Omega$ para $R2$, que fornecem um V_{out} de $-9,03V$.

3.2 Microcontrolador

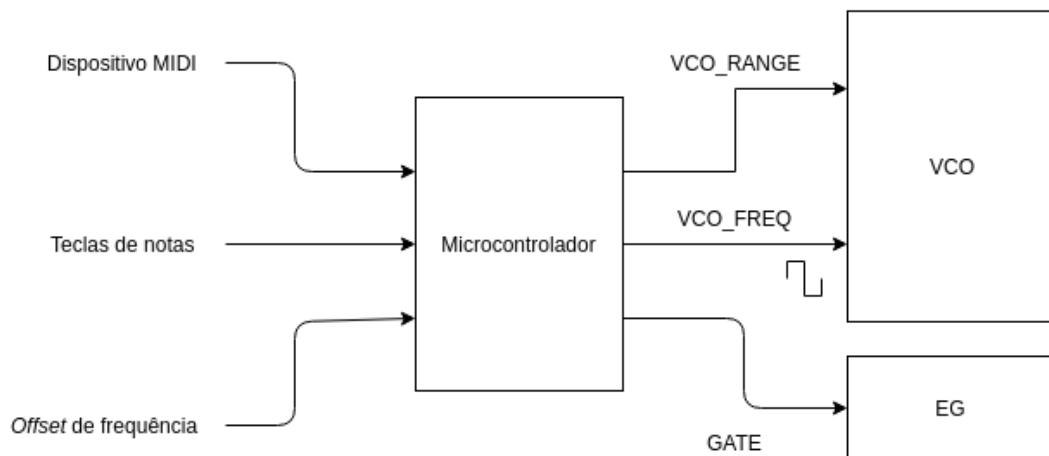
O microcontrolador tem por finalidade interpretar múltiplas entradas direcionadas ao sintetizador pelo usuário, e enviar comandos específicos aos blocos de geração e processamento de sinais.

Como entradas, o microcontrolador recebe informações de que nota musical o usuário deseja utilizar como base para geração de um sinal. Tais notas podem vir das 13 teclas da própria placa, os quais representam uma oitava musical, ou de uma interface MIDI externa, que geralmente é um teclado elétrico. Também possui como entrada um sinal analógico ajustável pelo usuário para alterar a frequência da nota do comando de entrada.

Depois de processar as entradas em questão, o microcontrolador gera sinais para o oscilador (VCO), e também envia um comando para o circuito de envelope (EG), informando para esse os momentos de início e término da nota musical.

As entradas e saídas do microcontrolador são apresentadas na figura 25

Figura 25 – Diagrama de entradas e saídas do microcontrolador



Fonte: Autoria própria

3.2.1 Sinais de entrada

Os sinais de entradas que representam notas musicais podem provir tanto de uma comunicação com um equipamento externo quanto das teclas que simulam uma oitava

musical. Independente da forma de entrada, todas são tratadas como sinais para seleção de frequência do oscilador.

Dessa forma, cada uma das teclas que representam uma oitava musical está associada à uma frequência específica. Ou seja, ao pressionar a primeira tecla da oitava, a nota C4 é tida como referência. Nota essa que possui a frequência de 261,63Hz. Já a segunda tecla representa a nota C# 4, de 277,18Hz. A última tecla representa a primeira nota da próxima oitava (C5), que possui frequência de 523,25Hz.

Da mesma forma que as teclas do sintetizador, interfaces externas comunicam ao microcontrolador qual nota deve ser produzida, e cada uma delas corresponde a uma frequência. Tal comunicação, que é serial, segue o protocolo MIDI, que serve para transmitir informações em tempo real para a reprodução de uma peça musical.

Além das entradas seletoras de notas musicais, existe uma entrada analógica no microcontrolador (VCO_FREQ_OFFSET) que define um offset de frequência a ser aplicado a essas notas. Tal offset pode ser positivo ou negativo, e têm como limite 36 notas musicais, ou 3 oitavas. Dessa maneira, o usuário pode percorrer quase toda a faixa de frequência de notas musicais com apenas um teclado de uma oitava musical.

3.2.2 Sinais de saída

O microcontrolador gera sinais para apenas dois circuitos do sintetizador: o oscilador (VCO) e o gerador de envelope (ADSR).

Para controlar a frequência de oscilação de uma onda gerada pelo VCO, é necessário fornecer um nível de tensão contínuo em sua entrada. Para tal, o microcontrolador gera um sinal de PWM (VCO_FREQ) com frequência de 12kHz, que é transformado em um nível médio por um filtro passa-baixas. Dessa forma, não foi necessário fazer uso de um circuito de conversão digital-analógico.

Além do sinal de PWM, o VCO também recebe um sinal para comutar a faixa de frequência que deve operar (VCO_RANGE). Quando em alta, o VCO opera nas faixas de 18kHz a 800Hz. Quando em baixa, opera na faixa de 800Hz a 20Hz.

Quando uma nota musical é reproduzida, a mesma é modulada pelo circuito de envelope (ADSR). Entretanto, é necessário que haja sincronia entre a atuação do ADSR e as notas tocadas. Para tal, no mesmo instante em que o microcontrolador produz o sinal para gerar uma onda VCO, o mesmo aciona o sinal GATE do ADSR. Já quando a percussão da nota é interrompida, o sinal de GATE é desacionado.

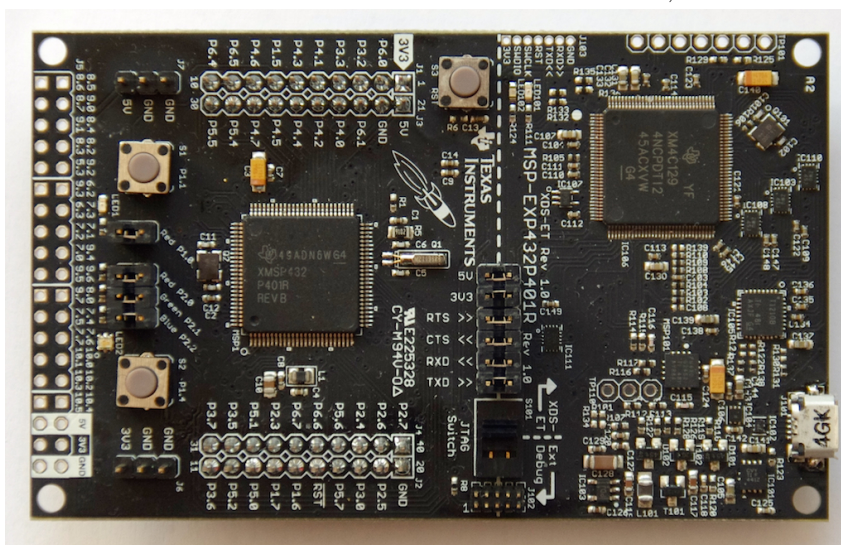
3.2.3 Tecnologias escolhidas

3.2.3.1 Kit de desenvolvimento

A fim de solucionar a interface digital MIDI e minimizar o desenvolvimento do *hardware* necessário, foi escolhido o kit de desenvolvimento MSP-EXP432P401R, da Texas

Instruments, apresentado na figura 26. Esse kit utiliza o microcontrolador MSP432P401R, que é um ARM Cortex-M4F de 48MHz e 32-bits. Além de ser de baixo consumo, com alimentação ativa de 80uA/MHz em estado ativo e 660nA em *standby*, o microcontrolador possui 256KB de memória *Flash* e 64KB de RAM. Também possui um conversor analógico-digital de 16 bits, uma FPU, 4 *timers* de 16 bits e 2 *timers* de 32 bits. Para comunicação, é capaz de estabelecer 4 interfaces I2C, 8 SPI e 4 UART. Para interface com o usuário o kit possui 2 botões e 2 LEDs, e um emulador *on-board* (XDS110-ET) que possibilita a depuração e gravação do *firmware* sem ferramentas adicionais.

Figura 26 – Kit de desenvolvimento MSP-EXP432P401R, da Texas Instruments



Fonte: <<https://embeddedcomputing.weebly.com/launchpad-msp432-rtos-for-everyone.html>>

3.2.3.2 Linguagem de programação e bibliotecas

A linguagem C foi escolhida para o desenvolvimento do *firmware*. Ademais, com o intuito de abstrair os detalhes de acessos dos registradores do *hardware*, foi utilizada a biblioteca *MSP432 Driver Library*. Essa é um conjunto de APIs utilizadas para configurar, controlar e manipular os periféricos de *hardware* da plataforma MSP432. Além de poder controlar os periféricos MSP432, a biblioteca fornece ao usuário a capacidade de usar periféricos ARM comuns. Dessa maneira, permite a criação de um código intuitivo e portátil entre dispositivos não apenas dentro da plataforma MSP432, mas entre famílias diferentes nas plataformas MSP430/MSP432.

Mais importante que a portabilidade, a facilidade de entendimento do código e a organização que a biblioteca traz foi o principal motivo da sua escolha. Isso fica evidente na comparação demonstrada a seguir, na qual um sinal de *clock* é configurado com e sem o uso da biblioteca.

```
1 // configuracao do clock acessando
2 // os registradores da forma tradicional
3 CSKEY = 0x695A;
4 CSCTL1 |= SELM_1 | DIVM_2;
5 CSKEY = 0;
6
7 // configuracao equivalente
8 // utilizando a MSP432 Driver Library
9 CS_initClockSignal (
10     CS_MCLK ,
11     CS_VLOCLK_SELECT ,
12     CS_CLOCK_DIVIDER_32 );
```

3.2.4 Sistema operacional

Levando em consideração a facilidade de desenvolvimento e a manutenção do código, optou-se por utilizar o sistema operacional CMSIS-RTOS Keil RTX. Ao fazer uso de um sistema operacional que se responsabiliza pelo agendamento de tarefas é possível reduzir a complexidade do código a ser desenvolvido. Não há *superloop* que se degrada à medida que os recursos são adicionados e não há necessidade de continuamente ajustar o tempo necessário para executar tarefas importantes e usar o tempo livre para atividades em segundo plano. Também se torna mais fácil escrever um código modular e trabalhar em equipe.

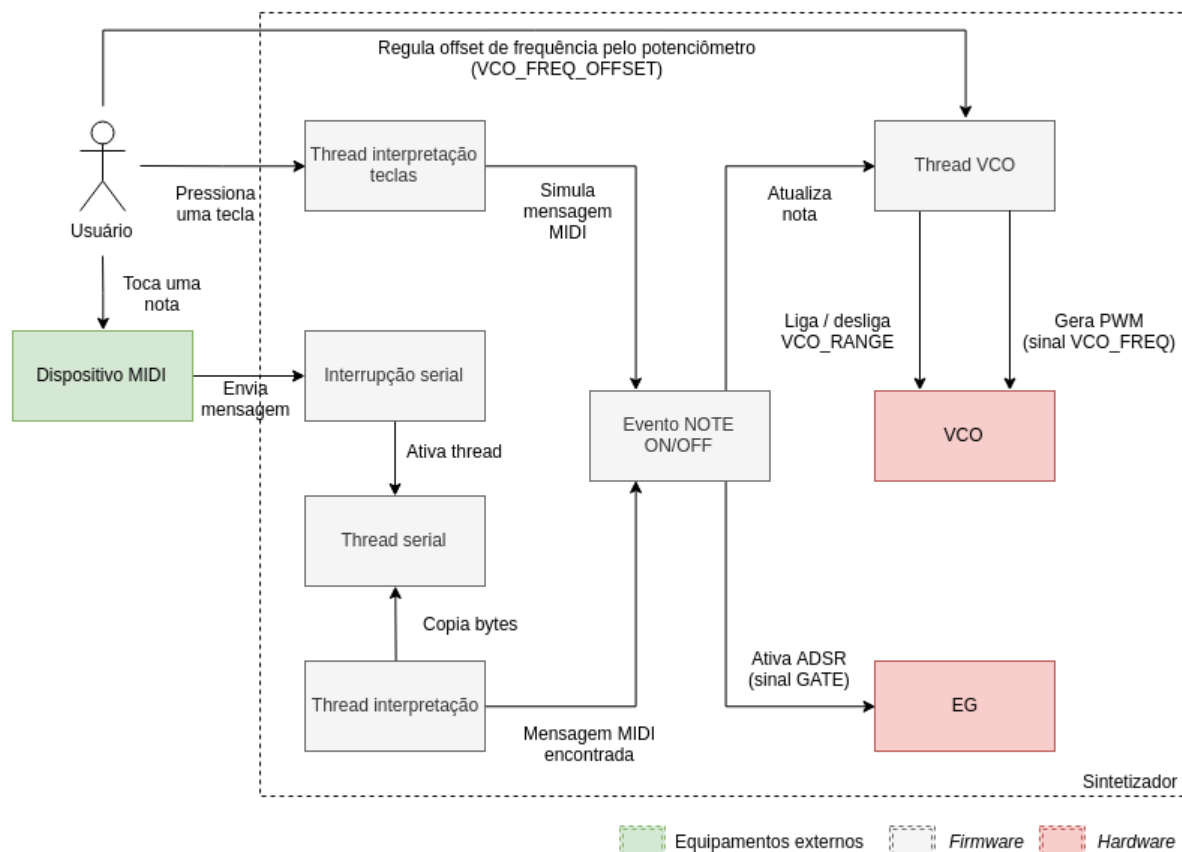
O sistema operacional CMSIS-RTOS Keil RTX é um sistema operacional determinístico de tempo real que implementa a API CMSIS-RTOS, que é uma interface de sistemas operacionais genérica para dispositivos baseados no processador Cortex-M. O RTX gerencia a alternância entre as atividades. Cada atividade recebe um *thread* separada que executa uma tarefa específica, simplificando a estrutura do programa. O sistema operacional é escalável, e *threads* adicionais podem ser adicionados facilmente em um momento posterior, contribuindo para a manutenção do código. As *threads* respeitam um sistema de prioridade, e podem ser configuradas de acordo com quão críticas são suas atividades.

3.2.5 Funcionamento do *firmware*

O *firmware* foi separado em quatro atividades principais, as quais são: armazenamento dos dados recebidos pela comunicação serial com o equipamento MIDI; interpretação dos dados recebidos pela comunicação serial; verificação das entradas das teclas de notas musicais na própria placa do sintetizador; cálculo e atualização dos valores de saída para o

VCO. Para cada uma das atividades foi criada uma única *thread*. O diagrama da figura 27 representa o funcionamento geral do *firmware*.

Figura 27 – Diagrama de funcionamento do *firmware*



Fonte: Autoria própria.

Para escutar os dados recebidos pela comunicação serial foi criada uma *thread* com prioridade acima de todas as outras, com objetivo de evitar a perda de dados recebidas pelo dispositivo MIDI externo. Essa *thread*, ao ser inicializada, configura os pinos de UART, configura o *baudrate* da comunicação, configura os bits de paridade, e habilita uma interrupção para todo byte que for recebido por esse canal. O *loop* de execução dessa *thread* é suspenso até que um sinal para ativação da *thread* seja recebido. Quando um byte é enviado para o microcontrolador, a interrupção da comunicação serial é acionada, e nela é enviado um sinal para a ativação da *thread*. Dessa maneira, toda a capacidade de processamento do microcontrolador fica disponível para as outras atividades se nenhum byte é recebido pela pelo barramento serial. Ao ser ativada, a *thread* armazena o byte recebido em um *buffer* circular de 60 bytes, e suspende sua atividade novamente.

Uma outra *thread* é responsável por interpretar os bytes armazenados pela *thread* de comunicação serial. O *loop* principal dessa *thread*, que é executado a cada 20ms, copia os bytes recebidos pela serial para um outro *buffer* circular de interpretação. Em seguida,

percorre todos os bytes desse *buffer* de interpretação à procura de uma mensagem de NOTE ON ou NOTE OFF do protocolo MIDI. Se uma dessas mensagens é encontrada, é chamada uma *callback* (que é essencialmente um ponteiro para uma função) para tratar o evento.

A terceira *thread* tem a função de verificar se alguma das teclas de notas musicais da placa foi pressionado ou solto. Ao iniciar, essa *thread* mapeia um pino de entrada para cada tecla. Devido ao fato de ser necessário identificar os eventos de NOTE ON quando uma tecla é pressionada e NOTE OFF quando é liberada, não se fez uso de interrupções, pois as mesmas só ocorreriam em um dos eventos. Ao executar seu *loop* principal a cada 5ms, a *thread* verifica o nível elétrico de cada pino de cada tecla. Se o nível elétrico mudar de alto para baixo, a tecla foi pressionada, e a *callback* que representa o evento de NOTE ON é chamada. Similarmente, se o nível elétrico mudar de baixo para alto, a tecla foi liberada, e o evento de NOTE OFF é desencadeado. Vale salientar que para cada tecla foi implementado *debounce* individual, de 50ms.

Quando um evento de NOTE ON ocorre, o número MIDI que aquela nota representa, como visto na tabela 1, é armazenado em uma lista encadeada que representa todas as notas ativas, e uma variável que representa a nota atual sendo percutida é atualizada com esse número. Nesse instante, o sinal GATE (que ativa o módulo ADSR) é alterado para nível alto. Dessa forma, o início de uma nota musical e a atuação do ADSR são sincronizadas. Já quando um evento de NOTE OFF ocorre, é removido da lista encadeada o número da nota. Atualiza-se o valor da variável que representa a nota atual sendo percutida para o valor da última nota inserida na lista encadeada. Com essa funcionalidade, o usuário não precisa pressionar e liberar uma tecla de nota completamente para só então pressionar outra tecla. Apesar do sintetizador ser monofônico e produzir um som a partir de uma nota apenas, não fica tão evidente ao usuário tal limitação ao operar. Por fim, no evento de NOTE OFF, se nenhuma nota está armazenada na lista encadeada, o sinal GATE é alterado para nível baixo, desligando a modulação ADSR.

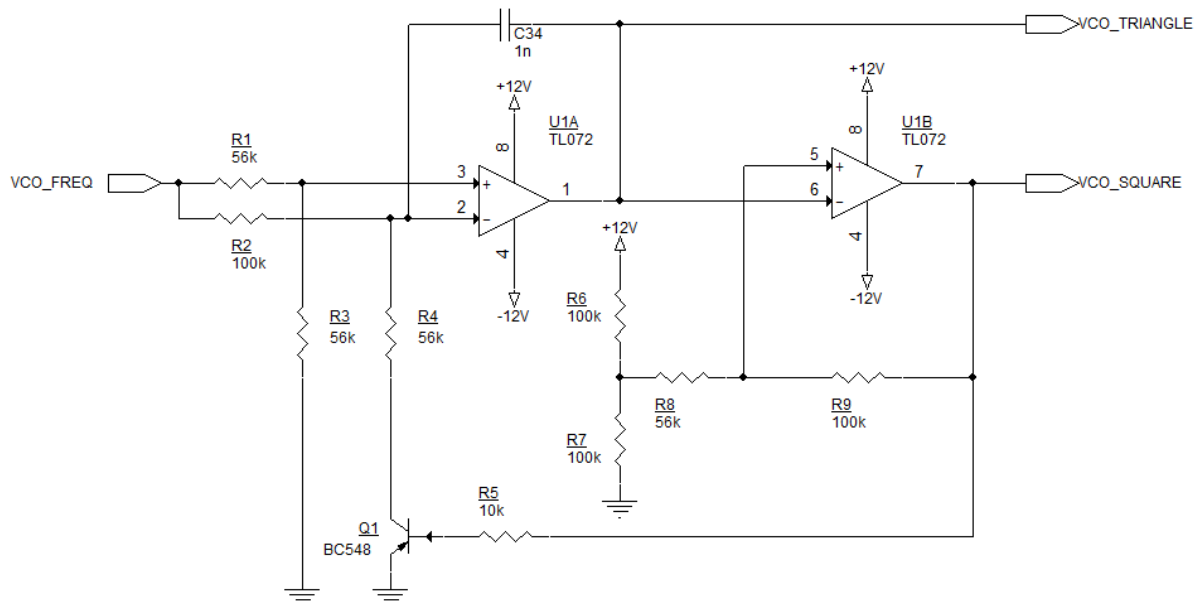
A quarta *thread* é responsável por gerar sinais para o VCO. Ao inicializar, a mesma configura o conversor analógico-digital, que é utilizado para ler um valor de tensão de um potenciômetro que configura um *offset* de frequência a ser aplicada à frequência da nota musical (VCO_FREQ_OFFSET). Essa *thread* também configura um sinal de PWM de 12kHz, que, aplicado a um filtro passa-baixa, é transformado um nível de tensão médio que controla a frequência de oscilação do VCO. No *loop* de execução dessa *thread*, que ocorre a cada 10ms, espera-se a leitura do sinal VCO_FREQ_OFFSET pelo conversor analógico-digital, com *timeout* de 100ms. A seguir, calcula-se a média móvel das últimas leituras, e com o resultado é calculado quantas notas MIDI esse *offset* de frequência representa, com máximo de 36 notas musicais. Com o valor da variável que representa a nota sendo reproduzida, provinda dos eventos de NOTE ON e NOTE OFF, e com o valor do *offset* de frequência, é consultado numa tabela o *duty cycle* correspondente para que

o VCO oscile na frequência desejada. Tal valor de *duty cycle* é configurado no PWM de saída, e se o mesmo causar uma frequência de oscilação superior a 830Hz no VCO, ativa-se o sinal VCO_RANGE para que o oscilador opere na faixa de frequências mais altas.

3.3 Voltage Controlled Oscillator (VCO)

Inicialmente, a forma de onda base do VCO foi projetada a partir de um circuito analógico, que gerava ondas triangulares e quadradas, simultaneamente (TEXAS INSTRUMENTS, 2002a). Porém, esta topologia, apresentada na figura 28 mostrou-se muito instável e dependente de ajustes finos nos valores dos componentes.

Figura 28 – Circuito elétrico da primeira tentativa de implementação do VCO.



Fonte: Autoria Própria

Este circuito é composto por um amplificador operacional integrador, que transforma a forma de onda quadrada em uma triangular e um comparador, que funciona como um *Schmitt Trigger* a partir da triangular e do nível de tensão definido pelo divisor resistivo em sua entrada não inversora, R6 e R7.

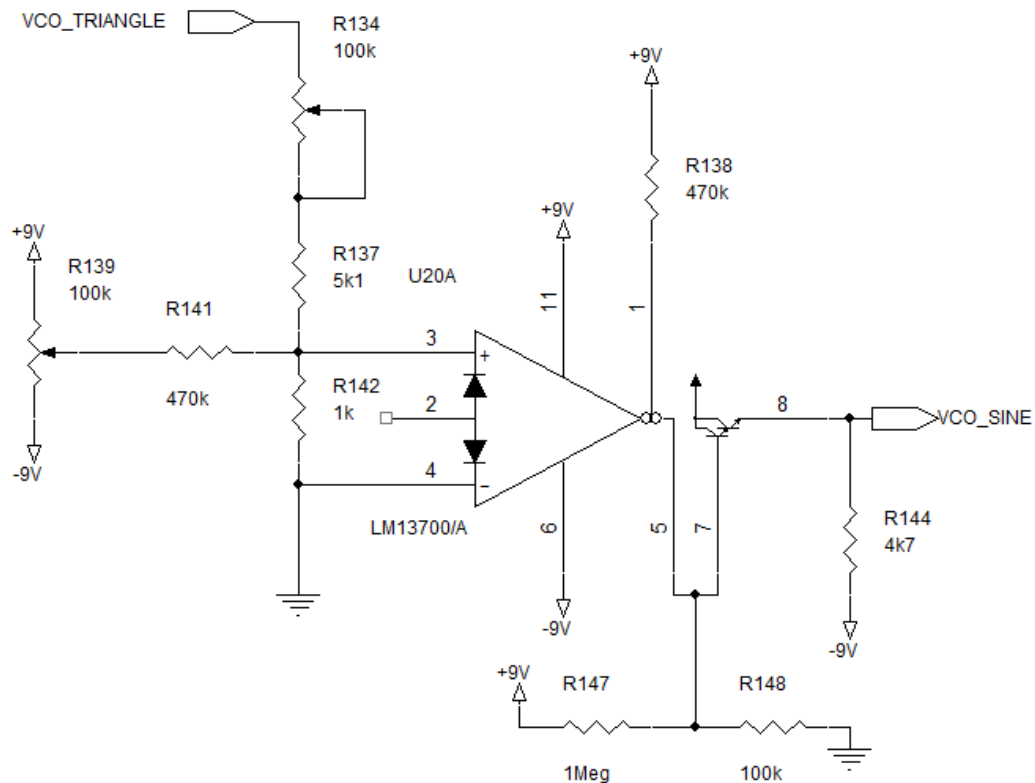
A frequência das ondas de saída é definida pelo nível de tensão VCO_FREQ, que regula a diferença de tensão entre as entradas do amplificador U1A. Com isto, a amplitude das ondas de saída são proporcionais à sua frequência. Para manter a tensão de saída constante com esta topologia, é necessário projetar diversos VCOs, que operam em diferentes faixas de frequências.

Assim, este circuito foi alterado, substituindo amplificadores operacionais por amplificadores de transcondutância, que permitem o controle da frequência de oscilação

sem afetar a amplitude das ondas geradas.

A onda senoidal é gerada por mais um amplificador de transcondutância, conforme apresentado na figura 29.

Figura 29 – Circuito elétrico do gerador de onda senoidal a partir de uma onda triangular.



Fonte: Autoria Própria

Para garantir que a senóide está corretamente ajustada a fim de reduzir sua distorção, a amplitude e *offset* da onda triangular é ajustada através dos potenciômetros R134 e R139.

A amplitude do sinal de entrada, regulada pelo potenciômetro R134, ajusta a onda senoidal entre uma triangular e quadrada.

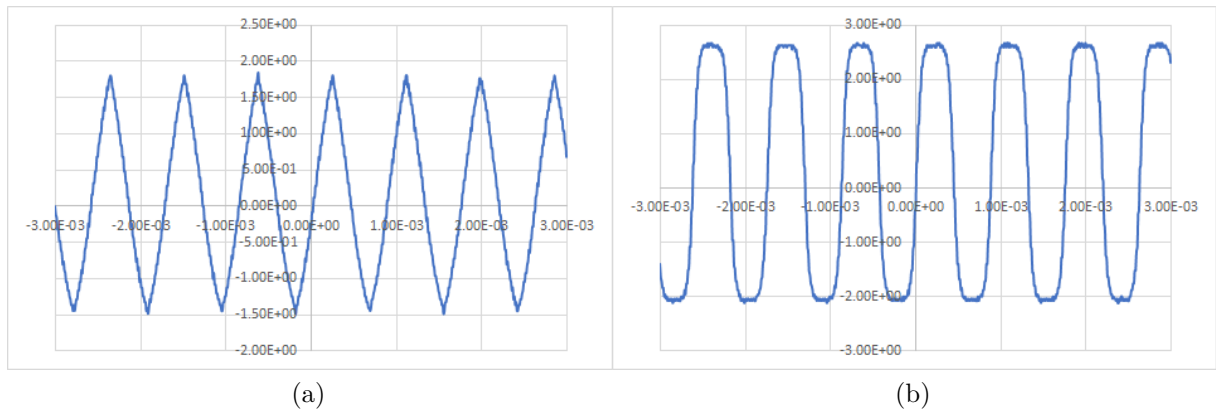
O *offset*, controlado pelo potenciômetro R139, ajusta a simetria vertical da senoidal.

Ao ajustar estes dois parâmetros corretamente, é possível obter uma onda senoidal como a apresenta a figura 32.

Em seguida, as ondas triangular, quadrada e senoidal são inseridas em amplificadores operacionais, cujo ganho é controlado por potenciômetros a fim de garantir que todas as ondas apresentam a mesma amplitude pico-a-pico.

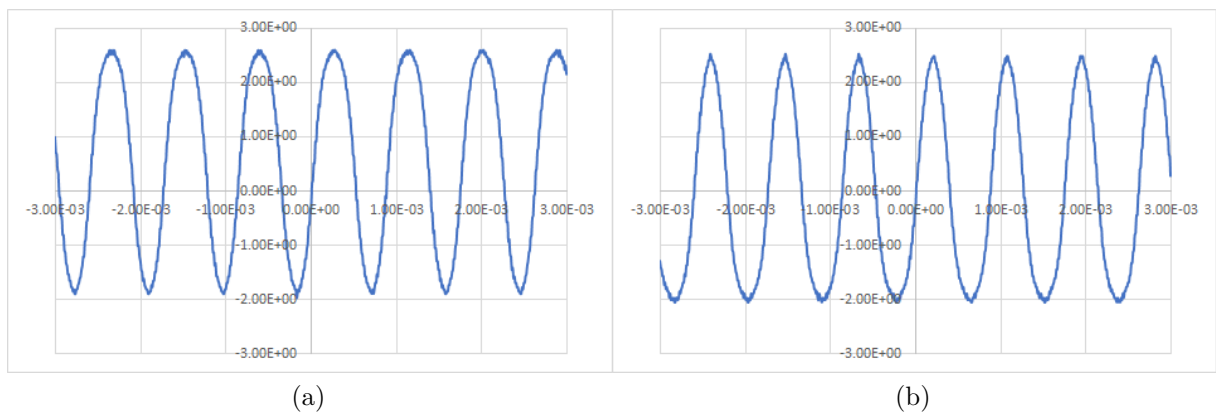
Finalmente, uma chave de 3 posições é usada para selecionar qual onda será usada no próximo estágio do sintetizador.

Figura 30 – Regulagem da onda senoidal entre uma triangular e quadrada.



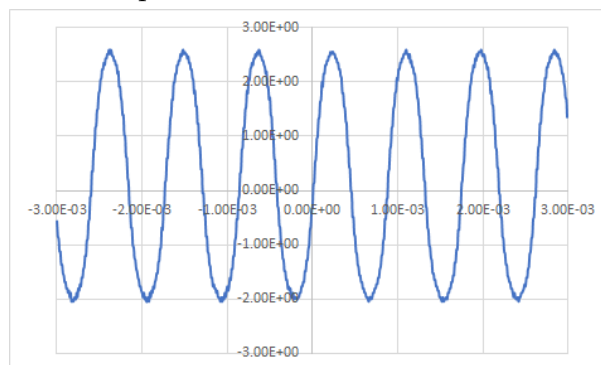
Fonte: Formas de onda do osciloscópio.

Figura 31 – Regulagem da simetria onda senoidal.



Fonte: Formas de onda do osciloscópio.

Figura 32 – Exemplo de onda senoidal corretamente ajustada.



Fonte: Formas de onda do osciloscópio.

3.4 Low Frequency Oscillator (LFO)

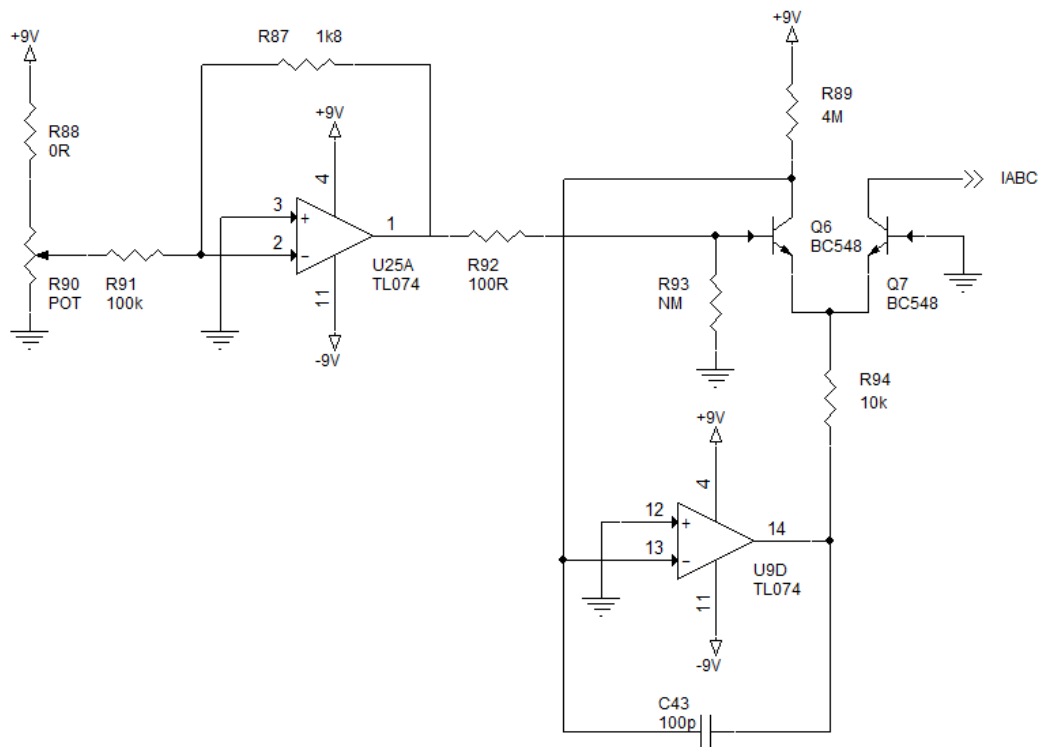
O LFO apresenta a mesma topologia que o VCO, mas com valores de componentes alterados para a geração de ondas com frequência de 1 a 20Hz. Como a faixa de frequência de operação deste oscilador é pequena, não é necessário implementar o circuito de seleção de capacitores, como realizado no VCO. A chave seletora deste módulo fornece, além da seleção entre uma onda senoidal, triangular ou quadrada, a opção de remover a saída do LFO do restante do sintetizador caso o usuário não deseje realizar a modulação de amplitude do VCO.

3.5 Voltage Controlled Filter (VCF)

Assim como no VCO e LFO, o amplificador operacional integrador foi implementado com o amplificador operacional de transcondutância, LM13700, e seu ganho controlado através da sua entrada I_{ABC} .

Este ganho é controlado pelo usuário por um potenciômetro e convertido de um valor de tensão linear para uma corrente exponencial através do circuito apresentado na figura 33.

Figura 33 – Circuito para conversão de um ganho linear para exponencial.



Fonte: Autoria Própria.

O *state variable filter* foi desenvolvido como descrito no capítulo 2.4, obtendo os

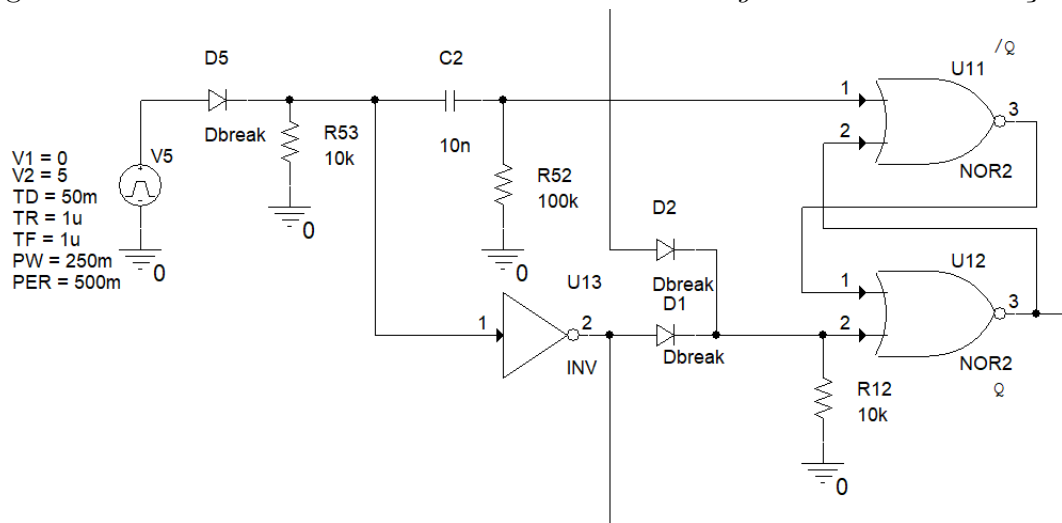
filtros passa-baixas, passa-faixa e passa-altas.

3.6 Envelope Generator (EG)

O EG foi implementado em simulação no *software* PsPice e apresentado no apêndice B - Circuito elétrico usado para a simulação do *Envelope Generator*.

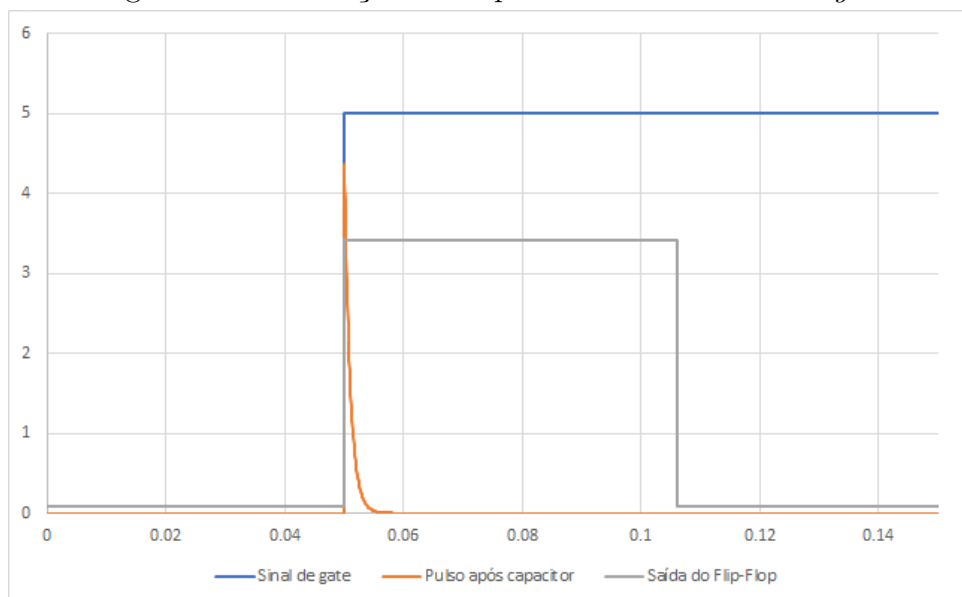
O comando de início do EG é enviado pelo processador, e transformado por um pulso, que muda o estado do *flip-flop* para “1”, como mostrado nas figuras 34 e 35.

Figura 34 – Circuito elétrico de tratamento do sinal de *gate* usado na simulação.



Fonte: Autoria Própria.

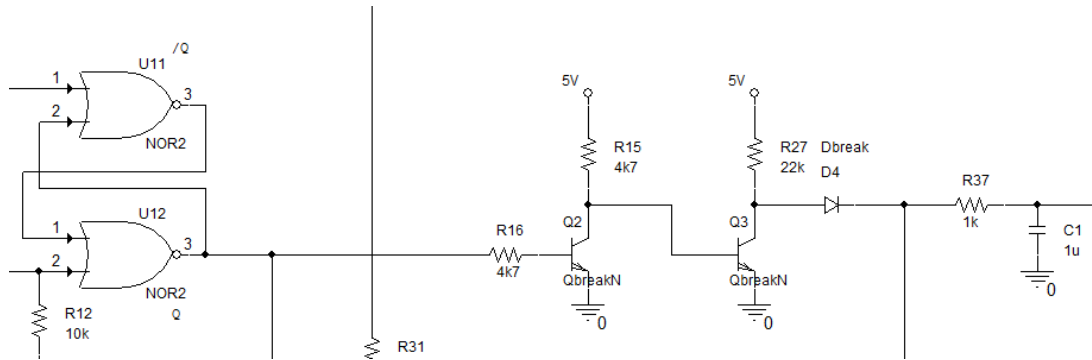
Figura 35 – Simulação da resposta do EG ao sinal de *gate*.



Fonte: Autoria Própria.

Uma saída em “1” do *flip-flop* satura o transistor Q2 quem por sua vez, corta a condução de Q3, permitindo a carga do capacitor C1 através dos resistores R27 e R37, como mostrado na figura 36. No equipamento, um potenciômetro é usado para controlar a resistência R27, permitindo o controle da velocidade de carga do capacitor C1.

Figura 36 – Circuito elétrico do acionamento do estágio de *Attack* do EG.



Fonte: Autoria Própria.

Quando a tensão sobre C1 atingir o valor “Attack_Max”, da figura 15 e representado pelo divisor resistivo R7 e R54 do anexo B, a saída do *flip-flop* é trocada para “0”.

Como o sinal de *gate* ainda está presente, o inversor U13, no anexo B, apresenta sua saída em “0” que, combinado com a saída do *flip-flop* em “0”, resulta em um sinal em “1” na porta lógica NOR, U14, que satura o transistor Q4.

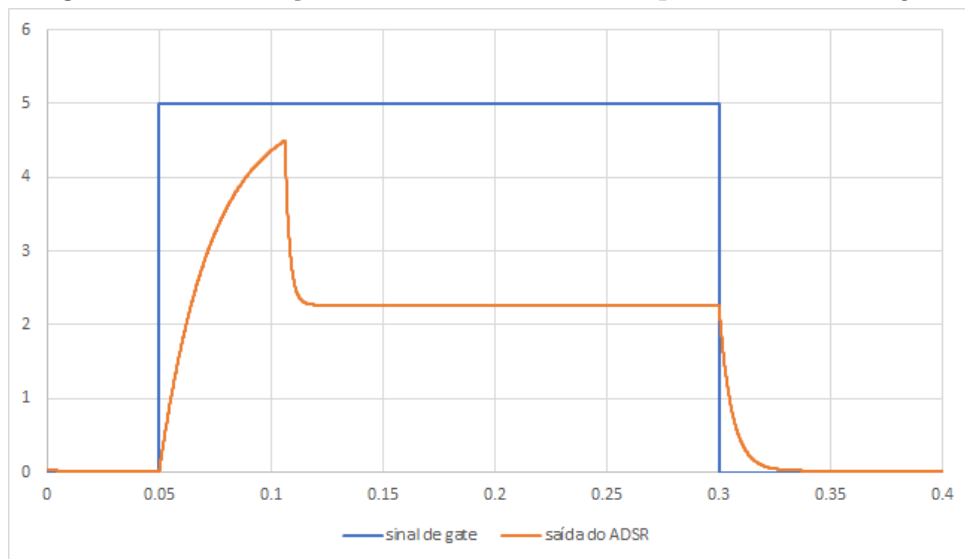
Este transistor permite a descarga de C1, do anexo B, através de R38, que, no sintetizador, é um potenciômetro que controla a velocidade de descarga de C1, ou seja, o estágio de *Decay*.

Esta descarga ocorrerá até C1 atingir o nível do divisor resistivo R31 e R36, que são representados por um potenciômetro de controle do nível de *Sustain*.

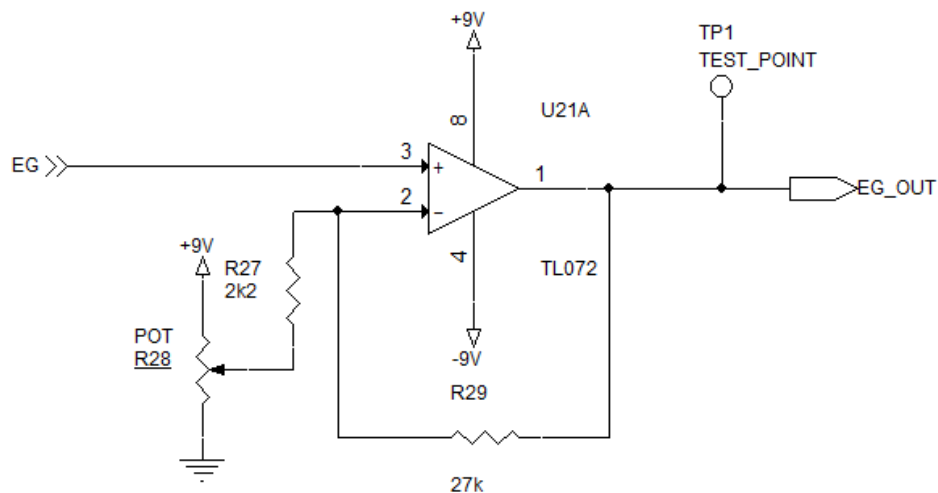
Quando o sinal de *gate* é removido, o inversor U13, do anexo B troca sua saída para “1”, alternando U17 para “0” que resulta no valor “1” na porta lógica U16. Com isto, Q5 é saturado, descarregando o restante da tensão sobre C1 pelo resistor R42, que representa o potenciômetro de *Release* do sintetizador.

Assim, o envoltório do ADSR é implementado, como descrito em sua fundamentação teórica, e demonstrado na simulação, na figura 37.

Este sinal é usado no VCA, através do pino de I_{bias} de um LM13700, para modular a amplitude da saída do VCF. Portanto, é necessário adicionar um *offset* de aproximadamente -7V, equivalente ao zero deste pino.

Figura 37 – Simulação da saída do EG em resposta ao sinal de *gate*.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 38 – Circuito elétrico para adição do *offset* na saída do EG.

Fonte: Autoria Própria.

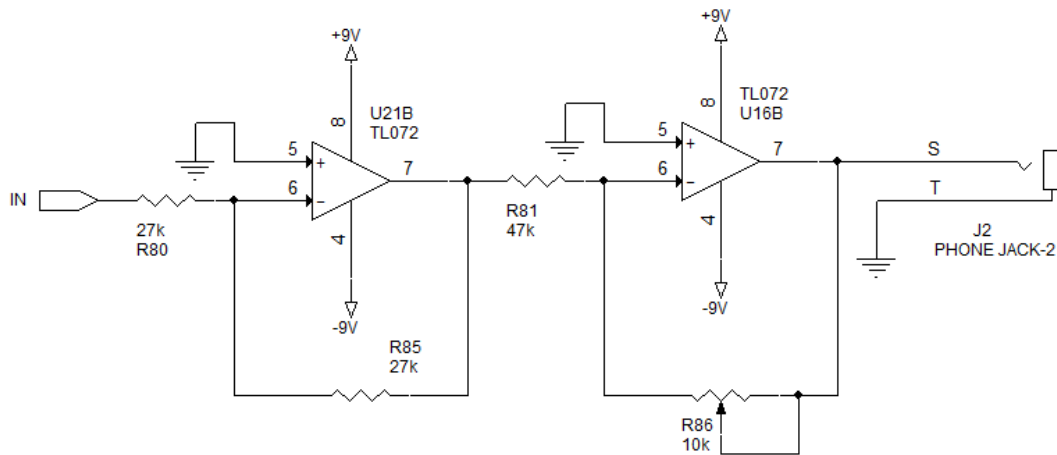
3.7 Voltage Controlled Amplifier (VCA)

O último estágio do sintetizador deve fornecer uma saída com baixa impedância e um sinal com amplitude controlável, a fim de ser usada em qualquer dispositivo que fará o processamento ou reprodução do áudio.

Para isto, foram usados dois amplificadores operacionais inversores, apresentados pela figura 39. O segundo componente garante baixa impedância de saída e ganho controlável através de um potenciômetro, regulado pelo usuário.

Os valores dos resistores foram selecionados a fim de fornecer uma tensão de

Figura 39 – Circuito elétrico do VCA.



Fonte: Autoria Própria.

pico máxima de aproximadamente 2V, um pouco superior ao máximo valor de entrada de equipamentos de áudio profissional (4dBu, equivalente a 1,23 Vrms, ou 1,736Vpk) (CILETTI, 1998).

O primeiro amplificador operacional apresenta ganho 1 e é usado para preservar a polaridade do sinal de saída em relação ao gerado pelos estágios anteriores do sintetizador.

3.8 Comentários

Este capítulo apresentou detalhes do desenvolvimento dos circuitos do sintetizador.

O próximo capítulo apresenta resultados obtidos com os ensaios em bancada de cada circuito e em conjunto.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados de cada módulo são apresentados através de formas de onda obtidas através do osciloscópio e das simulações.

As formas de ondas foram capturadas em um osciloscópio Rigol DS1052E e exportadas para arquivos em formato .csv. A partir destes arquivos, foram gerados os gráficos apresentados neste capítulo.

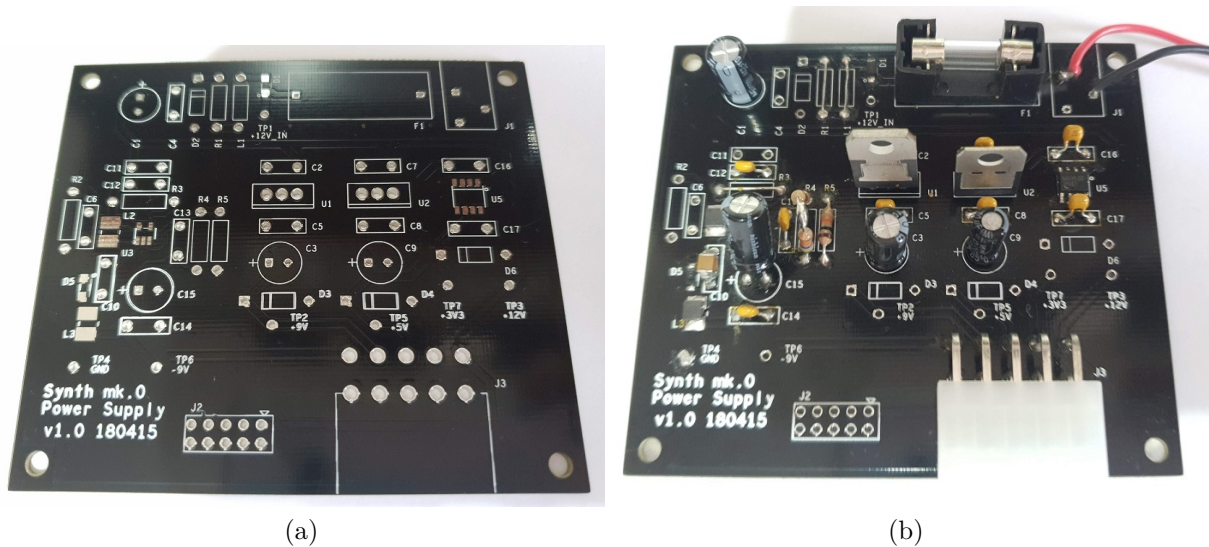
Os resultados das simulações foram obtidos pelo software PsPice e, assim como as formas de ondas, exportados em .csv e reconstruídas em gráficos pelo Excel.

4.1 Placa de fontes de alimentação

Durante a etapa de projeto dos circuitos elétricos, uma placa de fontes de alimentação foi projetada, desenhada e produzida a fim de facilitar os testes em *protoboard*.

Esta placa, apresentada na figura 40, contém as fontes de +9V, -9V, 5V e 3,3V, construídas com as mesmas topologias a serem usadas na versão final do equipamento. Assim foi possível, também, validar o funcionamento destes circuitos elétricos.

Figura 40 – Fotos da PCI das fontes de alimentação fabricadas



Fonte: Autoria Própria.

Os valores de tensão e *ripple* foram medidos através do osciloscópio e apresentados na tabela 2.

A medição de ruído foi obtida usando aquisição de detecção de pico, na escala de 20mV/div e 25ms/div em acoplamento AC.

Como a placa de desenvolvimento da Texas Instruments já fornece uma tensão de 3,3V a partir do 5V, a fonte projetada para gerar esta tensão não foi usada.

Tabela 2 – Valores de tensão média e ruído AC do primeiro protótipo da fonte de alimentação.

Fonte	Tensão média [V]	Ruído p-p AC [mV]
+5V	5,12	62,4
+9V	9,09	28
-9V	9,04	40

Fonte: Autoria própria.

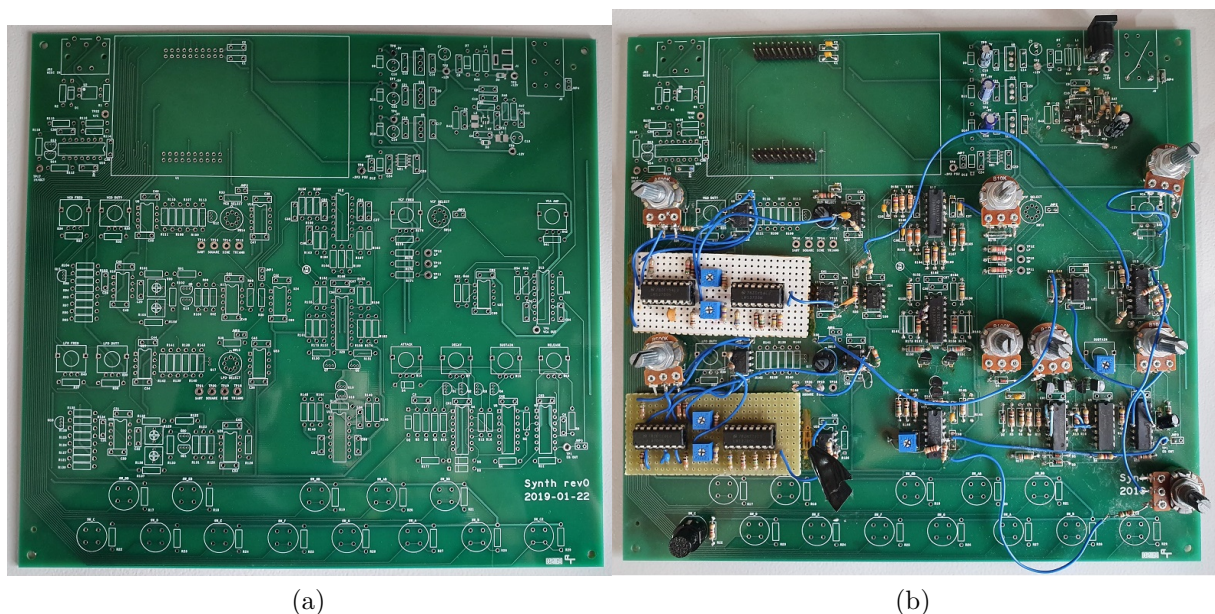
Com esta placa, foi possível identificar correções e melhorias no circuito das fontes de alimentação a serem aplicadas na primeira versão do equipamento. Como ela funcionou corretamente, gerando as tensões desejadas e com baixo nível de *ripple*, os circuitos foram usados, sem alterações, nas outras placas desenvolvidas.

4.2 Primeiro protótipo do sintetizador

Ao finalizar o esquema elétrico da primeira versão do equipamento no OrCad, esta placa foi roteada e fabricada a fim de testar e validar todos os circuitos elétricos projetados e iniciar o desenvolvimento do *firmware*.

Esta placa, apresentada na figura 41 e denominada “Synth rev0”, apresentou a dificuldade de implementação do VCO e LFO, como descrito no capítulo 3.3, que demandou o desenvolvimento destes módulos com o uso de amplificadores de transcondutância.

Figura 41 – Fotos da primeira versão do sintetizador com alterações.

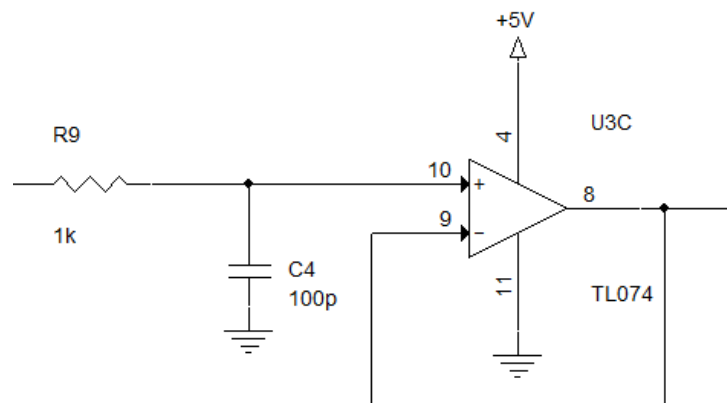


Fonte: Autoria Própria.

Além disso, foi identificado um problema de inversão de fase em um dos amplifica-

dores operacionais do EG. Como estes componentes estavam com seu pino de alimentação inferior na referência do circuito, como mostrado na figura 42, ao inserir uma entrada de 0V nos seus pinos de entrada, sua saída era grampeada no valor de alimentação superior, +9V. Este problema foi corrigido alimentando os amplificadores operacionais do módulo em +9V e -9V.

Figura 42 – Circuito elétrico do amplificador operacional no EG que causava inversão de fase.



Fonte: Autoria Própria.

Além destes problemas funcionais, diversas melhorias relativas aos *footprints* dos componentes, roteamento da placa e fixações mecânicas foram identificadas para a próxima revisão da placa.

4.3 Segundo protótipo e versão final do sintetizador

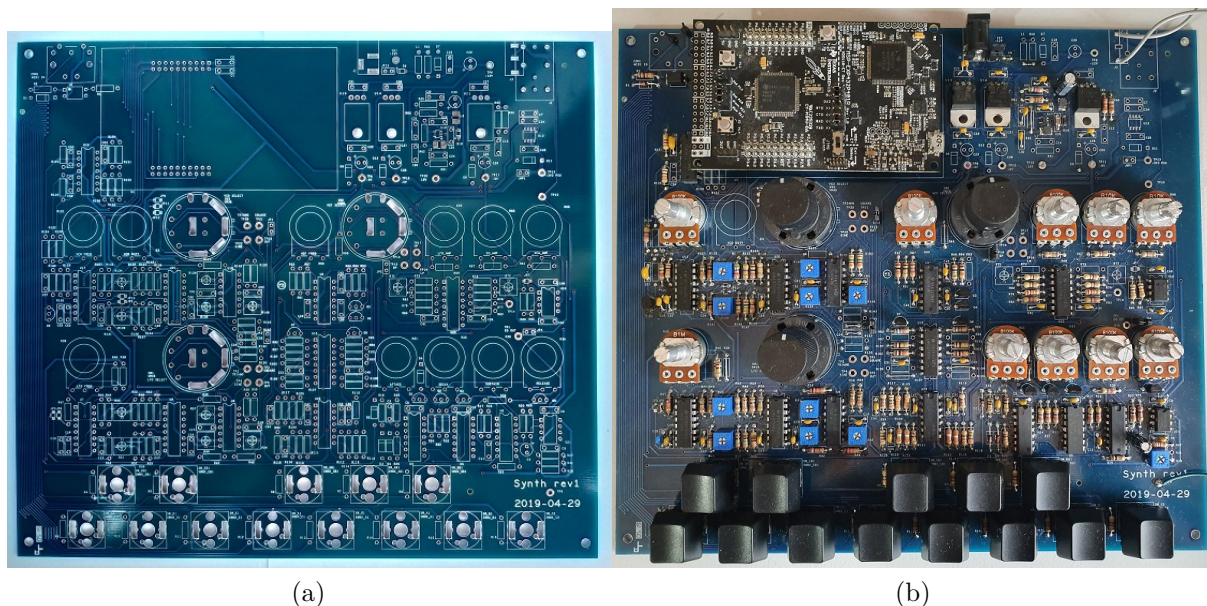
Após identificar e aplicar todas as correções necessárias, uma última revisão da placa, denominada “Synth rev1”, foi fabricada, como ilustrado na figura 43. Ademais, todos os componentes que fazem interface com o usuário, como potenciômetros, botões e chaves foram alterados a fim de facilitar a confecção da caixa e tampa do equipamento.

Os potenciômetros foram trocados por componentes condutores de plástico, que oferecem maior precisão e durabilidade em comparação às suas alternativas, como potenciômetros de carbono e fio (KAUTZOR, 2015).

4.3.1 Voltage Controlled Oscillator (VCO)

Como o sintetizador foi projetado com somente um VCO, não foi possível garantir sua operação em toda a faixa de frequência audível ao ser humano, de 20Hz a 20kHz, sem introduzir distorções nas formas de ondas geradas. Este problema foi amenizado com o

Figura 43 – Fotos da segunda versão do sintetizador



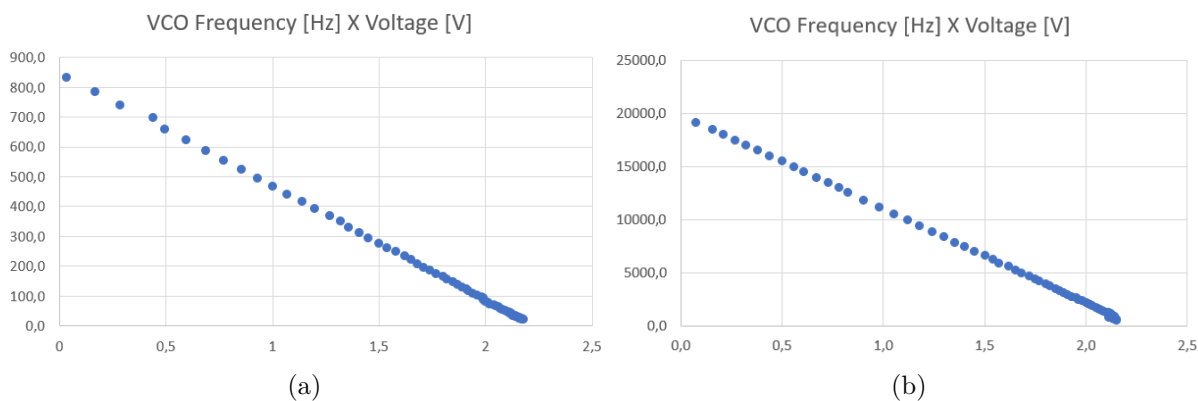
Fonte: Autoria Própria.

uso de dois capacitores no circuito do amplificador operacional integrador, que permitiu o funcionamento adequado do VCO entre 26Hz e 18,8kHz.

Como esta faixa de frequência abrange todas as notas disponíveis no protocolo MIDI, as ondas geradas pelo VCO foram consideradas satisfatórias. A adição de mais um capacitor permitiria a sua operação em maiores faixas de frequência, mas introduziria maior complexidade na implementação do *firmware*.

A relação entre tensão de entrada e frequência de oscilação é demonstrada pela figura 44.

Figura 44 – Relação entre tensão de entrada e frequência de oscilação do VCO para baixas frequências e altas frequências



Fonte: Autoria Própria.

O maior erro medido entre a frequência de oscilação do VCO e a frequência da nota musical foi de aproximadamente 1,7%. Tal erro ocorre devido à resolução do *duty cycle* do microcontrolador, que é de 0,1% do período do PWM.

4.3.2 Low Frequency Oscillator (LFO)

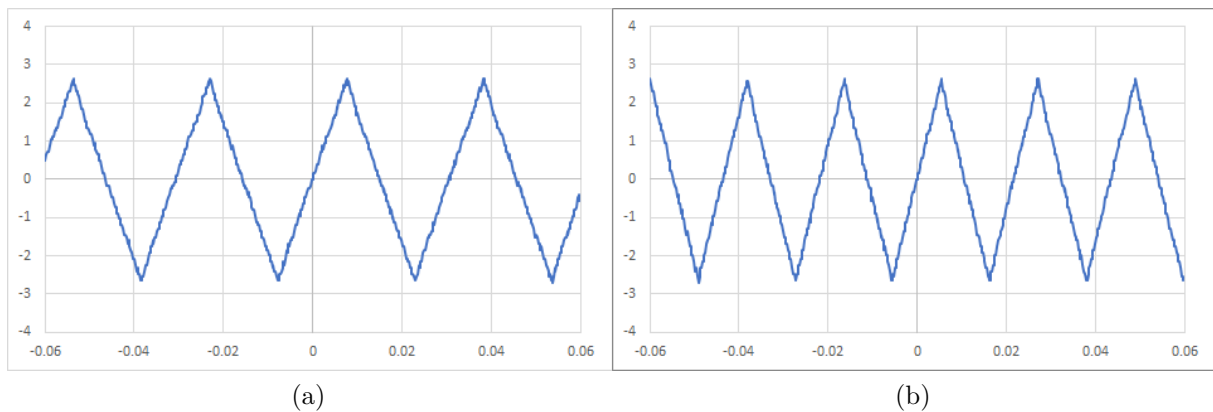
Como descrito no capítulo 3.4, o circuito do LFO é similar ao VCO, mas com valores de componentes alterados para permitir seu funcionamento nas frequências especificadas.

Com os valores de componentes corretamente ajustados, foi possível obter um LFO que operava em frequências entre 0,5Hz e 20Hz.

Como o amplificador de transcondutância tem seu ganho definido pela corrente em seu pino de I_{BIAS} e o LFO opera com ganhos muito baixos, esta corrente é dada na escala de microamperes, que dificulta o ajuste dos componentes deste circuito. Ademais, em frequências muito baixas a onda triangular é deformada, tomando forma do contorno de carga descarga do capacitor do circuito amplificador integrador.

A figura 45, 46 e 47, apresenta as formas de onda triangular, quadrada e senoidal, respectivamente, do LFO, em seus valores mínimo e máximo de frequência de oscilação.

Figura 45 – Onda triangular do LFO em seus valores mínimo e máximo de frequência de oscilação.



Fonte: Autoria Própria.

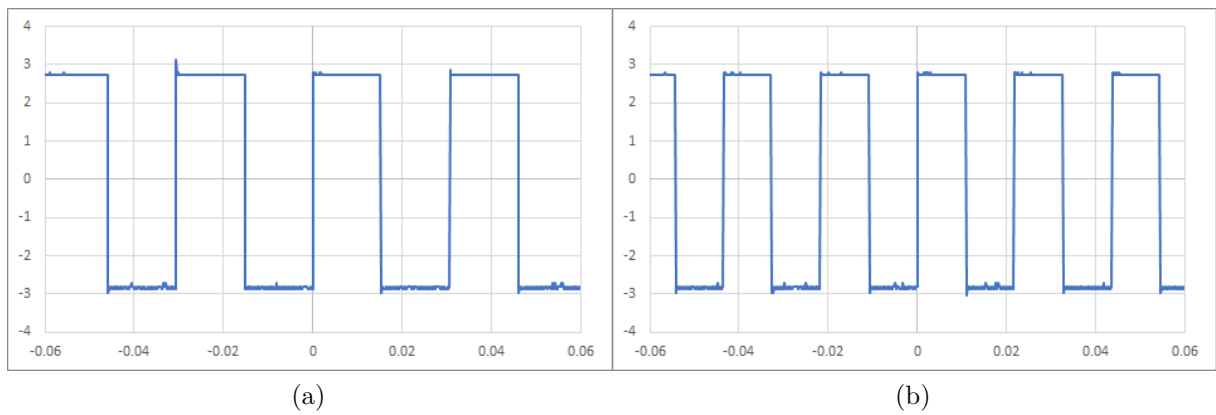
4.3.3 Voltage Controlled Filter (VCF)

Com o uso do *state variable filter*, foi possível implementar os filtros passa-baixas, passa-faixa e passa-altas com frequência de corte capaz de percorrer toda a faixa de frequência de operação do VCO.

A figura 48 apresenta a resposta em frequência do VCF.

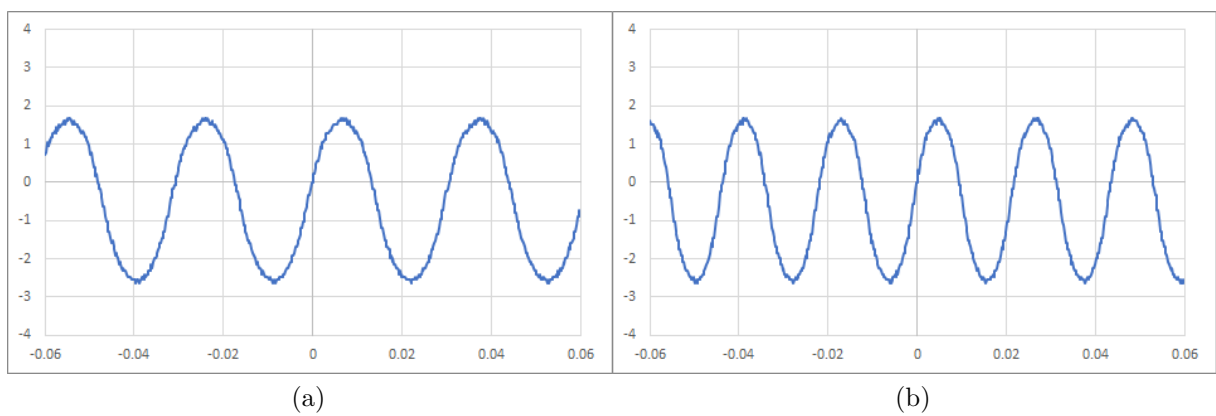
A figura 49 apresenta uma forma de onda quadrada filtrada por um filtro passa-altas e uma onda triangular filtrada por um filtro passa-baixas, respectivamente.

Figura 46 – Onda quadrada do LFO em seus valores mínimo e máximo de frequência de oscilação.



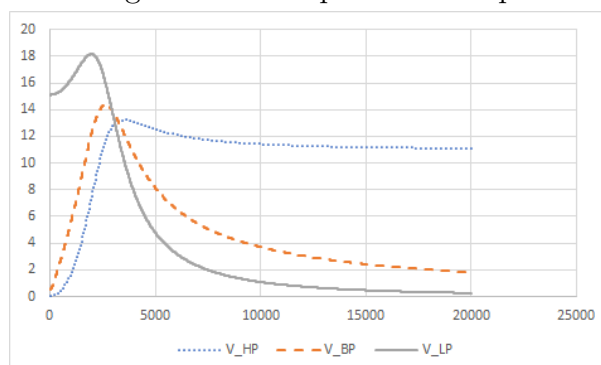
Fonte: Autoria Própria.

Figura 47 – Onda senoidal do LFO em seus valores mínimo e máximo de frequência de oscilação.



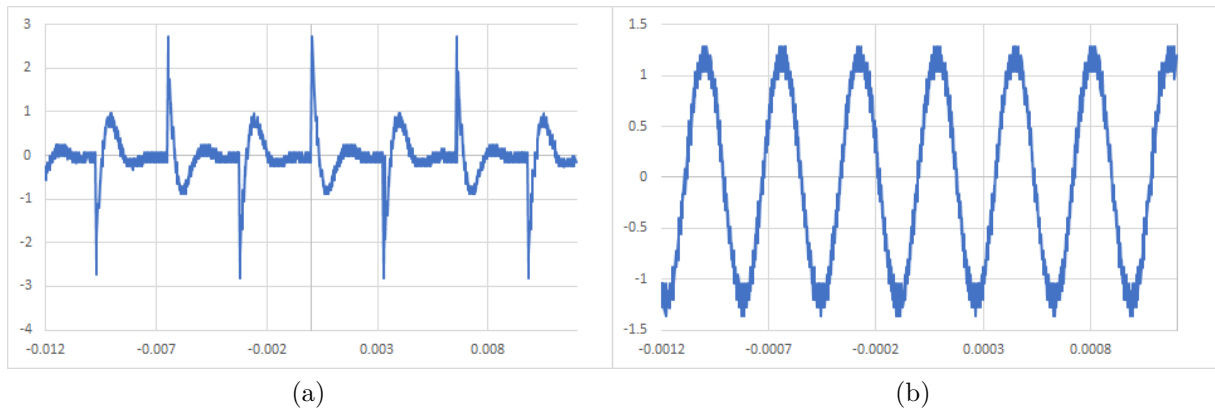
Fonte: Autoria Própria.

Figura 48 – Magnitude da resposta em frequência do VCF.



Fonte: Autoria Própria

Figura 49 – Exemplos de formas de onda filtradas pelo VCF.

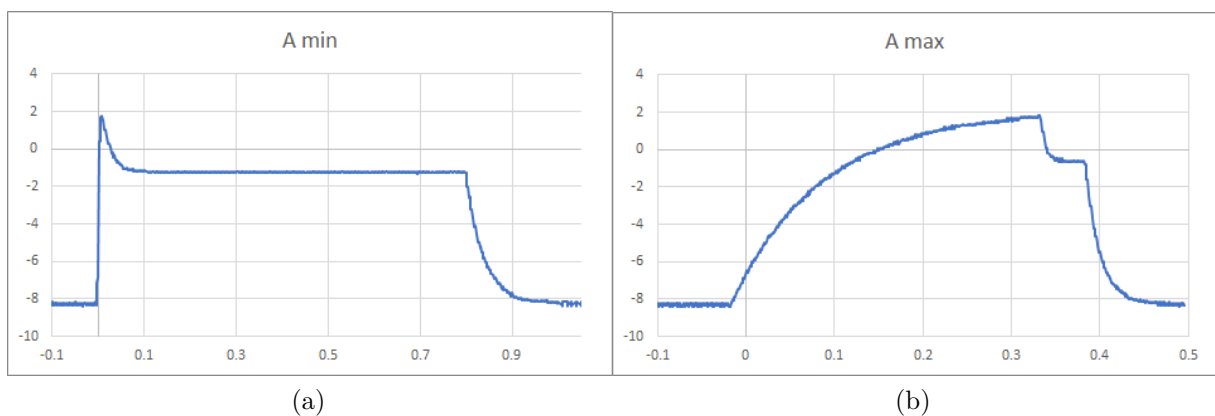


Fonte: Autoria Própria.

4.3.4 *Envelope Generator* (EG)

Neste tópico, são apresentadas as formas de onda da saída do EG com o mínimo e máximo de cada componente do ADSR. A figura 54 ilustra uma configuração com todos os potenciômetros em um valor médio.

Foi possível desenvolver o *Envelope Generator* como esperando, capaz de fornecer o controle independente de todos os seus componentes de *Attack*, *Decay*, *Sustain* e *Release*.

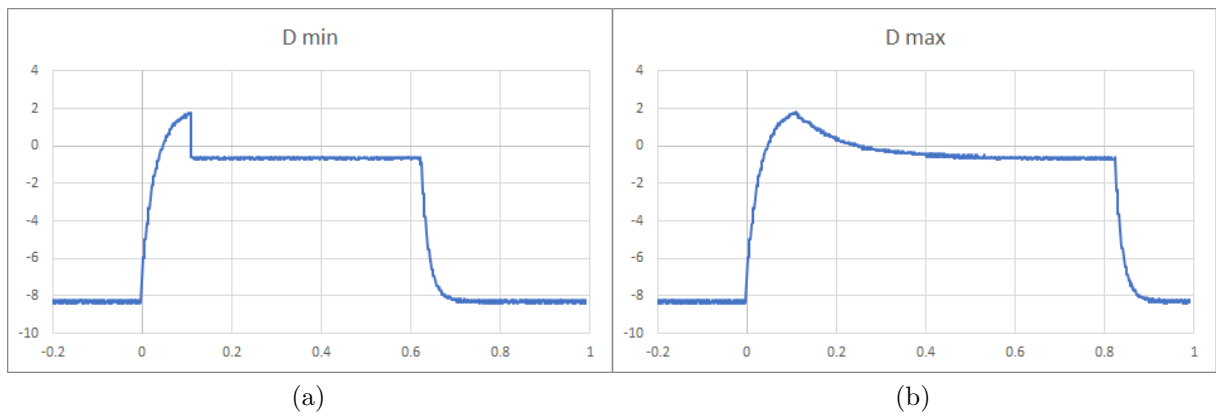
Figura 50 – Formas de onda do EG com sua componente de *Attack* ajustada em seu valor mínimo e máximo.

Fonte: Autoria Própria.

4.3.5 *Voltage Controlled Amplifier* (VCA)

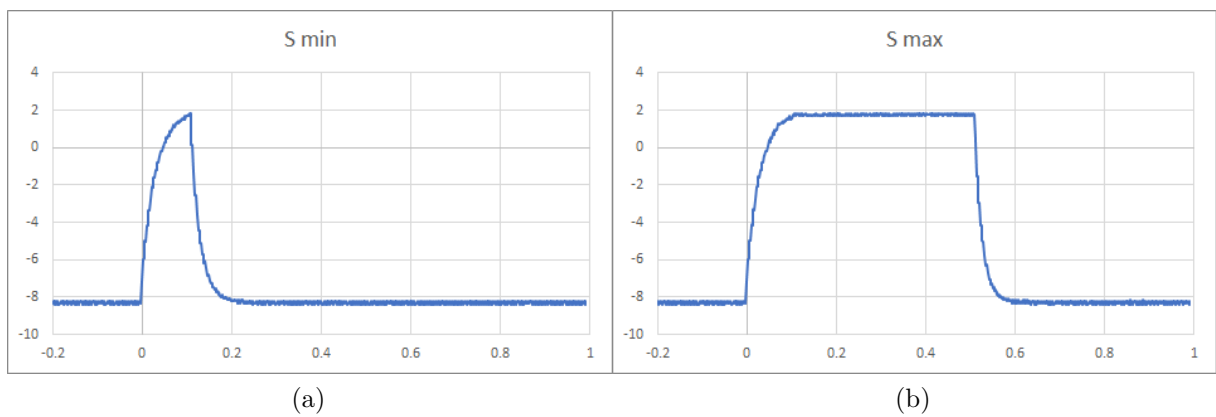
O VCA foi implementado e forneceu os resultados esperados, capaz de intergrar todas os módulos do sintetizador, e fornecer o controle de amplitude do sinal de saída.

Figura 51 – Formas de onda do EG com sua componente de *Decay* ajustada em seu valor mínimo e máximo.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 52 – Formas de onda do EG com sua componente de *Sustain* ajustada em seu valor mínimo e máximo.



Fonte: Autoria Própria.

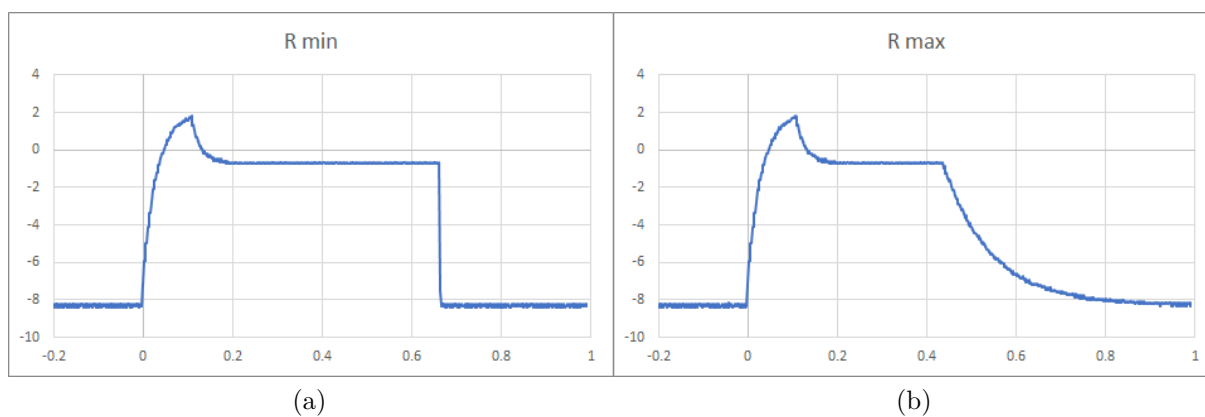
A figura 55 mostra a saída do VCA com uma onda senoidal do VCO modulada por um LFO, também senoidal. A frequência destes dois sinais foram escolhidos para facilitar sua visualização.

A figura 56 apresenta a saída do VCA com uma onda do VCO modulada por um ADSR.

4.4 Especificações do sintetizador de áudio projetado

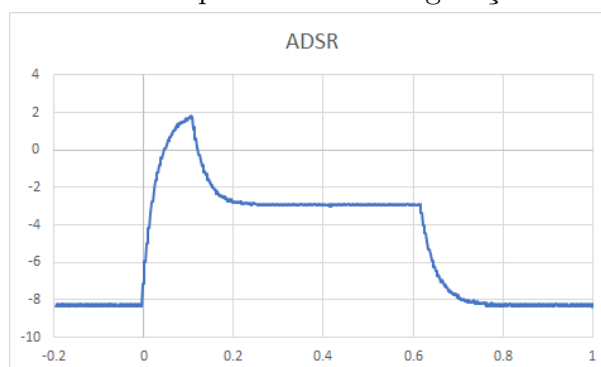
As especificações finais obtidas com os circuitos projetados estão concentradas no apêndice A na forma de especificações técnicas do sintetizador de áudio.

Figura 53 – Formas de onda do EG com sua componente de *Release* ajustada em seu valor mínimo e máximo.



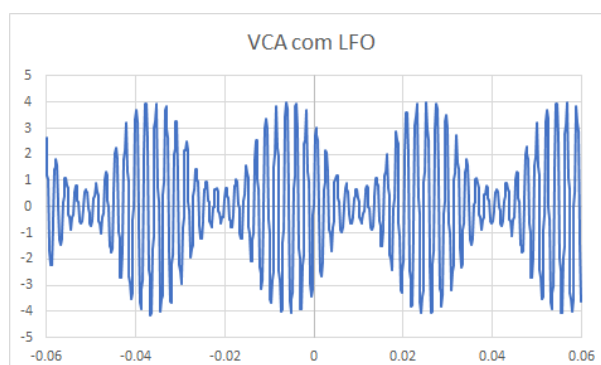
Fonte: Aatoria Própria.

Figura 54 – Exemplo de uma configuração do ADSR.



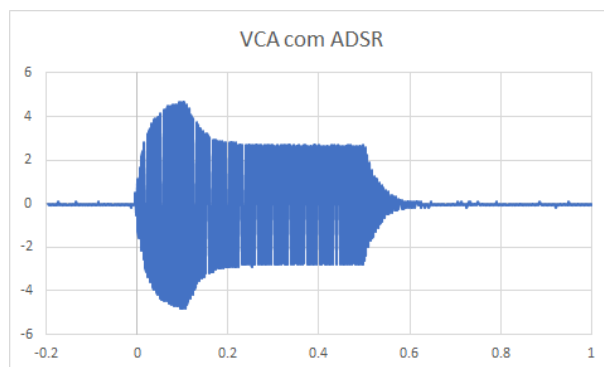
Fonte: Aatoria Própria

Figura 55 – VCO modulado com um LFO senoidal através do VCA.



Fonte: Aatoria Própria

Figura 56 – VCO modulado com um EG através do VCA.



Fonte: Autoria Própria

4.5 Comentários

Este capítulo apresentou os resultados do desenvolvimento do projeto. O próximo capítulo apresenta os comentários finais deste projeto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho, foi possível projetar, ensaiar e construir um sintetizador de áudio contendo os módulos VCO, LFO, VCF, EG, VCA e conversão de protocolo MIDI. O tratamento de sinais após a conversão MIDI foi feita com eletrônica analógica, cumprindo o objetivo geral proposto.

O circuito elétrico e *firmware* para conversão do protocolo MIDI foi implementado com sucesso, possibilitando a comunicação do sintetizador desenvolvido com equipamentos que contenham esta interface.

O VCO apresentou resultados satisfatórios. Apesar de não operar entre 20Hz e 20kHz, é capaz de gerar formas de ondas triangular, quadrada e senoidal para todas as frequências fornecidas pelo protocolo MIDI, de 27,5Hz a 12,543kHz, além de ser capaz de reproduzir sons de até 18kHz.

Esta limitação do VCO ocorrer devido aos valores de componentes dos circuitos osciladores. Como a frequência de oscilação do amplificador de transcondutância é definida por uma corrente na escala de microamperes, o circuito conectado á este pino é de difícil implementação e ajuste.

O LFO foi capaz de operar em toda a faixa de frequência proposta, entre 0,5Hz e 20Hz, nas formas de onda triangular, senoidal e quadrada.

O VCF foi implementado como planejado, possibilitando o controle de frequência de corte em toda a faixa de frequência do VCO para os três tipos de filtros, passa-baixas, passa-faixa e passa-altas.

O EG desenvolvido fornece controle aos estágios de *Attack*, *Decay*, *Sustain* e *Release*, de forma independente, assim como especificado nos objetivos específicos do projeto.

O VCA é capaz de integrar todas os sinais dos estágios anteriores e fornece controle da amplitude de tensão do sinal de saída do sintetizador de áudio.

Apesar de atingir um resultado satisfatório, cumprindo o objetivo geral proposto e grande parte dos objetivos específicos, diversas melhorias podem ser feitas em futuras versões do equipamento.

Primeiramente, para facilitar o retrabalho na placa de circuito impressos, foram usados componentes de montagem *through-hole*, já que são de mais fácil manuseio e é possível comprá-los em mercado nacional. Porém, como os circuitos foram corretamente ajustados na versão final do projeto, estes componentes podem ser substituídos por encapsulamentos menores, de montagem de superfície (SMD), reduzindo a área total da placa de circuito impresso e do invólucro mecânico, reduzindo o custo para a fabricação do equipamento.

Esta versão do sintetizador foi construída com somente um módulo de cada tipo,

resultando em um sintetizador monofônico. Porém, versões mais avançadas deste equipamento podem conter múltiplos osciladores, filtros, geradores de envelope e amplificadores, oferecendo maior versatilidade ao usuário e, até mesmo, possibilitando a construção de um sintetizador polifônico.

É possível, também, aumentar a complexidade de cada módulo, desenvolvendo osciladores para outras formas de onda e fornecendo maior controle ao usuário, como a regulação de outros parâmetros do filtro.

Como todas estas melhorias aumentariam a complexidade do equipamento e, conseqüentemente, o custo para a sua produção, estas versões mais avançadas poderiam se tornar novos produtos, voltados a produtores musicais com maior conhecimento e maior poder de compra.

Referências

- ANALOG DEVICES. **Lab Activity: Generating sine waves from triangle waves**. 2019. Last accessed 11 May 2019. Disponível em: <<https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/electronics-lab-12sg>>. Citado na página 19.
- CILETTI, E. **Level Headed, Nominal Level (explained) plus an SV-3700 modification**. 1998. Last accessed 03 July 2019. Disponível em: <http://www.tangible-technology.com/audiobasics/levels/level.html#SIDEBAR__calculating_dB_and_Power>. Citado na página 48.
- ELECTRONICS TUTORIALS. **State Variable Filters**. 2018. Last accessed 29 May 2019. Disponível em: <<https://www.electronics-tutorials.ws/filter/state-variable-filter.html>>. Citado na página 22.
- KAEWPOONSUK, A. et al. Ota-based sine-to-triangular wave converter. **Circuits Systems and Signal Processing**, p. 58–74, 2006. Citado na página 17.
- KAUTZOR, J. **How to choose the right potentiometer for reliable sensing**. 2015. Last accessed 03 July 2019. Disponível em: <<https://www.hoffmann-krippner.com/pdfs/choosing-the-right-potentiometer.pdf>>. Citado na página 51.
- MOOG MUSIC. **The Early Years of the Moog Synthesizer**. 2014. Last accessed 29 June 2019. Disponível em: <<https://www.moogmusic.com/news/early-years-moog-synthesizer>>. Citado na página 11.
- MOOG, R. A. Voltage-controlled electronic music modules. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 13, n. 3, p. 200–206, 1965. Citado na página 10.
- OLSON, H. F.; BELAR, H.; TIMMENS, J. Electronic music synthesis. **The Journal of the Acoustical Society of America**, The Journal of the Acoustical Society of America, v. 32, n. 3, p. 311–319, 1960. Citado na página 10.
- ON SEMICONDUCTORS. **LM337**. 2015. Last accessed 13 April 2019. Disponível em: <<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/LM337-D.PDF>>. Citado na página 34.
- PATIL, M. **BJT Differential Amplifier**. 2010. Last accessed 05 May 2019. Disponível em: <https://www.ee.iitb.ac.in/~sequel/ee230/mbpth_diff_1.pdf>. Citado na página 17.
- PEARSALL, K. **Effects Guide: Get to Know Tremolo**. 2019. Last accessed 03 July 2019. Disponível em: <<https://www.fender.com/articles/tech-talk/pedal-board-primer-get-to-know-tremolo>>. Citado na página 19.
- TEXAS INSTRUMENTS. **Op Amps For Everyone**. 2002. Last accessed 22 January 2019. Disponível em: <https://web.mit.edu/6.101/www/reference/op_amps_everyone.pdf>. Citado na página 41.
- TEXAS INSTRUMENTS. **Precise Tri-WaveGeneration**. 2002. Last accessed 05 May 2019. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/snoa854/snoa854.pdf>>. Citado na página 18.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM13700 Dual Operational Transconductance Amplifiers With Linearizing Diodes and Buffers**. 2015. Last accessed 29 June 2019. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM26111.4-MHz Cuk Converter**. 2015. Last accessed 15 April 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2611.pdf>>. Citado na página 33.

VAIL, M. **The Synthesizer: A Comprehensive Guide to Understanding, Programming, Playing, and Recording the Ultimate Electronic Music Instrument**. 1st. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2014. ISBN 0199334862, 9780199334865. Citado na página 23.

ZUMBAHLEN, H. **State Variable Filters**. 2012. Last accessed 05 May 2019. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-223.pdf>>. Citado na página 21.

Apêndices

APÊNDICE A – Especificações do sintetizador de áudio

Especificações do sintetizador de áudio:

- Conexões
 - Entrada MIDI
 - Saída de áudio mono (3,5mm)
 - Saída de áudio mono (6,35mm)
- Interface
 - 13 teclas (atuador Cherry MX Blue)
- Alimentação
 - Fonte externa de 12V DC 500mA
- Módulos
 - VCO
 - * Ondas quadrada, triangular e senoidal
 - * Frequência de operação de 27,5Hz a 18,8kHz
 - LFO
 - * Ondas quadrada, triangular e senoidal
 - * Frequência de operação de 8Hz a 26Hz
 - VCF
 - * Passa-baixas, passa-altas e passa-faixa
 - * Controle de frequência de corte
 - EG
 - * Controle dos estágios de *Attack*, *Decay*, *Release* e *Sustain*
 - VCA
 - * Controle de volume de 0 a 2Vp-p

APÊNDICE B – Circuito elétrico usado para a simulação do *Envelope Generator*

