

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Décio Pezzolo Neto

EFEITO ANALÓGICO COM ALTO GRAU DE REPETIBILIDADE

Florianópolis

2023

EFEITO ANALÓGICO COM ALTO GRAU DE REPETIBILIDADE

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Noceti Filho

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pezzolo, Décio Neto
EFEITO ANALÓGICO COM ALTO GRAU DE REPETIBILIDADE / Décio
Neto Pezzolo ; orientador, Sidnei Filho Noceti, 2023.
30 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Circuitos Integrados. 3.
THAT2180. 4. LFO. I. Noceti, Sidnei Filho. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

Décio Pezzolo Neto

EFEITO ANALÓGICO COM ALTO GRAU DE REPETIBILIDADE

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 14 de Junho de 2023.



Documento assinado digitalmente
Miguel Moreto
Data: 22/06/2023 09:14:31-0300
CPF: ***.850.100-**
Verifique as assinaturas em <https://o.ufsc.br>

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Sidnei Noceti Filho, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Walter P. Carpes Jr., Ph.D.
Université de Paris - SUD

Prof. Walter Antonio Gontijo, MSc
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais que me deram apoio pelo caminho da minha vida.

Agradeço aos meus amigos pelo apoio e camaradagem pelos caminhos da UFSC.

RESUMO

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi o projeto e a construção de um dispositivo eletrônico analógico que produzisse o efeito de um vibrato, efeito de som este que soa como um sinal que tem a frequência variável.

O dispositivo foi concebido como um sistema de 2 filtros passa-tudo controlados por 1 circuito oscilador de baixa frequência. O CI responsável pelo filtro foi o THAT2180, escolhido pelo alto grau de desempenho, com duas portas de controle, e por possuir um controle exponencial de ganho e uma atenuação com baixa distorção de sinal. Para simulação do funcionamento do dispositivo, foi utilizado o software LTspice, bastante versátil por oferecer uma extensa variedade de componentes em sua biblioteca.

Os componentes físicos foram montados inicialmente em protoboard e o dispositivo foi testado e modificado para se obter o resultado desejado. Uma placa dedicada de circuito impresso foi projetada utilizando-se o software Kicad, construída e os componentes finais montados sobre ela de forma definitiva.

Palavras-chave: LFO. All-Pass. VCA.

ABSTRACT

The objective of this end-of-course work was to design and build an analog electronic device that produces the effect of a vibrato, a sound effect that sounds like a regular oscillating which sounds like a signal that has variable frequency.

The device was designed as a system of 2 all-pass filters controlled by 1 low frequency oscillator circuit. The IC responsible for the filter was the THAT2180, chosen for its high degree of performance, with two control ports, and for having an exponential gain exponential gain control and an attenuation with low signal distortion. For simulation of the device's operation, we used the LTspice software, which is very versatile because it offers an extensive variety of components in its library.

The physical components were initially assembled on a protoboard and the device was tested and modified to obtain the desired result. A dedicated printed circuit board circuit board was designed using Kicad software, built, and the final components mounted on it permanently.

Keywords: LFO. All-Pass. VCA.

LISTA DE QUADROS

Figura 1 - (a) Diagrama de Blocos simplificado (b) Fase em um AP de segunda ordem	15
Figura 2 - Circuitos para obtenção de um AP (a) Circuito comumente usado (b) Circuito usado neste trabalho.	16
Figura 3 - Topologia do LFO	17
Figura 4 - Topologia do divisor de tensão	17
Figura 5 - Topologia do All-Pass usando THAT2180	18
Figura 6 - Topologia de dois All-Pass com defasagem de 180° em σ_0	19
Figura 7 - Gráfico da onda triangular e quadrada	21
Figura 8 - Gráfico da onda triangular após a resistência R4	22
Figura 9 - Comparação da onda LFO no valor mínimo e do All-Pass	25
Figura 10 - Comparação da onda LFO no valor máximo e do All-Pass	26
Figura 11 - Comparação do som de onda na entrada e saída	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da frequência calculada e simulada

24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LFO	Low Frequency Oscillator
VCA	Voltage Controlled Amplifier
JFET	Junction Field Effect Transistor
GND	Ground
AP	All-Pass
CCCS	Fonte de Corrente Controlada por Corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	LOW FREQUENCY OSCILLATOR.....	16
2.1	TOPOLOGIA DO LOW FREQUENCY OSCILLATOR.....	16
2.2	TOPOLOGIA DO VCA.....	18
3	DESENVOLVIMENTO.....	19
3.1	EQUAÇÃO DO LFO PARA VALORES DE FREQUÊNCIA DE 1Hz E 10Hz...19	
3.1.1	Valores para resistor e capacitor.....	20
3.1.1.1	<i>Grafico da simulação do LFO.....</i>	<i>21</i>
3.2	DEDUÇÃO DE UM ESTÁGIO ALL-PASS DO VCA 2180.....	22
3.2.1	Valores para resistor e capacitor.....	23
3.2.1.1	<i>Grafico de simulação do VCA.....</i>	<i>24</i>
4	RESULTADO DO EFEITO DE ONDA.....	26
5	CONCLUSÃO.....	28
	REFERÊNCIAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

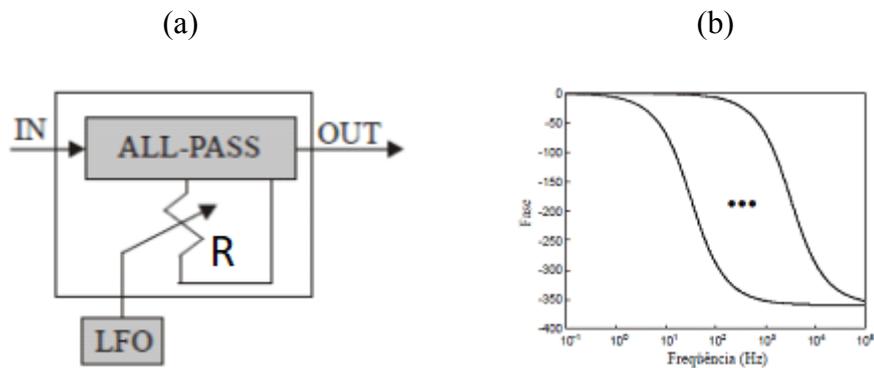
Nos dias de hoje, é recorrente a discussão entre as vantagens e desvantagens de circuitos analógicos em relação a circuitos digitais, com relação às suas sonoridades. Não é escopo deste TCC discutir este tema. Porém, pode-se dizer que diversas variáveis devem ser consideradas e, dentre elas, estão os níveis de ruído, a qualidade dos conversores A/D e D/A dos circuitos digitais e, por último, e talvez o mais importante, o gosto do ouvinte onde devem ser considerados efeitos psico-acústicos. Mas é inegável que para Hobistas adeptos ao “Faça Você Mesmo” (em inglês os circuitos DIY (Do It Yourself)), pedais analógicos de efeito para guitarra são preferidos por alguns músicos por serem relativamente mais fáceis de construir. Estes fazem uso de componentes de fácil entendimento, facilmente encontrados no mercado a um custo relativamente menor e os projetos dispensam conhecimentos em linguagem de programação.

Os circuitos de efeito modificam os sinais alterando características, tais como amplitude, fase, espectro de frequência ou uma combinação destes. A variação de um determinado parâmetro do circuito de efeito depende da variação da característica de um componente eletrônico como, por exemplo, Foto-Acopladores, JFETs e OTAs. Todos os componentes citados apresentam um grande problema referente a repetibilidade, ou seja, grandes variações de características de componente para componente (característica comum em dispositivos analógicos).

Neste TCC tem como objetivo o projeto de um Vibrato. O vibrato é um efeito sonoro musical produzido pela variação da altura de uma nota musical. É comum em instrumentos de corda, como violino, violoncelo e guitarra, onde o músico alterna rapidamente a pressão do dedo sobre a corda para produzir um som que varia levemente de tom para cima e para baixo em uma frequência regular. Isso cria uma sensação de vibração e emoção na nota, que pode adicionar um elemento emocional e expressivo à música. O vibrato é usado em muitos estilos musicais, desde o clássico até o rock e o blues.

A Figura 1 (a) mostra o Diagrama de Blocos simplificado de um Pedal de Efeito Vibrato e a Figura 1 (b) mostra a variação de fase em um All-Pass (AP) de segunda ordem (Dois AP em cascata).

Figura 1 - (a) Diagrama de Blocos simplificado (b) Fase em um AP de segunda ordem



Fonte: Análise de Pedais de Efeito Analógicos Chorus e Phaser

Neste TCC utiliza-se um componente com uma característica incomum entre componentes analógicos. É uma Fonte de Corrente Controlada por Corrente (CCCS) fabricada por uma empresa especializada em CI's de qualidade superior. Isto caracteriza o objetivo deste TCC que é projetar um circuito com alto grau de repetibilidade.

A Figura 2 (a) mostra a forma usual usada nos circuitos AP onde o resistor é obtido com o uso de Foto-Acopladores, JFETs e OTAs. A Função de Transferência (FT) é dada por:

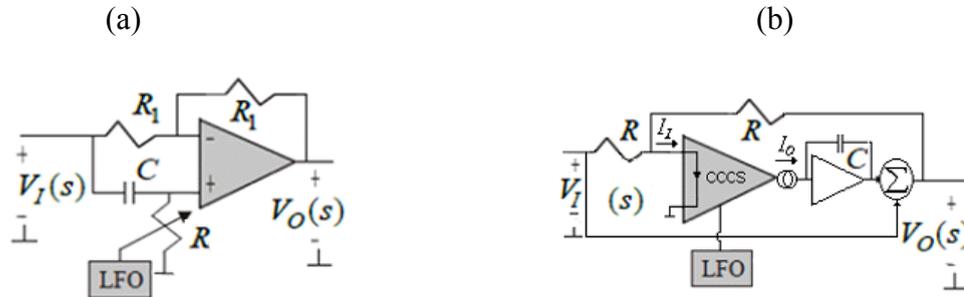
$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s - \sigma_0}{s + \sigma_0} \quad (1.1)$$

onde

$$\sigma_0 = \frac{1}{RC} \quad (1.2)$$

No AP de segunda ordem, na frequência σ_0 a fase roda 180°. Então, variando R, da Figura 1(a), sob o controle do Low Frequency Oscillator (LFO), varia-se a fase, que simula para os ouvidos, uma variação de frequência.

Figura 2 - Circuitos para obtenção de um AP (a) Circuito comumente usado (b) Circuito usado neste trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor

A função de transferência do circuito da Figura 2 (b) usado neste TCC é dada:

$$T(s) = \frac{V_o(s)}{V_I(s)} = \frac{[S-G/RC]}{[S+G/RC]} \quad (1.3)$$

onde

$$G = \frac{I_o(s)}{I_i(s)} \quad (1.4)$$

Sendo que G é o ganho de corrente CCCS

O sinal do LFO altera o parâmetro responsável pela característica de fase do AP. Um dos controles principais do Vibrato é o Rate, que altera a frequência de oscilação do LFO e, conseqüentemente, a velocidade com que as semitonações ocorrem. O outro é o controle Depth que altera a amplitude na saída do LFO e, conseqüentemente, o quanto varia o atraso proporcionado pelo AP, ocasionando variações na semitonação. Estes controles são ajustados ao gosto do músico. Efeitos interessantes de Vibrato são obtidos com frequências do LFO de 1 Hz a 10 Hz e dois estágios AP.

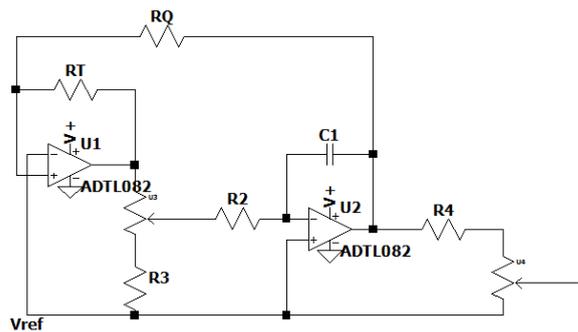
2 LOW FREQUENCY OSCILLATOR

2.1 TOPOLOGIA DO LOW FREQUENCY OSCILLATOR

Provavelmente o mais robusto (sobre o ponto de garantia de oscilação) oscilador seja obtido pelo laço de um biestável e de um integrador. São produzidas simultaneamente uma onda quadrada e uma onda triangular e esta última é comumente utilizada no controle dos diversos tipos de efeito. O funcionamento mais detalhado deste circuito pode ser encontrado em [4].

Para se obter um oscilador de onda triangular projetado com resistência e capacitor de baixos valores, utilizou-se um recurso que consiste em obter um resistor equivalente proporcional ao somatório de um produto de resistores (Ver (3.4)). Foi projetado um circuito que produzisse as formas de onda com uma fonte contínua de 9V (*Single Supply*). Foram utilizados dois potenciômetros para o ajuste do RATE e do DEEP, já discutidos anteriormente.

Figura 3 – Topologia do LFO.

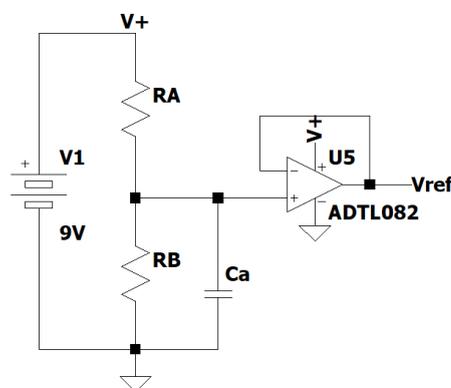


Fonte: Elaborada pelo autor

A imagem mostra um simples gerador de onda com saída triangular utilizando um amplificador operacional TL082, uma tensão de referência e um resistor $R4$ necessário para o atender as recomendações de operação do THAT2180.

A tensão de referência utilizada é a metade da tensão da bateria de 9V e foi obtida com um divisor de tensão e um buffer.

Figura 4 – Topologia do divisor de tensão.



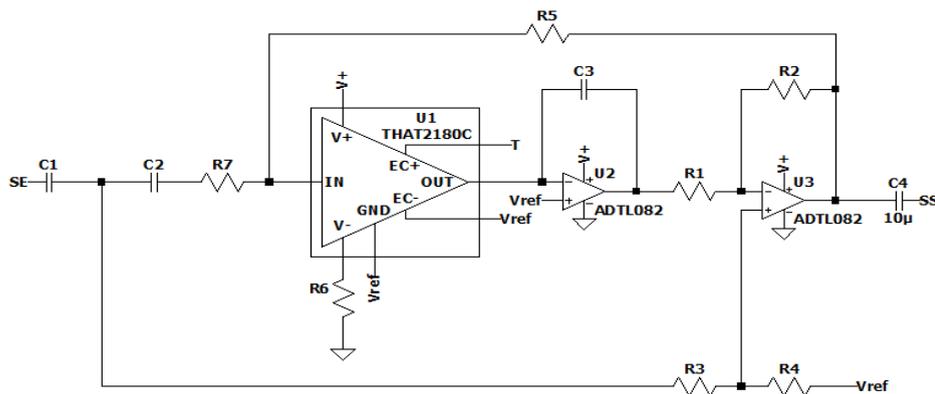
Fonte: Elaborada pelo autor

$RA = RB$ e o capacitor é um eletrolítico de $10\mu F$.

2.2 TOPOLOGIA DO VCA

O circuito do All-Pass foi baseado no circuito integrado THAT2180 [10], sendo necessário apenas adaptar certos aspectos do circuito de forma a torná-lo um vibrato e combiná-lo com um integrador e um amplificador diferencial para fazer com que o sinal de saída seja idêntico ao sinal de entrada e apresentando uma defasagem de 90° quando a frequência de entrada for igual a f_0 .

.Figura 5 – Topologia do All-Pass usando THAT2180.



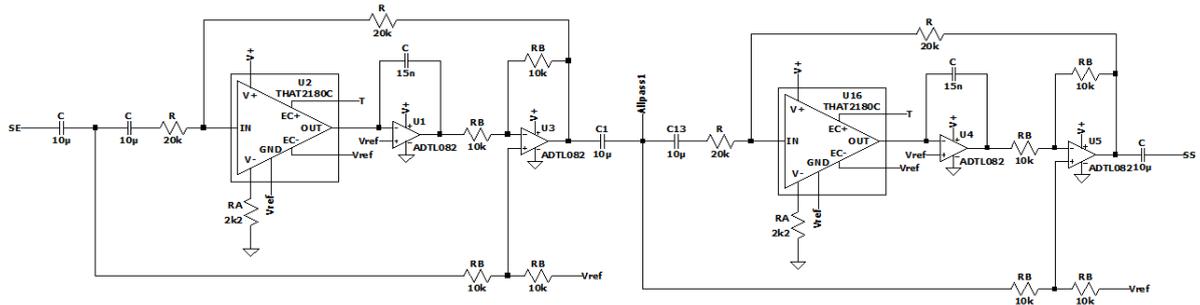
Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme a imagem, o circuito integrado THAT 2180 será controlado pela tensão de entrada em EC+, na figura como T , oriunda da saída do LFO, tendo como referência em GND a tensão de referência V_{ref} e alimentado pela mesma bateria de 9V. Os capacitores acoplados no sinal de entrada (SE) e no sinal de saída (SS) são para impedir o acoplamento DC.

Efeitos mais significativos de vibrato são obtidos quando um segundo AP é colocado em cascata de modo a obter uma fase de 180° em σ_0 .

O VCA terá como circuito completo a seguinte imagem:

Figura 6 – Topologia de dois All-Pass com defasagem de 180° em σ_0 .



Fonte: Elaborada pelo autor

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 PROJETO DO LFO PARA VALORES DE FREQUÊNCIA DE 1Hz E 10Hz

Observa-se no circuito que no momento da troca de estado do biestável tem-se:

$$\frac{Vq}{Rq} = - \frac{Vt}{Rt} \quad (3.1)$$

Então,

$$\frac{|Vq|}{|Vt|} = \frac{Rq}{Rt} \quad (3.2)$$

Para a equação da da frequência tem-se:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{Vq\sigma}{4Vt} = \frac{|Vq|}{|Vt|} \times \frac{1}{4RC} = \frac{Rq}{Rt} \times \frac{1}{4RC} \quad (3.3)$$

A resistência de curto-circuito é:

$$R_{sc} = \frac{RvR2 + RvR3 + R2R3}{R3} \quad (3.4)$$

Implementando a equação (2.4) na equação (2.3) obtém-se:

$$f = \frac{Rq}{Rt} \times \frac{1}{4 R_{sc} C} \quad (3.5)$$

Para garantir oscilação, o valor da resistência Rq deve ser maior que o valor da resistência Rt .

Como Rsc é proporcional à soma do produto de resistências, é possível calcular, pela equação (2.3), a frequência mínima e máxima do oscilador aplicando os valores máximos e mínimos do potenciômetro Rv , então:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{Rq}{Rt} \times \frac{1}{4 Rsc C} \quad \text{e} \quad f_{m\grave{m}n} = \frac{Rq}{Rt} \times \frac{1}{4 R2 C}$$

Para atender às condições máximas absolutas de trabalho do THAT 2180 a variação máxima do controle de tensão ΔEc deve ser de no máximo $\pm 1V$. Como a tensão de referência será $4,5V$, optou-se por variar a tensão como $4,8V \leq V \leq 4,2V$.

3.1.1 Cálculos dos Valores do resistor e do capacitor

Os valores de frequência mínima e máxima são $f_{m\grave{m}n} = 1Hz$ e $f_{m\acute{a}x} = 10Hz$, respectivamente.

Para se garantir oscilação tem-se que $Rq > Rt$. Então foram usados os valores de Rq e Rt como $100k\Omega$ e $47k\Omega$ respectivamente, e o valor do capacitor de $200nF$.

Quando o potenciômetro responsável pelo RATE, estiver em seu valor mínimo $Rv = 0$, tem-se que o valor de $Rsc = R2$, ou seja:

$$Rsc = R2 = \frac{Rq}{Rr} * \frac{1}{4Cf_{m\acute{a}x}} = 275,027k\Omega \quad (3.6)$$

$$Rsc = \frac{Rq}{Rr} * \frac{1}{4Cf_{m\grave{m}n}} = 275,275k\Omega \quad (3.7)$$

O valor comercial usado será $Rsc = 274k\Omega$.

Quando o potenciômetro Rr estiver em seu valor máximo, ou seja $Rr = 100k\Omega$.

Usando (2.4), junto com os valores encontrados em (2.6) e (2.7), pode-se encontrar o valor de $R3$.

$$2750,275 = \frac{27502,75 + 275R3 + 100R3}{R3}$$

$$R3 = 11,578k\Omega$$

O valor comercial usado foi $R3 = 11,5k\Omega$.

O resultado na saída do LFO é uma onda triangular de tensão $3,0V < V < 6,0V$. Como mencionado anteriormente a variação máxima de ΔEc deve ser de no máximo $\pm 1V$, então foi colocado um resistor para obter os níveis desejados.

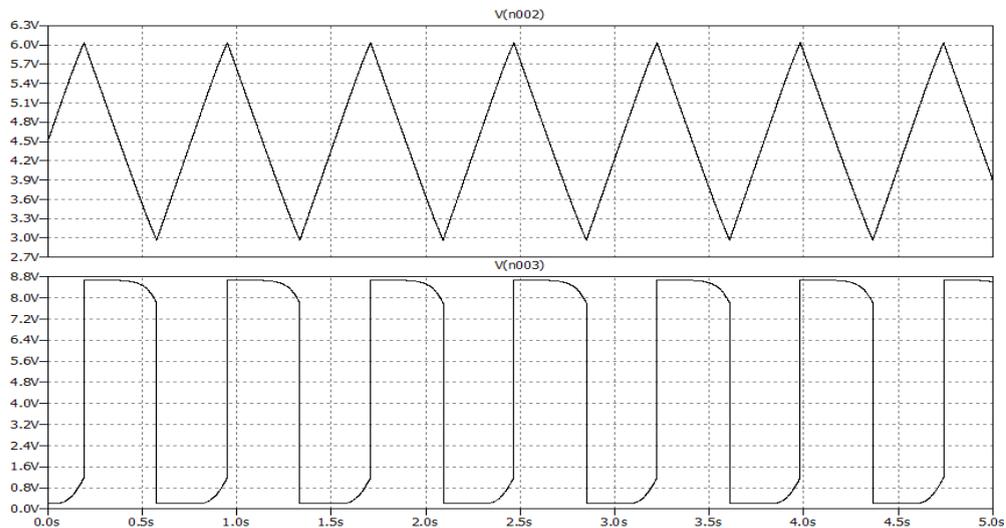
$$\frac{V_0 - V}{R} = \frac{V - V_{ref}}{R_d} \quad (3.8)$$

O valor deste resistor pode ser calculado considerando o valor máximo do potenciômetro DEEP $R_d = 10k\Omega$, a tensão de referencia $V_{ref} = 4,5V$, a tensão de saída do LFO $V_0 = 6,0V$ ou $V_b = 3,0V$ e respectivamente a saída da tensão desejada ajustada pela tensão de saída do LFO $V = 4,8V$ ou $V = 4,2V$.

$$R = 140k\Omega$$

3.1.1.1 Gráfico da simulação do LFO

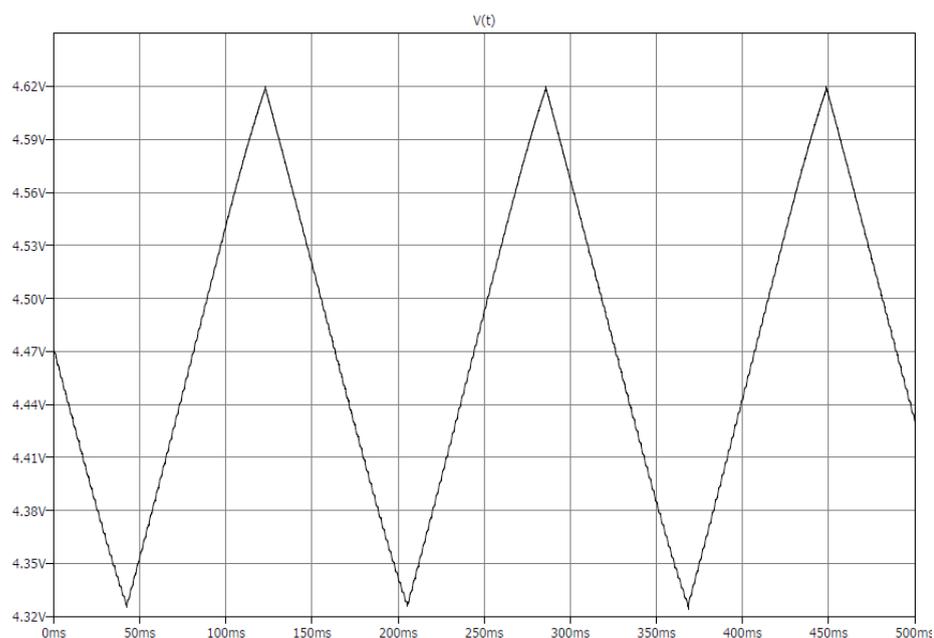
Figura 7 – Gráfico da onda triangular e quadrada.



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 7 mostra a saída do amplificador operacional que gera a onda triangular do LFO representado por V(n002) e o resultado da onda quadrada determinada por V(n003).

Figura 8 – Gráfico da onda triangular após a resistência R4.



Fonte: Elaborada pelo autor

O gráfico mostra a tensão de saída no ponto T.

3.2 DEDUÇÃO DE UM ESTÁGIO ALL-PASS DO VCA 2180

Para se verificar a funcionalidade do circuito, é preciso calcular e encontrar o valor da frequência σ_0 para equalizador de fase. A fórmula geral para equação de 1° ordem é dada por:

$$T_1(s) = \frac{s - \sigma_0}{s + \sigma_0} \quad (3.9)$$

Pela Lei das Malhas

$$V_0(s) = V_{IN}(s) - V_2(s) \quad (3.10)$$

sendo que:

$$V_2(s) = \frac{I(s)}{R} = \frac{I(s)G}{sC} \quad (3.11)$$

Onde R é a resistência R5 na Figura 5, e $R5 = R7$.

$$I(s) = \frac{V_{IN}(s)}{R} + \frac{V_0(s)}{R} \quad (3.12)$$

Substituindo a equação de (3.12) com (3.11) e isolando a equação em (3.10) tem-se:

$$V_{IN}(s) \left[1 - \frac{G}{RCS} \right] = V_0(s) \left[1 + \frac{G}{RCS} \right] \quad (3.13)$$

Então:

$$\frac{V_0(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{[S-G/RC]}{[S+G/RC]} \quad (3.14)$$

As características de ganho de controle do THAT 2180 é dada pela equação:

$$G = \frac{Ec_+ - Ec_-}{(0,0061)}$$

Como apenas uma das entradas de controle será utilizada enquanto a outra será colocada para Vref então:

$$G_{dB} = \frac{Ec}{0,0061} \rightarrow G_{dB} = 20 \log(G) \rightarrow G = 10^{\frac{G_{dB}}{20}} \quad (3.15)$$

3.2.1 Valores do resistor e do capacitor

Para encontrar os valores do resistor e do capacitor nas ligações do THAT2180 foram seguidas as recomendações no datasheet do produto. Neste caso foram usados, como base, resistência e capacitor $R = 20k\Omega$ e $C = 15 nF$, respectivamente.

A fim de se analisar o efeito do vibrato, foi feita uma simulação seguindo os seguintes procedimentos. O valor de controle em T colocado em uma tensão constante. Utilizando a equação (3.14) foi encontrado o valor de ganho. Em seguida foi usado o valor de ganho encontrado para calcular o valor da frequência f_0 usando a equação (3.5).

O resultado então foi comparado com os valores simulados.

Tabela 1 - Comparação da frequência calculada e simulada

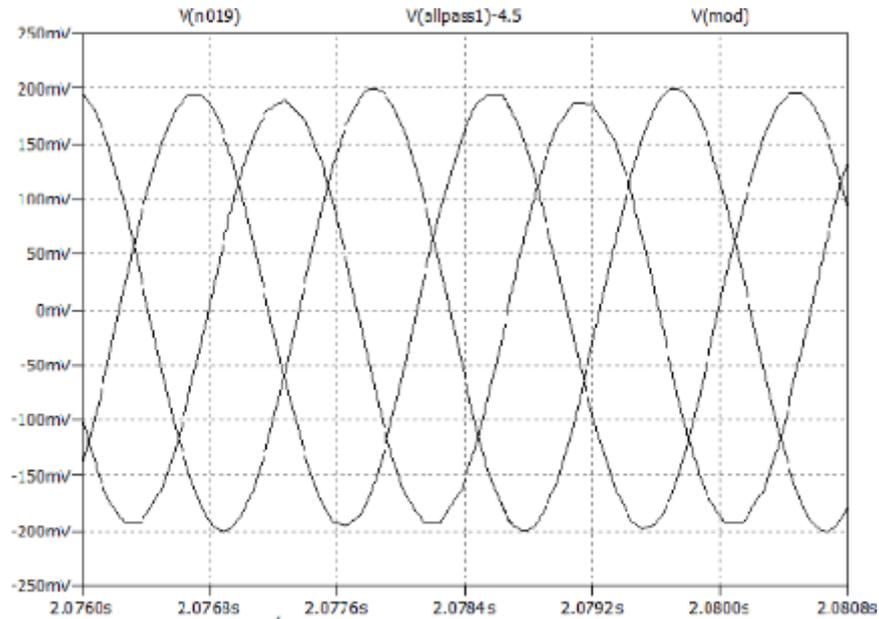
Vc(mV)	$G = 10^{(V_c/0,0062)/20}$	$\frac{G}{RC}$	$f_0 = \frac{G}{(2\pi RC)}$	f_{0S} (simulação)	$\frac{f_0}{f_{0S}}$
0	1	3333,333333	530,7855626	530	1,001482194
50	2,569425711	8564,75237	1363,814072	1364	0,9998636889
100	6,601948484	22006,49495	3504,218941	3500	1,001205412
150	16,96321618	56544,05392	9003,830243	9500	0,9477716045
200	43,58572379	145285,746	23134,67292	23000	1,005855344
250	111,9902793	373300,9311	59442,82342	30000	1,981427447
300	287,7507031	959169,0103	152733,9188	121112	1,261096496
-50	0,3891920267	1297,306756	206,5775089	206	1,002803441
-100	0,1514704337	504,9014456	80,39831936	80	1,004978992
-150	0,05895108507	196,5036169	31,29038486	31,3	0,999692807
-200	0,02294329228	76,47764093	12,1779683	13	0,9367667924
-250	0,008929346422	29,76448807	4,739568164	6	0,7899280274
-300	0,003475230431	11,58410144	1,84460214	2	0,9223010699

Observa-se que os valores calculados e de simulação são bem próximos, comprovando o funcionamento do circuito conforme projetado.

3.2.1.1 Gráfico de simulação do VCA

Tendo-se já os valores de capacitor e resistores, foi então feito o teste com o sinal de entrada como uma onda senoidal de amplitude de 200mV e com frequência de 530Hz. Verificando na Tabela 1 a defasagem dos sinais será gerada na tensão Vc(mV) igual a zero, ou seja, o valor da tensão em $V(t)$ deverá ser igual a tensão de referência.

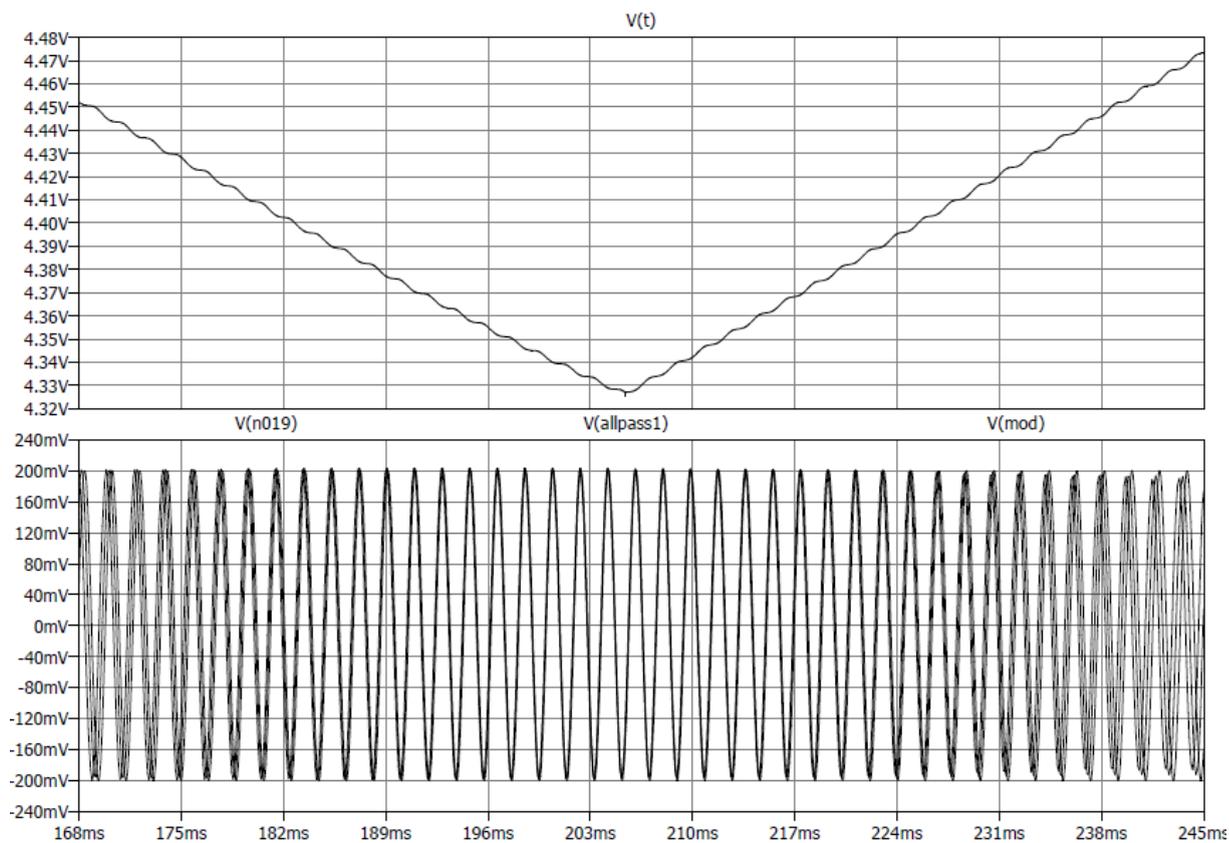
Figura 9 – Comparação da onda LFO e do All-Pass próxima à tensão de referência.



Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se notar que, na Figura 9, a relação da tensão inserida no vibrato $V(n019)$ e a tensão de saída do primeiro All-Pass $V(allpass1)$ tem uma defasagem de 90° , assim como na relação entre o $V(allpass)$ e $V(mod)$. Assim pode-se concluir que a relação entre $V(n019)$ e $V(mod)$ é de 180° .

Figura 10 – Comparação da onda LFO e do All-Pass fora da tensão de referência.



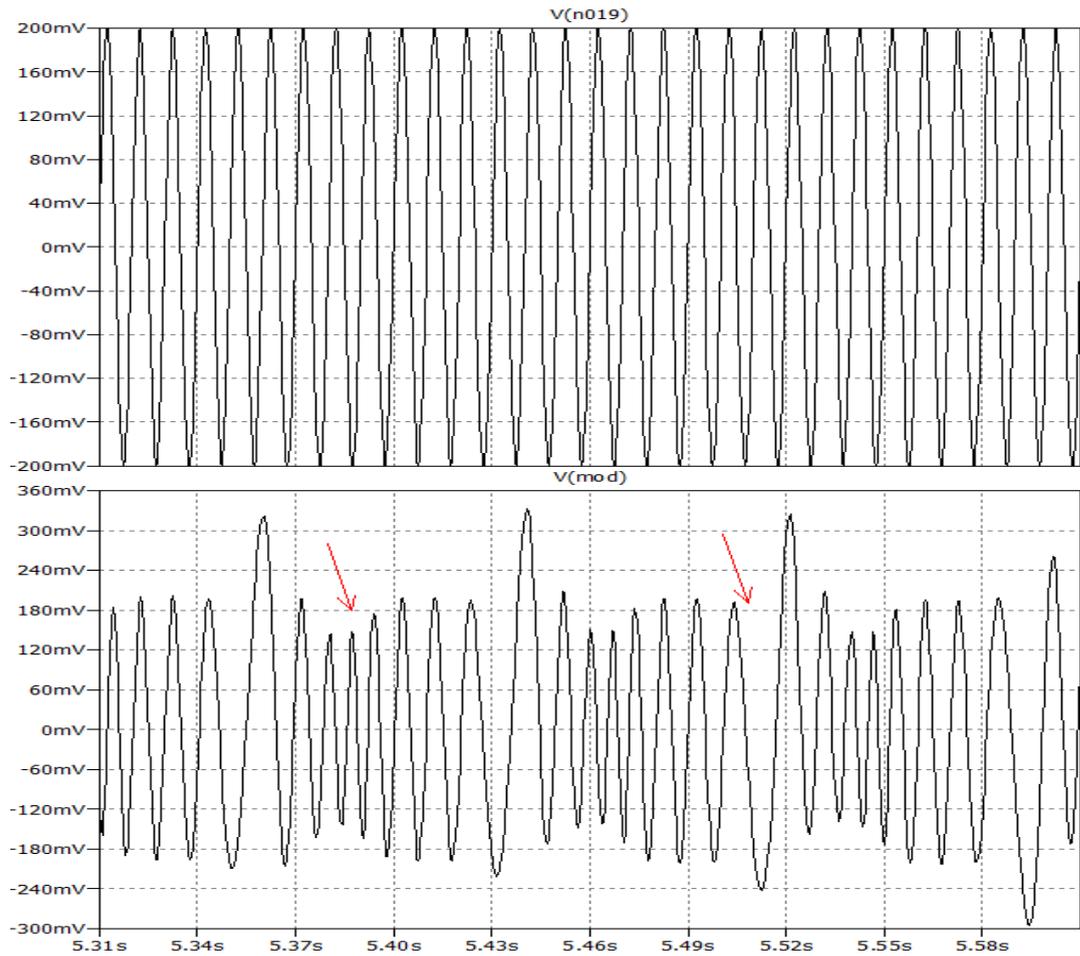
Fonte: Elaborada pelo autor

A figura mostra que quando a tensão $V(t)$ do LFO está em um valor fora da tensão de referência, pode-se notar que, fora do valor de frequência calculado na Tabela 1, tanto o sinal de entrada $V(n019)$, quanto o sinal do All-Pass $V(allpass1)$ e o sinal de saída do vibrato $V(mod)$ estão em fase.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Com o circuito já preparado para testar, foi usado o programa *ocenaudio*, um software que gera um arquivo de som tipo .wave. Em seguida, este arquivo foi implementado no circuito de simulação do vibrato para ver o efeito na saída do circuito.

Figura 11 - Comparação do som de onda na entrada e saída.



Fonte: Elaborada pelo autor

O gráfico mostra o resultado na saída do vibrato, denotado pelo $V(mod)$, a partir da onda na entrada, a qual foi gerada pelo microfone, denotada como $V(n019)$.

5 CONCLUSÃO

O efeito do vibrato gerado pelo dispositivo foi o esperado. O resultado da saída do som, tanto na simulação do circuito no software *ocenaudio*, quanto no funcionamento real do circuito impresso, foi a geração de um efeito aparente de variação da frequência. Variando os potenciômetros, pode-se notar a presença do efeito do vibrato na variação da frequência dessa pulsação.

REFERÊNCIAS

- [1] ALLAERT, Jeroen. Designing Voltage Controller Filters for Synthesizers with the SSI2164. SSI2164-Optimized Building Blocks, pg 6.
- [2] BORTONI, Rosalfonso; NOCETI, Sidnei Filho. Analog Audio Effects Course. 1.2. Vibrato pg 2.
- [3] HERBERT, Gary K.; FLORU, Fred. Digitally-Controllable Audio Filters and Equalizers. First order filters and equalizers, pg 198.
- [4] NOCETI, Sidnei Filho. Efeito de áudio digitais e analógicos. Controle de ganho, pg 16. Efeitos digitais, Vibrato, pg 56.
- [5] NOCETI, Sidnei Filho; COSTA NETO, Edilberto; C.KULEVICZ, Gabriel. Otimização do uso de Foto-Acopladores Artesanais para o Efeito Tremolo. Disponível em <<https://www.linse.ufsc.br/~sidnei/artigos.php>>
- [6] NOCETI, Sidnei Filho; COSTA NETO, Edilberto; C.KULEVICZ, Gabriel. Análise de Pedais de Efeito Analógicos Chorus e Phaser. Disponível em <<https://www.linse.ufsc.br/~sidnei/artigos.php>>
- [7] NOCETI, Sidnei Filho; GRIEP, Bruno. Implementação de um Oitavador com Baixa Distorção. Disponível em <<https://www.linse.ufsc.br/~sidnei/artigos.php>>
- [8] NOCETI, Sidnei Filho; ANTONIO GONTIJO, Walter. Implementações de Efeitos de Audio utilizando Arduino DUE e PedalSHIELD. Disponível em <<https://www.linse.ufsc.br/~sidnei/artigos.php>>
- [9] SCAVONE P., Gary. Delay Lines. Delay Line interpolation: Allpass Interpolation. Disponível em <<https://www.music.mcgill.ca/~gary/618/week1/node19.html>>
- [10] http://thatcorp.com/datashts/THAT_2180_Datasheet
- [11] <https://datasheetspdf.com/pdf/321275/NationalSemiconductor/TL082/1>