



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia- FT
Engenharia Elétrica**

PROJETO DE UM COMPRESSOR VALVULADO

Renan Raeder Ribeiro

**Brasília, DF
2019**



RENAN RAEDER RIBEIRO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO DE UM COMPRESSOR VALVULADO

Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica como requisito
parcial para obtenção de Bacharel
em Engenharia Elétrica
Orientador: Dr. Alexandre Ricardo
Soares Romariz

**Brasília, DF
2019**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Sobrenome do Autor, Nome Autor.

Título da Monografia: Subtítulo / Nome do Autor (em ordem normal). Brasília: UnB, 2013. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2013. Orientação: Nome do Orientador.

1. Palavra Chave. 2. Palavra chave. 3. Palavra chave3 I.
Sobrenome do orientador, Nome do orientador. II. Título.

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.

**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE
GRADUAÇÃO FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT**

Renan Raeder Ribeiro

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação dd/mm/aa) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo:

Prof: Dr. Alexandre Ricardo Soares Romariz, UnB
Orientador

Prof:Dr Daniel Chaves Café, UnB
Membro Convidado

Prof: Ricardo Zelenovsky, UnB
Membro Convidado

Brasília, DF
2019

Dedico este projeto à minha família e aos meus amigos que sempre estiveram presentes direta ou indiretamente em todos os momentos de minha formação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Romes e Vanessa, que sempre foram o sustento e fomentadores da minha criação.

À minha irmã, Ingrid, que sempre aguentou o irmão implicante.

À minha namorada, Brenda, que me ajudou nos bons e maus momentos.

Aos meus amigos que estiveram presentes quando necessário, em especial Marcos Starling pela ajuda com o fornecimento da placa de áudio usada para análises.

Ao querido Felipe Lisciel cujo curso de eletrônica em válvulas possibilitou o conhecimento para realização deste trabalho de conclusão de curso.

À cachorrinha de nossa família, que aumenta o astral de qualquer um.

Hoje tem gol do Gabigol!!!

SRN

Renan Raeder Ribeiro

*A esperança tem asas. Faz a alma voar.
Canta a melodia mesmo sem saber a
letra. E nunca desiste. Nunca.*

Emily Dickinson

RESUMO

Atualmente, o cenário musical abrange eficientes formas e procedimentos de tratamentos de áudio. Os avanços da tecnologia digital permitiram a democratização dos meios necessários para tratamento do áudio, assim como possibilitaram novas sonoridades. Dentro desse contexto, nasce a ideia de trazer à tona as sonoridades dos compressores de áudio que marcaram época nas décadas de 60 e 70 do século passado. O desenvolvimento do circuito em questão passou pela análise dos circuitos famosos na literatura da área, sempre de forma a adaptar a um resultado agradável ao ouvido humano. Os resultados visam à comparação entre os *plugins* emuladores dos circuitos antigos e o presente circuito desenvolvido. Os resultados foram testados nos *softwares* Pro-tools, Ableton Live e Logic Pro para avaliação do espectro de frequências e o comportamento do sinal comprimido no domínio do tempo. O resultado final gerou um circuito capaz de recuperar a sonoridade das gravações analógicas dentro da etapa de compressão dos sinais de áudio.

Palavras-chave: Compressor Valvulado. Válvula Triodo. Sonoridade. Compressão. Analógico.

ABSTRACT

Today, the music scene encompasses efficient forms and procedures of audio treatments. Advances in digital technology have allowed for the democratization of the means necessary for audio treatment, as well as new sounds. Within this context, the idea is born to bring out the sounds of the audio compressors typical of the 60s and 70s of the last century. The development of the circuit in question went through the analysis of the famous circuits in the literature of the area, always in order to adapt a pleasant result to the human ear. The results aim to compare the emulators plugins of the old circuits and the present developed circuit. The results were tested on Pro-tools, Ableton Live and Logic Pro *software* for frequency spectrum evaluation and time domain compressed signal behavior. The end result generated a circuit capable of recovering the sound of analog recordings within the compression step of the audio signals.

Keywords: Vacuum Tube Compressor. Triode Valve. Loudness. Compression. Analog

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Válvula 12AT7.....	18
Figura 1.2	Válvula 12AX7.....	18
Figura 2.1	Válvula diodo.....	20
Figura 2.2	Válvula triodo.....	20
Figura 2.3	Modelo de transformador.....	22
Figura 2.4	Esquemático de amplificação básica.....	24
Figura 2.5	Curva de operação de uma válvula triodo.....	24
Figura 2.6	Transformador de saída em <i>push-pull</i>	27
Figura 2.7	Transformador de saída em <i>single-end</i>	27
Figura 2.8	Realimentação negativa.....	32
Figura 2.9	Circuito de <i>sidechain</i> (representação do bloco β).....	33
Figura 2.10	Diodo ideal: Símbolo diodo; (b) Circuito simples com diodo.....	34
Figura 2.11	Curva característica i-v de um diodo.....	35
Figura 2.12	Circuito básico de retificação.....	35
Figura 2.13	Onda Senoidal: (a) Corrente Alternada; (b) Tensão de saída retificada.....	36
Figura 2.14	Glue Compressor.....	36
Figura 2.15	Sinal de <i>Open Hat</i> : (a) Não comprimido; (b) Comprimido.....	37
Figura 2.16	Curvas de Fletcher-Munson.....	38

Figura 2.17	Símbolo de circuito para um diodo Zener.....	39
Figura 2.18	Modelo do diodo Zener.....	40
Figura 2.19	Circuito regulador de tensão.....	40
Figura 2.20	Resposta em frequência de um Filtro passa-baixas (RC).....	42
Figura 2.21	Circuito passa-baixas.....	43
Figura 2.22	Circuito passa-altas.....	43
Figura 2.23	Caso idealizado de THD.....	44
Figura 3.1	Curva de corrente x tensão de ânodo de 12AX7.....	49
Figura 3.2	Curva de corrente x tensão de ânodo de 12AT7.....	50
Figura 3.3	Montagem inicial.....	51
Figura 3.4	Montagem finalizada.....	52
Figura 4.1	Circuito de alimentação e polarização.....	53
Figura 4.2	Resultados dos multímetros virtuais.....	54
Figura 4.3	Parâmetro 'GAIN' do compressor valvulado.....	55
Figura 4.4	Estágio de compressão.....	56
Figura 4.5	Arranjo para resistência de cátodo da 12AX7.....	58
Figura 4.6	Arranjo para resistência de cátodo da 12AT7.....	59
Figura 4.7	Tensão de grade x corrente de ânodo.....	60
Figura 4.8	Estágio de amplificação do sinal.....	61
Figura 4.9	Circuito de detector.....	62

Figura 5.1	Formato de onda de um trecho do vocal sem uso do compressor.....	64
Figura 5.2	Formato de onda de um trecho do vocal com uso do compressor.....	64
Figura 5.3	Medição de RMS: (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão.....	65
Figura 5.4	Formato de onda de um trecho da caixa de bateria sem uso do compressor.....	66
Figura 5.5	Formato de onda de um trecho da caixa de bateria com uso do compressor.....	66
Figura 5.6	Medição de RMS: (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão.....	67
Figura 5.7	Espectro de frequências da voz antes da compressão.....	67
Figura 5.8	Espectro de frequências da voz depois da compressão.....	68
Figura 5.9	Formato de onda de vocal, passando pelo <i>Plugin</i> Puigchild 660, sem uso do compressor.....	69
Figura 5.10	Formato de onda de vocal, passando pelo <i>Plugin</i> Puigchild 660, com uso do compressor.....	69
Figura 5.11	Medição de RMS, com <i>Plugin</i> Puigchild 660, aplicado ao vocal: (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão.....	70
Figura 5.12	Formato de onda de caixa de bateria, passando pelo <i>Plugin</i> Puigchild 660, sem uso do compressor.....	71
Figura 5.13	Formato de onda de caixa de bateria, passando pelo <i>Plugin</i> Puigchild 660, com uso do compressor.....	71
Figura 5.14	Medição de RMS, com <i>Plugin</i> Puigchild 660, aplicado à bateria: (a) Antes da Compressão; (b) Depois da compressão.....	72
Figura 5.15	Espectro de frequências da voz, passando pelo <i>Plugin</i> Puigchild 660, antes da compressão.....	73

Figura 5.16	Espectro de frequências da voz, passando pelo <i>Plugin</i> Puigchild 660, depois da compressão.....	73
Figura 5.17	Formato de onda de vocal, passando pelo CLA2A da Waves, sem uso do compressor.....	74
Figura 5.18	Formato de onda de vocal, passando pelo CLA2A da Waves, com uso do compressor.....	74
Figura 5.19	Medição de RMS, com <i>Plugin</i> CLA2A da Waves, aplicado ao vocal: (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão.....	75
Figura 5.20	Formato de onda de caixa de bateria, passando pelo <i>Plugin</i> CLA2A da Waves, sem uso do compressor.....	76
Figura 5.21	Formato de onda de caixa de bateria, passando pelo <i>Plugin</i> CLA2A da Waves, com uso do compressor.....	76
Figura 5.22	Medição de RMS, com <i>Plugin</i> CLA2A da Waves, aplicado à caixa de bateria: (a) Antes da Compressão; (b) Depois da compressão.....	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2 MOTIVAÇÃO.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 VÁLVULA TRIODO.....	20
2.2 TRANSFORMADORES.....	22
2.3 AMPLIFICAÇÃO BÁSICA.....	23
2.4 CLASSES DE AMPLIFICAÇÃO.....	26
2.4.1 Classe A.....	26
2.4.2 Classe B.....	28
2.4.3 Classe AB.....	29
2.5 MILLER EFFECT.....	29
2.6 RETROALIMENTAÇÃO NEGATIVA.....	31
2.7 SIDECHAIN.....	32
2.8 DIODOS.....	33
2.9 COMPRESSÃO.....	36
2.10 DIODO ZENER.....	39
2.11 FILTROS PASSIVOS.....	41
2.12 DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL.....	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO.....	46
3.2 CIRCUITO DE COMPRESSÃO.....	46
3.3 CIRCUITO DE AMPLIFICAÇÃO.....	46
3.4 CIRCUITO DE DETECTOR.....	47
4 ANÁLISE DO CIRCUITO PROPOSTO.....	53
4.1 ESTÁGIO DE ALIMENTAÇÃO E POLARIZAÇÃO.....	53
4.2 ESTÁGIO DE COMPRESSÃO.....	54
4.3 ESTÁGIO DE AMPLIFICAÇÃO.....	58
4.4 ESTÁGIO DE <i>DETECTOR</i> (SIDECHAIN).....	61
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	64
5.1 ANÁLISE DE COMPRESSÃO.....	64
5.1.1 Compressor analógico aplicado a vocal.....	64
5.1.2 Compressor analógico aplicado a caixa de bateria.....	65
5.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DE TEMPO DO PLUGIN PUIGCHILD 660.....	68
5.2.1 Aplicado ao vocal.....	69
5.2.2 Aplicado à caixa de bateria.....	70
5.3 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO DO PLUGIN PLUGIN CLA2A DA WAVES.....	74
5.3.1 Aplicado ao vocal.....	74
5.3.2 Aplicado à caixa de bateria.....	75
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
APÊNDICES.....	82
APÊNDICE A NETLIST SIMULAÇÃO CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO.....	82
APÊNDICE B CIRCUITO COMPLETO DESENVOLVIDO.....	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A invenção da válvula data do ano de 1904, pelas mãos do físico inglês John Ambrose Fleming, conhecida como válvula diodo. A válvula diodo permitia o processo de retificação da forma de onda. O surgimento da válvula triodo é imediatamente posterior e ocorre no ano de 1906 pelo Dr. Lee DeForest, apesar de seu uso ter sido amplamente disseminado a partir de 1910. Os diferentes tipos de válvulas foram fundamentais para o desenvolvimento e a forma de se pensar os circuitos eletrônicos atuais. Áreas como radiodifusão, telecomunicações e outras esferas estão envolvidas na história da evolução dos circuitos eletrônicos (ROMANOWITZ, 1962).

A válvula triodo, um dispositivo de três eletrodos, foi o primeiro resultado do aperfeiçoamento do diodo a vácuo. A inclusão de um terceiro eletrodo, estrategicamente colocado entre o cátodo e a placa, constituiu o primeiro dispositivo eletrônico, em torno do qual pode ser implementado qualquer circuito eletrônico, seja um amplificador, um oscilador ou um filtro.

A válvula triodo ocupa papel fundamental no desenvolvimento das aplicações e desempenho fornecidos em circuitos valvulados. Por meio de sua grade de controle (*grid*), a válvula triodo tornou o processo de amplificação da informação uma realidade em diversas formas de utilização. A capacidade de alteração de pequenos valores da tensão de grade e forte controle da saída de corrente da válvula segmentou o caminho para abertura de novas frentes de pesquisa assim como permitiu a realização de novas operações com alta eficiência (ROMANOWITZ, 1962).

O uso da válvula triodo é comum em projetos e construções de compressores valvulados de áudio. A compressão de sinais de áudio é um processo essencial para otimização de transmissões e recepções de sinais de áudio. O campo do processamento de sinais e a utilização da compressão de sinais em áudio têm diversos ramos fundamentais, tais como as áreas de telecomunicação, eletrônica, controle, entre outras. O contexto da análise a ser realizada neste trabalho tem enfoque na compressão de sinais de áudio advindos de instrumentos musicais,

vocais, ou até mesmo uma pequena taxa de compressão em uma faixa inteira de uma música no contexto de uma etapa de masterização. A monografia visa abordar com uma visão aprofundada os diferentes blocos de construção do circuito do compressor valvulado desenvolvido e discutir a utilidade de cada um dos parâmetros escolhidos para controle do compressor.

1.2 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento do circuito analógico e sua construção física visaram à possibilidade de comparar as sonoridades de compressores que dominavam o cenário da música há 40 anos com os que dominam o cenário atual. O trabalho visou o desenvolvimento de um circuito de compressão de áudio à válvula que facilitasse ao máximo a sua utilização, conservando a sonoridade que o mesmo se propõe. Os circuitos antigos de compressão de áudio comumente possuíam de três a cinco parâmetros, os quais estão descritos abaixo:

- *Ratio*: controla a quantidade de compressão pelo fornecimento da taxa de compressão. Em geral, referido por uma razão x:y em que a cada 'x' dB's que passam (do sinal de áudio) do ponto de *Threshold* apenas 'y' dB's restam. Por exemplo, um *ratio* de 4:1, ao passar 20dB do ponto de *Threshold* o compressor vai atuar de forma a permitir a passagem de 5dB;
- *Threshold*: determina o ponto, em dB's, que o compressor passa a atuar;
- *Attack*: conceito absolutamente mal difundido, como o tempo que o compressor demora a funcionar. De fato, o compressor passa a atuar desde o momento que qualquer parte do sinal chegue ao ponto de *Threshold*. A taxa de compressão (*ratio*) escolhida só ocorrerá de imediato caso o *attack* esteja nulo. O tempo que o compressor demora a atuar com sua compressão selecionada que é o tempo de *attack*;
- *Release*: tempo que o compressor leva para voltar ao ponto de *gain reduction*. *Releases* excessivamente rápidos implicam compressões musicais não agradáveis para o ouvido humano;
- *Gain*: responsável pelo ganho no sinal já comprimido.

O circuito desenvolvido atendeu aos parâmetros clássicos acima explicados. Os parâmetros de *release* e *attack* não foram projetados para serem controlados, isto é, são definidos em projeto de forma a ter um *attack* relativamente lento que preserva o transiente inicial e um *release* de tempo médio. Em resumo, a escolha pelo tema e o desenvolvimento físico do circuito passam pela análise comparativa de diferentes sonoridades de compressores antigos valvulados e seus emuladores digitais, além da comparação com *plug-ins* de compressão essencialmente “digitais”.

O trabalho visa explorar e recuperar a estética sonora advinda dos compressores analógicos. O desenvolvimento robusto de tecnologias digitais deu origem a uma ampla variedade de *plug-ins*, *VSTs*, que emulam os compressores analógicos antigos como o *FairChild 670* da *Waves*, *TRS VC 670* da *T-racks*, *TRS White 2A*, entre outros mundialmente conhecidos. Além disso, há também *plug-ins* que usam os princípios básicos da compressão de forma a criar uma sonoridade mais “*clean*” (característica do desenvolvimento digital) em relação aos compressores analógicos valvulados.

1.3 OBJETIVOS

Os conceitos matemáticos utilizados para desenvolvimento de compressores analógicos e digitais são semelhantes, porém, na prática, a forma de projeto de cada uma dessas opções e as suas variações que surgiram ao longo dos anos permitem diversas frentes de análise. Para possibilitar análise comparativa entre compressores analógicos e emuladores digitais, projeta-se circuito valvulado baseado em topologias de compressores famosos nos meios de processamento de áudio e gravação.

Portanto, objetiva-se a construção de um compressor de válvula capaz de realizar o processamento de sinal de forma similar aos grandes compressores característicos dos anos 60 e 70. A construção do circuito foi alterada durante o processo de projeto de circuito, tendo em vista obter um resultado satisfatório, isto é, os valores escolhidos de elementos formadores do circuito foram pautados na literatura da área junto aos testes de funcionamento do circuito desenvolvido.

O cenário atual da indústria da música apresenta diversas formas de manter a atuação linear em amplificações e compressões de sinais. O mundo digital abrange

formas mais precisas e acessíveis de obtenções de funcionamentos lineares e mais “clean” aos ouvidos. A utilização de compressores analógicos valvulados hoje representa uma possibilidade sonora diferente, outro tipo de desenvolvimento estético do som no seu processo de tratamento. As vantagens dos meios digitais acabaram por inutilizar a grande indústria fonográfica analógica, porém forneceu brecha mercadológica para obtenção de sonoridades diferentes em relação as mais atuais. O ponto de operação que o mercado deseja hoje não é advindo de um ponto no centro da curva de polarização da válvula.

Portanto, o projeto desenha-se de forma a trabalhar a escolha de um ponto ótimo de polarização que deve ser continuamente testado durante o processo de *design* do circuito, principalmente pela sonoridade agradável alcançada. Abaixo, observa-se exemplo de válvulas comumente utilizadas em circuitos de compressão e amplificação.

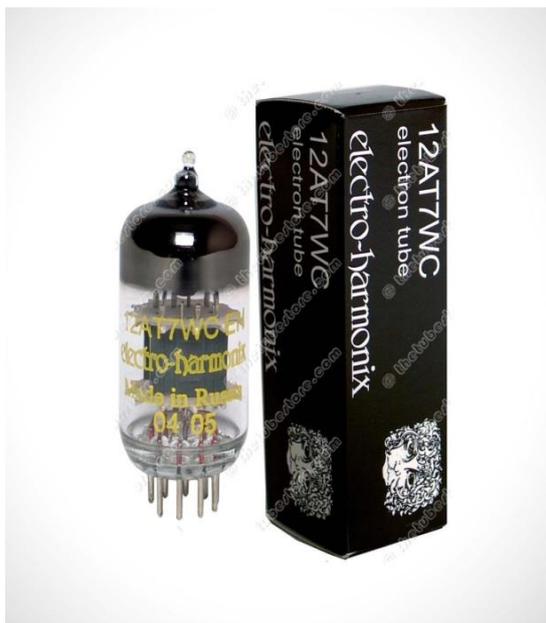


Figura 1.1: Válvula 12AT7



Figura 1.2: Válvula 12AX7

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 oferece a fundamentação teórica para o desenvolvimento de um circuito de compressão proposto. Variados conceitos serão apresentados como forma de pavimentação de um caminho para o entendimento do circuito, não só em termos de engenharia, como também em termos de sua aplicação á área musical.

O capítulo 3 trata acerca dos materiais e métodos utilizados ao longo do trabalho de conclusão de curso.

O capítulo 4 se debruça sobre o circuito proposto em questão, sendo encarregado de sintetizar as diversas informações presentes na análise do circuito e explicar a escolha dos componentes utilizados.

O capítulo 5 tem como alvo a análise dos resultados obtidos e a comparação com os meios atuais de compressão de sinais de áudio no cenário musical.

O capítulo 6, último item em questão, encarrega-se de revisar o texto apresentado, sintetizando suas principais ideias e mostrando o alcance dos resultados obtidos. Também indica possíveis explicações para o desenvolvimento de novos circuitos que busquem recuperar sonoridades antigas ou até mesmo alcançar algum resultado diferente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VÁLVULA TRIODO

Uma válvula diodo caracteriza-se por ser um dispositivo responsável por converter corrente alternada em corrente contínua. Este dispositivo não era capaz de realizar o processo de amplificação de sinais, ou seja, tensão e potência não eram alterados de forma a permitir novas funcionalidades. A inserção de um terceiro eletrodo (grade de controle) foi o elemento chave para uma revolução na história da eletrônica e origem das válvulas triodos. Como Jurich (2014) comenta, válvulas triodos foram, em quase todas as aplicações substituídas pelos transistores, ainda que no áudio, sua função nunca tenha sido esquecida. Vale a ressalva que a válvula triodo se assemelha, quando se trata de seu princípio de operação, ao transistor de efeito de campo (FET).

Na figura 2.1, ilustra-se o aspecto de construção da válvula diodo e, na figura 2.2, da válvula triodo.

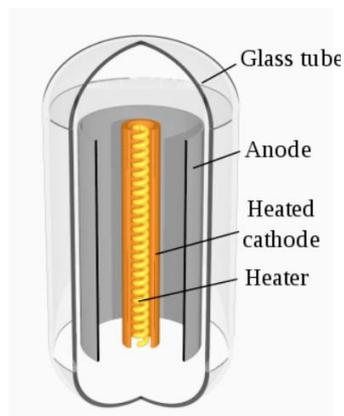


Figura 2.1: Válvula diodo

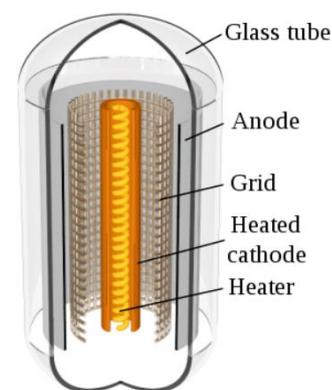


Figura 2.2: Válvula triodo

As figuras 2.1 e 2.2 representam a ilustração tradicional encontrada em diagramas esquemáticos e na literatura em geral para triodos e duplo-triodos, sendo este último nada mais que dois triodos completamente independentes montados no mesmo invólucro. Em raríssimos casos, o filamento é desenhado dentro do símbolo do triodo. Geralmente, são desenhados na fonte de alimentação com seus respectivos pinos.

A válvula triodo consiste de três eletrodos: ânodo, cátodo, e grade de controle. Os três eletrodos devem estar dentro de um tubo a vácuo o fim de evitar colisões dos elétrons liberados no aquecimento do filamento, seja por aquecimento direto ou indireto. O aquecimento direto funciona de forma a provocar uma agitação térmica das partículas que compõem o filamento e que acabam por liberar elétrons dos átomos, ou seja, utiliza-se o filamento para emissão de cargas, caracterizando o aquecimento direto. No caso do aquecimento indireto, agrega-se um novo eletrodo envolvendo o filamento, denominado cátodo, caracterizando o aquecimento indireto.

Quando o cátodo é aquecido a uma determinada temperatura, possibilitando que os elétrons presentes no cátodo possuam energia suficiente para formarem uma nuvem de elétrons, esse processo é chamado de emissão termiônica (JURICH, 2014), aplica-se uma tensão positiva ao ânodo e uma tensão negativa ao cátodo em relação a grade de controle, tornando possível o fluxo de elétrons de maneira eficaz entre o cátodo e o ânodo.

O eletrodo que é denominado grade ou, mais especificamente, grade de controle, tem como função o controle de corrente que circula entre o cátodo e a placa. Sendo um eletrodo "aberto", a grade de controle, em princípio, não está incluída, sob o aspecto de corrente contínua, no circuito cátodo-placa. A grade de controle, salvo em aplicações especiais, é sempre polarizada negativamente em relação ao cátodo.

A grade de controle consiste em uma “*helix*” de cabos coaxiais de pequena dimensão, que são montados ao redor do cátodo e cercado pela placa de ânodo (JURICH, 2014), como ilustrado na figura 2.2.

Quando o eletrodo de grade de controle é negativo em relação ao cátodo, a grade se opõe ao fluxo de corrente entre o cátodo e o ânodo, entretanto a grade não atrai elétrons e não configura nenhum tipo de corrente. Caso a tensão de grade (tensão entre a tensão de grade e a tensão de cátodo) seja suficientemente negativa, pode haver corte do fluxo de elétrons. Se a tensão de grade possuir módulo muito baixo, aproximando-se de zero pela esquerda, para valores negativos muito baixos, a válvula triodo apresentara processo de saturação.

2.2 TRANSFORMADORES

Transformadores são utilizados no circuito como meio de acoplamento entre estágios do circuito, ou também como um meio para acoplamento entre um estágio final de um determinado circuito e sua carga. O fluxo magnético comum aos dois enrolamentos em um transformador é o meio pelo qual a energia é propagada de um enrolamento primário para um secundário. A relação de transformação é definida como a razão entre a tensão do enrolamento primário e a tensão do enrolamento secundário. A tensão de saída em um transformador depende do número de espiras, ou seja, voltas de fio do enrolamento secundário em relação ao primário.(CHAPMAN, 2013). A figura 2.3 apresenta um modelo simples de funcionamento de um transformador.

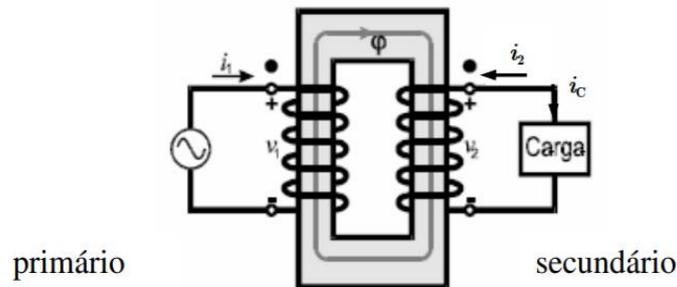


Figura 2.3: Modelo de transformador

A relação de transformação, a , para o modelo de transformador é:

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.1)$$

sendo:

V_1 – tensão no primário;

V_2 – tensão no secundário;

N_1 – número de espiras do primário;

N_2 – número de espiras do secundário;

I_1 – corrente no primário;

I_2 – corrente no secundário;

A impedância no primário, Z_1 , é dada pela equação 2.2.

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad (2.2)$$

Já a impedância no secundário, Z_2 , é determinada pela equação 2.3.

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (2.3)$$

Dividindo-se, portanto, a equação 2.2 pela 2.3 e usando-se as relações apresentadas na equação 2.1, obtém-se a equação 2.4.

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.4)$$

De acordo com Chapman (2013), uma das propriedades interessantes de um transformador é que, como ele altera os níveis de tensão e corrente, a razão entre a tensão e a corrente também sofre alteração, alterando a impedância aparente de um elemento.

Destacam-se, nas equações 2.5 e 2.6, relações obtidas a partir da equação 2.1.

$$V_1 = a \times V_2 \quad (2.5)$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a} \quad (2.6)$$

Usando-se a equação da impedância no primário (2.2) e as relações apresentadas nas equações 2.5 e 2.6, encontra-se a equação 2.7.

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{a \times V_2}{\frac{I_2}{a}} = a^2 \times Z_2 \quad (2.7)$$

A impedância Z_1 é a impedância real “vista” pela fonte, isto é, o terminal primário “enxerga” qualquer carga conectada ao secundário multiplicada pelo quadrado de sua relação de transformação. Por meio de um transformador é possível casar a impedância da carga com a impedância da fonte simplesmente usando a relação de espiras adequada.

2.3 AMPLIFICAÇÃO BÁSICA

O estágio de amplificação básica é utilizado no contexto de aparelhos voltados à música para amplificar sinais baixos, fracos ou previamente comprimidos para níveis de volume aceitáveis ao ouvido humano. A figura 2.4 mostra um possível esquemático para o estágio de amplificação básica.

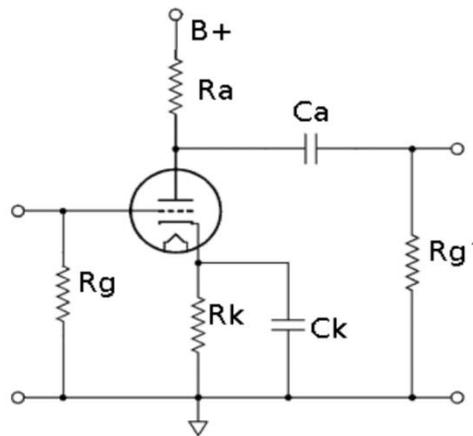


Figura 2.4: Esquemático de amplificação básica

A figura 2.5 mostra uma curva da operação de uma válvula triodo. A parte mais baixa representa um cenário de nenhuma passagem (fluxo) de corrente, enquanto que a parte mais alta representa um cenário de saturação intensa. O menor índice de distorção ocorre no ponto central da curva de operação. O processo de amplificação exige que o fluxo de elétrons entre o cátodo e o ânodo seja controlado. A função de controle de passagem de corrente é realizada pela grade colocada entre o cátodo e o ânodo. A tensão negativa na tensão de controle de grade é chamada de *bias*.

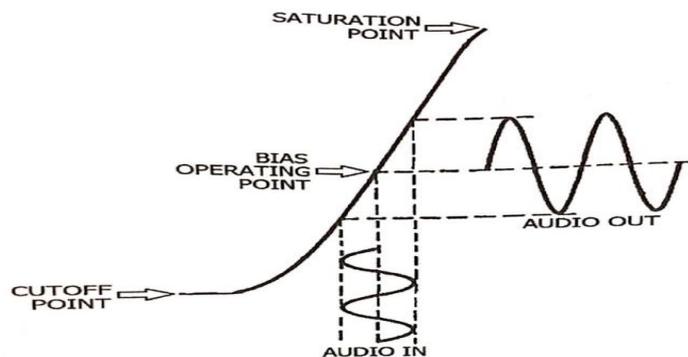


Figura 2.5: Curva de operação de uma válvula triodo

Na figura 2.4, o resistor R_k é o resistor de cátodo (*cathode resistor*), que é responsável pela forma mais simples de polarização da tensão de grade e sustentação da polarização. O resistor de cátodo (R_k) fornece um caminho para obtenção de uma tensão de cátodo acima da tensão de terra. Portanto, a utilização do resistor R_k visa tornar o cátodo positivo em relação à tensão de grade, gerando uma tensão negativa da grade para o cátodo e permitindo maior facilidade de controle do processo de amplificação. Este método usual de polarização da válvula é chamado de auto-polarização de cátodo. De forma geral, o método não fornece o centro da curva de ponto de operação, porém, fornece perto o suficiente (ROMANOWITZ, 1962).

O resistor R_g é o resistor da grade (*grid resistor*) o qual é responsável por estabilizar o ponto de controle de tensão na grade. A não utilização do resistor R_g pode fazer com que a alta impedância da grade permita que a tensão no *grid* suba de maneira progressiva até um ponto de possível corte do fluxo de elétrons, desabilitando assim o funcionamento da válvula.

O resistor de ânodo (*plate*) R_a é uma parte significativa do circuito uma vez que a componente ac de tensão presente no resistor de ânodo é a saída de tensão desejada no processo de amplificação. A variação de corrente de ânodo é responsável por gerar uma versão amplificada do sinal de entrada na grade da válvula. A operação, na maioria das válvulas de amplificação, ocorre com a tensão de grade negativa em relação à tensão de cátodo. Entretanto, os valores AC que entram na grade alternam-se em semiciclos positivos e semiciclos negativos. Para evitar que a tensão da grade torne-se positiva em qualquer instante de tempo, utiliza-se uma tensão negativa de bias suficientemente grande (ROMANOWITZ, 1962).

A componente alternada da corrente de ânodo está em fase com a componente alternada da tensão de grid. Os circuitos de amplificação, de forma geral, são circuitos inversores, ou seja, a tensão no resistor R_a está 180° defasada em relação à tensão de entrada do circuito.

A parte mais importante no projeto de um amplificador triodo é a análise harmônica. É nela que se aceita ou rejeita um ponto de operação. Em uma situação normal de operação, o triodo irá produzir distorção harmônica principalmente nas

componentes pares. As componentes ímpares produzem um efeito desagradável e devem ser evitadas. É normal que, em algumas situações, a distorção por harmônicas pares comece a cair, havendo elevação das harmônicas ímpares. Quando isso ocorre, a operação do triodo nesta região deve ser evitada.

2.4 CLASSES DE AMPLIFICAÇÃO

2.4.1 Classe A

A classe de amplificação A é definida como aquela em que a polarização é feita, de forma a permitir que a corrente de saída (ânodo) ocorra ao longo de 360° relativo ao sinal de entrada na grade. Tipicamente, pode-se optar por um tipo de polarização no caminho médio entre as regiões de saturação e corte na curva de corrente de ânodo versus tensão na grade.

Em termos de análise de potências, esse é o método de polarização menos eficiente, pois a saída dissipa uma quantidade significativa de potência sem nenhum sinal de entrada (áudio). No contexto de amplificadores de áudio, um amplificador classe A pode ser construído sobre topologia *single-end* ou *push-pull*.

As classes de amplificação não delimitam a topologia em termos rígidos, isto é, pode-se produzir topologia *push-pull* para diversas classes de amplificação. Em circuitos de amplificação classe A, utilizando topologia *push-pull*, a corrente em cada um dos lados vai fluir ao longo de 360° relativo ao ciclo de entrada da válvula, porém em direções diferentes. Portanto, à medida que o ponto de bias em uma das válvulas aumenta em determinada quantidade de corrente, o outro lado apresenta taxa igual em decremento de valor de corrente.

A conexão com um transformador de saída faz-se necessária para realizar a soma das correntes de fases opostas a fim de gerar a corrente de saída adequada para geração da forma de onda no secundário do transformador de saída. A potência de saída de um circuito amplificador montado em *push-pull*, apresentado na figura 2.6, operando sob as mesmas condições de polarização de um circuito em *single-end*, mostrado na figura 2.7, fornece exatamente o dobro da potência de saída.

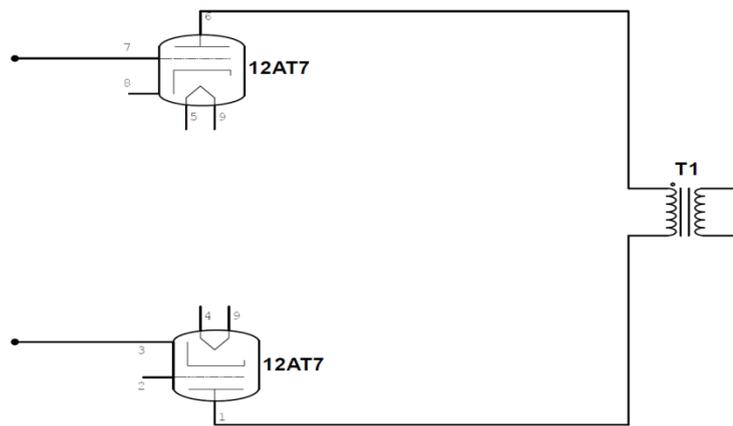


Figura 2.6: Transformador de saída em *push-pull*

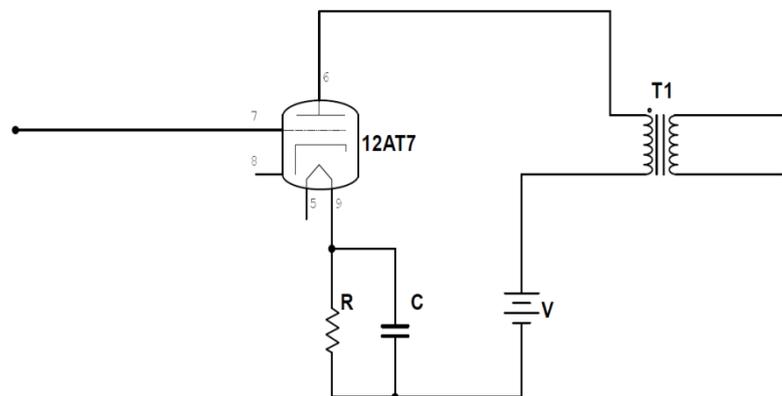


Figura 2.7: Transformador de saída em *single-end*

Existem várias vantagens na amplificação *push-pull* classe A. A corrente de polarização de cada lado está fluindo em direções opostas no primário do transformador de saída, para que eles efetivamente se cancelem. Essa falta de corrente de compensação CC estática no transformador de saída significa que o núcleo pode ser menor, porque não requer folga de ar para evitar a saturação do núcleo da corrente de compensação CC estática.

Um transformador de saída de amplificador classe A em *single-end* é maior em comparação com um amplificador classe A *push-pull* do mesmo nível de potência. A folga de ar necessária para evitar a saturação do núcleo reduz

drasticamente a indutância primária, de modo que o transformador deve ter um núcleo maior e mais enrolamentos para obter a mesma indutância primária e o mesmo ponto de corte de frequência inferior a -3dB. Um estágio de saída do amplificador *push-pull* classe A terá rejeição inerente à ondulação e ruído da fonte de alimentação. Isso ocorre porque o sinal da fonte de alimentação é "modo comum", ou seja, é amplificado por cada lado igualmente, mas como cada lado está fora de fase, ele cancela a saída (SEDRA; SMITH, 2000).

A principal desvantagem da amplificação *push-pull* classe A em relação à classe *single-ended* A é a necessidade de um estágio de divisão de fase para gerar os sinais de inversão em fase oposta. Em construção de dispositivos de áudio analógicos, a utilização de transformadores para inverter as fases é processo corriqueiro.

2.4.2 Classe B

Um amplificador de classe B é definido como tal que a polarização da grade das válvulas possui a saída definida na região de corte, isto é, nenhuma corrente da placa flui na ausência de um sinal de entrada. A corrente da placa flui apenas quando um sinal está presente e flui apenas exatamente pela metade ou 180° graus do ciclo de entrada.

Em termos de amplificação de áudio, um amplificador de classe B deve necessariamente ter seu funcionamento em modo de *push-pull*, haja vista que cada dispositivo de saída amplifica apenas metade do sinal de entrada, portanto a saída seria totalmente ceifada de um lado em caso de operação de apenas uma extremidade. Embora a corrente esteja ceifada de um lado, a forma de onda de saída não sofre prejuízo em sua forma devido à outra válvula funcionar de modo a garantir a reprodução da outra metade do formato de onda (SEDRA; SMITH, 2000).

A principal vantagem da operação da classe B é sua eficiência, que é consideravelmente maior do que a classe A, haja vista que a dissipação de potência média dos dispositivos de saída é menor, dada sua polarização na região de ponto de corte em que somente dissipam energia durante metade do ciclo de entrada.

A desvantagem da operação da classe B é uma grande quantidade de "distorção cruzada", também conhecida como *crossover distortion*, que acontece devido ao movimento brusco e oposto de corte e funcionamento entre as válvulas.

Observa-se que as curvas características de uma válvula não são perfeitamente lineares e simétricas. Portanto, a "transferência" entre os dois lados resulta em um curto espaço de tempo no cruzamento zero, onde há distorção. Essa distorção de cruzamento se parece com um entalhe ou ponto plano na onda senoidal ao cruzar o eixo zero.

2.4.3 Classe AB

Um amplificador de classe AB é definido como tal que a polarização da grade atue possibilitando que a corrente da placa (ânodo) flua por mais da metade, mas consideravelmente menor que os 360° completos do ciclo de entrada, medidos novamente na saída total e não cortada do amplificador.

O aumento da corrente de polarização ociosa em relação à operação de classe B mantém os tubos em uma pequena quantidade o tempo todo, resultando em distorção de cruzamento reduzida, porque mantém os tubos fora da região altamente não-linear perto do ponto de corte. A menos que o viés ocioso seja definido muito próximo da operação da classe A, é possível obter ganhos de eficiência semelhantes à operação da classe B, sem a distorção indesejada do crossover (SEDRA; SMITH, 2000).

2.5 EFEITO MILLER

É definido como o aumento efetivo da capacitância entre a grade e o cátodo em uma válvula triodo devido à carga induzida eletrostaticamente na grade pelo ânodo por meio de sua capacitância grade-ânodo (Jurich, 2014). Pode ser visto também como a capacitância do tubo. A capacitância efetiva na entrada da grade é aumentada devido ao efeito Miller de forma similar a uma conexão de capacitor da grade para o terra. Isto pode reduzir a largura de banda de um estágio de amplificador restringindo suas frequências mais elevadas.

A capacitância Miller em uma válvula triodo é igual a capacitância da grade para o ânodo multiplicada por um fator igual ao ganho de tensão somado uma unidade. Conforme Jurich (2014), o efeito Miller pode ser modelado segundo descrito abaixo.

A fórmula para determinação do total de capacitância de uma válvula triodo é:

$$C_{in} = C_{gk} + C_{gp} \times (V_g + 1) \quad (2.8)$$

Onde C_{in} é a capacitância de entrada da válvula; C_{gk} é a capacitância da grade para o cátodo, composta por uma capacitância interna mais qualquer capacitância externa; C_{gp} é a capacitância da grade para o ânodo, composta por uma capacitância interna mais qualquer capacitância externa; V_g é o ganho de tensão.

Para o caso da 12AX7, utilizada no estágio de compressão do circuito de compressor, em consulta ao *datasheet*, temos que:

$$\blacksquare C_{gk} = 2,2\rho\text{F} \quad (2.9)$$

$$\blacksquare C_{gp} = 2,0\rho\text{F} \quad (2.10)$$

$$\blacksquare V_g = 60 \quad (2.11)$$

O total de capacitância de entrada, portanto, que deve ser considerada na válvula é de:

$$C_{in} = 2,2\rho\text{F} + [2,0 \times (60+1)] = 124,2\rho\text{F} \quad (2.12)$$

O efeito de capacitância Miller pode ser responsável por eliminar altas frequências do espectro na resposta do sistema. No desenvolvimento de circuitos de compressão e amplificação, devem-se tomar algumas ações para minimizar o efeito Miller, conforme listadas abaixo:

- redução da impedância de saída do estágio anterior: no processo de *design* do circuito o resistor de 4k7 mostrou-se uma escolha adequada para esta redução do efeito Miller, além da escolha por uma válvula com a resistência de ânodo não elevada. A escolha do resistor deve ser cuidadosa, pois, além de trabalhar para evitar o efeito Miller, deve-se levar em conta uma decisão que gere um ganho de estágio adequado;

- redução do ganho de estágio: a capacitância Miller é proporcional ao ganho de amplificação presente no estágio projetado. A escolha por esta tomada de

decisão envolve o balanço entre a qualidade do sinal amplificado e uma possível necessidade de um estágio a mais de amplificação. No caso do circuito de compressão, optou-se por minimizar o efeito Miller ao máximo de forma que o estágio de amplificação fosse o responsável por gerar um ganho agradável aos ouvidos, mantendo a qualidade sonora do sinal comprimido.

Ganhos na válvula triodo dependem da escolha do material a ser utilizado. De acordo com Jurich (2014), válvulas como a 12AX7 podem apresentar um valor mínimo de Efeito Miller com a utilização de resistores de baixos valores no ânodo e na grade. Um valor de $100\text{k}\Omega$ tanto para grade como para ânodo são capazes de fornecer um ganho relevante livre de forte interferência do Efeito Miller.

A escolha pelo resistor de ânodo no valor de $4\text{k}\Omega$ ocorreu devido à necessidade de uma menor queda de tensão no resistor de ânodo, visando uma maior tensão de ânodo (*Plate Voltage*), que é responsável por fornecer um ganho maior ao primeiro estágio.

2.6 REALIMENTAÇÃO NEGATIVA

O desenvolvimento do conceito de realimentação negativa ocorreu na área da engenharia eletrônica, apesar da grande parte dos sistemas físicos possuírem algum tipo de realimentação.

O uso de realimentação negativa foi tão disseminado que é quase impossível dissociar a eletrônica, em geral, do conceito de realimentação. De acordo com Sedra e Smith (2000), a realimentação é aplicada para que haja:

- diminuição da sensibilidade no ganho, isto é, fazer com que as alterações nos valores dos componentes do circuito exerçam menos influência no ganho do mesmo;
- redução da distorção não-linear, ou seja, fazer com que a saída seja proporcional, independente do nível do sinal;
- redução do efeito de ruído, isto é, minimizar a contribuição na saída de sinais elétricos indesejáveis gerados pelos componentes do circuito e possíveis interferências externas;
- extensão da largura de banda do sistema;

- controle das impedâncias de saída e de entrada.

Vale ressaltar que as propriedades anteriores são objetivos no projeto de circuito que são alcançados com a inerente redução de ganho que ocorre no processo de realimentação negativa. De acordo com Jurich (2014), a realimentação negativa é o método utilizado para alimentar o sinal de um estágio anterior com o sinal de saída de outro estágio seguinte, desde que o sinal esteja defasado em 180° .

O esquemático de uma realimentação negativa pode ser visto conforme figura 2.8.

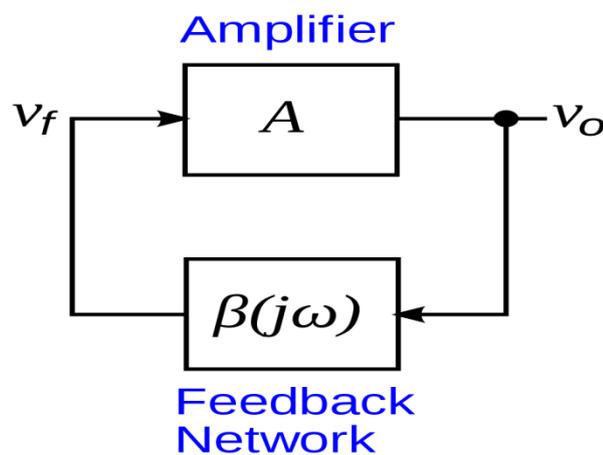


Figura 2.8: Realimentação negativa

No caso do compressor em questão, a realimentação negativa é feita por meio do circuito de detector, o qual será detalhado em capítulos posteriores deste trabalho.

2.7 SIDECHAIN

De acordo com Robjohns, White e Lockwood (2013), todos os processadores dinâmicos, sejam compressores, limitadores, *De-essers* ou *gates* usam um controle de ganho capaz de alterar o nível de volume instantâneo e a dinâmica do sinal de entrada. O controle de ganho pode ser feito por meio de VCA, uma válvula triodo, ou até mesmo um resistor óptico, a depender da unidade projetada. Independentemente dos componentes utilizados, o controle de ganho será feito por

meio de um circuito capaz de avaliar o sinal e decidir quanto deve existir de atenuação. Habitualmente este circuito é chamado de *Sidechain*.

Diversos aparelhos de processamento dinâmico fornecem acesso ao sinal de *sidechain*, uma vez que, em alguns casos, é desejado um processamento externo capaz de modificar o sinal original. No presente caso desenvolvido, o sinal que entra no compressor, passa pelo processo de amplificação, compressão e *sidechain*, e não é fornecido acesso ao sinal de controle de *sidechain*, isto é, o sinal de entrada é modificado unicamente pelo circuito desenvolvido para compressão, sem que haja possibilidade de alteração do sinal de *sidechain* por interferência externa.

No caso do compressor desenvolvido o circuito de *sidechain* encontra-se definido como circuito de *Detector*, uma vez que fica responsável pelos processos de detecção dos níveis que definem o grau de compressão adotado. Neste texto, quando nos referirmos ao circuito de *sidechain*, estamos nos referindo ao estágio de detecção que será detalhado no próximo capítulo. Abaixo, demonstra-se que o circuito de *sidechain* (detector) é representado pelo bloco β , ou seja, a realimentação negativa do circuito é realizada no circuito de *sidechain*, conforme figura 2.9.

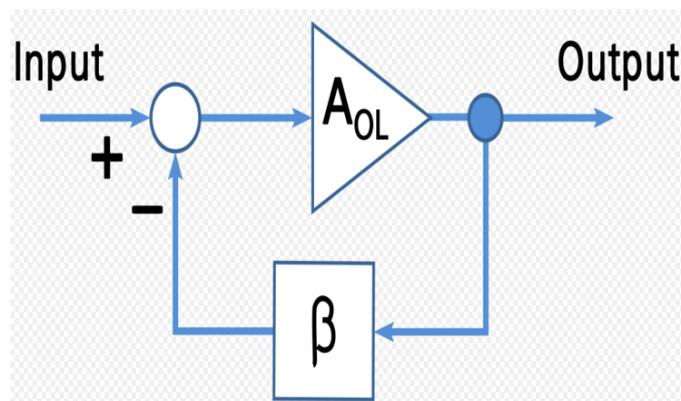


Figura 2.9: Circuito de *sidechain* (representação do bloco β)

2.8 DIODOS

De acordo com Sedra e Smith (2000), o diodo ideal é o componente mais fundamental na eletrônica e caracteriza-se por ser um elemento de dois terminais com símbolo apresentado conforme a figura 2.10 (a).

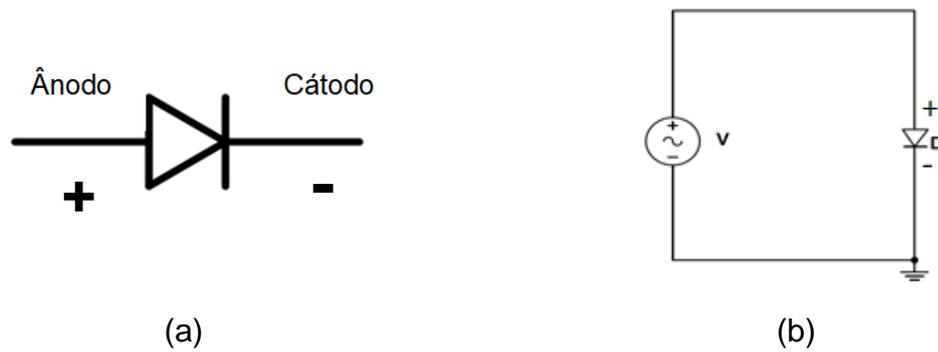


Figura 2.10: Diodo ideal: (a) Símbolo diodo; (b) Circuito simples com diodo

A característica elétrica do diodo ideal pode ser entendida da seguinte forma: se houver uma tensão negativa sobre o diodo da figura 2.10 (b), o diodo funcionará como um circuito aberto. Nesse tipo de condição, diz-se que o diodo encontra-se em polarização reversa, ou reversamente polarizado, e a corrente que passa pelo dispositivo é zero em casos ideais. O diodo apresenta-se em corte (SEDRA; SMITH, 2000).

Em contramão, se a corrente positiva é utilizada de acordo com a polarização apresentada na figura 2.10 (b), então a queda de tensão é zero no diodo. Isto significa que o comportamento do diodo quando diretamente polarizado assemelha-se a um curto circuito, e a condução torna-se possível (SEDRA; SMITH, 2000).

O terminal positivo do diodo é chamado de ânodo e o terminal negativo de cátodo, uma forma que a eletrônica teve para associar aos diodos de válvula. A característica i-v do diodo é altamente não linear.

Neste trabalho, a utilização dos diodos no circuito de compressão visa o seu emprego em dois momentos distintos: no circuito de detector (*sidechain*) e no circuito de polarização (alimentação das válvulas). No circuito de *detector (sidechain)*, utiliza-se retificação por meio do uso de diodos e sua característica de curva i-v, conforme a figura 2.11.

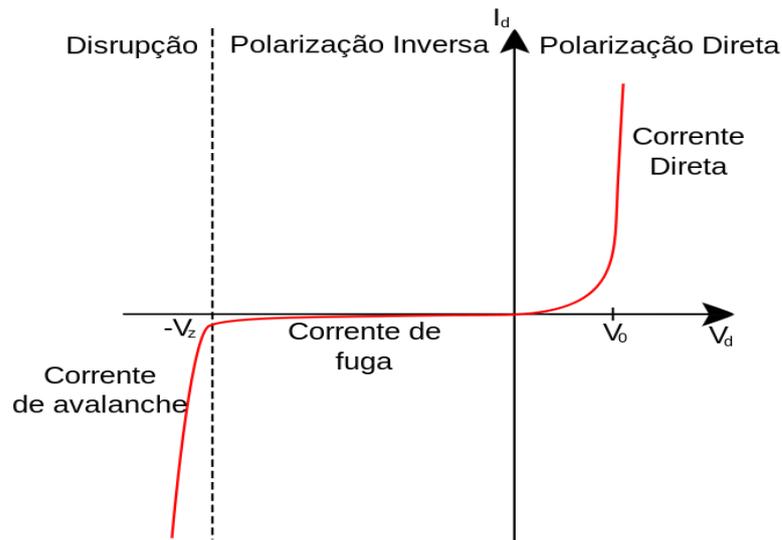


Figura 2.11: Curva característica i-v de um diodo

O circuito de retificação simples é formado por um diodo e um resistor em série. Na figura 2.12, encontra-se o esquemático de um circuito simples de retificação.

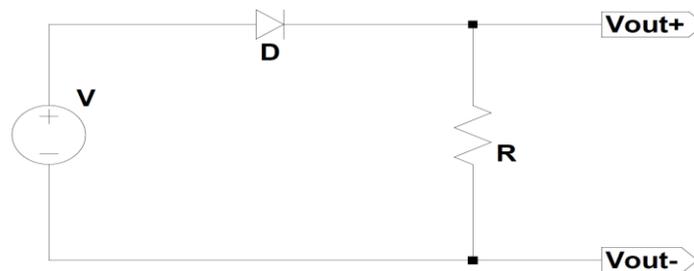


Figura 2.12: Circuito básico de retificação

Para uma entrada senoidal (ou formato de onda com semiciclos positivos e negativos), durante o semiciclo positivo, em caso de polarização direta, o diodo permite a passagem de corrente e a tensão de saída, considerando queda de tensão zero no diodo, é igual a tensão de entrada. Durante o semiciclo negativo, em caso de polarização direta, o diodo não permite a passagem de corrente implicando em uma tensão nula na saída do circuito. Em casos não-ideais, como no circuito desenvolvido, há queda de tensão no diodo, tipicamente na casa de 0,6 a 0,7V, a

dependem do modelo de diodo utilizado. A saída de um circuito de retificação para um diodo polarizado diretamente pode ser vista na figura 2.13.

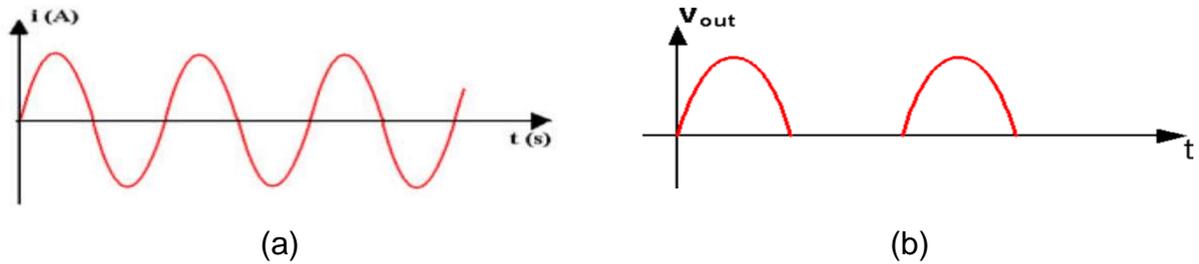


Figura 2.13: Onda Senoidal: (a) Corrente alternada; (b) Tensão de saída retificada

Existem na literatura eletrônica diversos arranjos para retificação, seja para retificação de meia onda ou retificação de onda completa. A utilização de topologias específicas depende do objetivo que se propõe cada parte do circuito, como no caso do circuito de Detector (*sidechain*) que será melhor detalhado nos próximos capítulos.

2.9 COMPRESSÃO

A compressão é a redução automática do ganho à medida que o nível de sinal aumenta além de um valor predefinido de nível de volume, definido como nível limite (limiar). Considera-se que o ganho acima do limite estabelecido versus o ganho abaixo do limite estabelecido denomina-se taxa de compressão (FLETCHER; MUNSON, 1933). A figura 2.14 mostra o *glue compressor*, nativo da DAW Ableton Live, que é um compressor clássico.



Figura 2.14: Glue compressor

Conforme já citado no texto, o tempo que o compressor demora a atuar com um determinado nível de volume (*Threshold*) selecionado que delimita o tempo de ataque. O tempo necessário para retornar ao valor de ganho original quando o sinal volta para um valor abaixo do limiar é o tempo de *release*. De forma geral, o tempo de ataque projetado em um circuito deve ser rápido para evitar sensações ao ouvido de mudança extrema de variação de ganho. Na contramão, em casos de valores de ataque muito curtos, há possibilidade de redução do transitório inicial, o que acarretaria um som provavelmente deformado (ROBJOHNNS; WHITE; LOCKWOOD, 2013). A figura 2.15 apresenta o esquemático de um processo de compressão de áudio, comparando o áudio original com o áudio comprimido.



(a)



(b)

Figura 2.15: Sinal de *open hat*. (a) Não comprimido; (b) Comprimido

Por exemplo, caso o tempo de ataque projetado em um circuito de compressão seja excessivamente rápido, quando da utilização deste circuito em uma caixa de bateria, ocorreria fenômeno inverso ao desejado. O som de transiente inicial, característico de uma caixa de bateria seria abaixado e a parte grave da captação do som seria ressaltada. Haveria diminuição considerável no “*punch*” do instrumento e geraria possíveis problemas de mixagem em um processo final de gravação e masterização.

Dentro do processo de compressão existem conceitos importantes como o de Loudness. Para Fletcher and Munson (1933), o nível de sonoridade de qualquer som deve ser a intensidade do tom de referência igualmente alto, em relação a uma determinada posição da cabeça do ouvinte. Isto é, o nível de intensidade de um som

é comumente medido em decibéis (dB), na frequência de 1000 Hz, conforme a equação 2.13:

$$I_L = 10 \times \log \left(\frac{I}{I_{\text{ref}}} \right) \quad (2.13)$$

Em que I_L é dado em dB; I é a intensidade em watts por metro quadrado e I_{ref} é a intensidade de referência, ou seja, 10^{-12} watts por metro quadrado.

Isto significa uma maneira de quantificar os valores de certos níveis sonoros, de maneira a tentar interpretar a forma como determinadas frequências são escutadas pelo ouvido humano. As curvas de Fletcher-Munson retratam a sensibilidade variável da audição humana em diferentes frequências, principalmente se colocados níveis de baixa intensidade. A figura 2.16 apresenta as curvas de Fletcher-Munson.

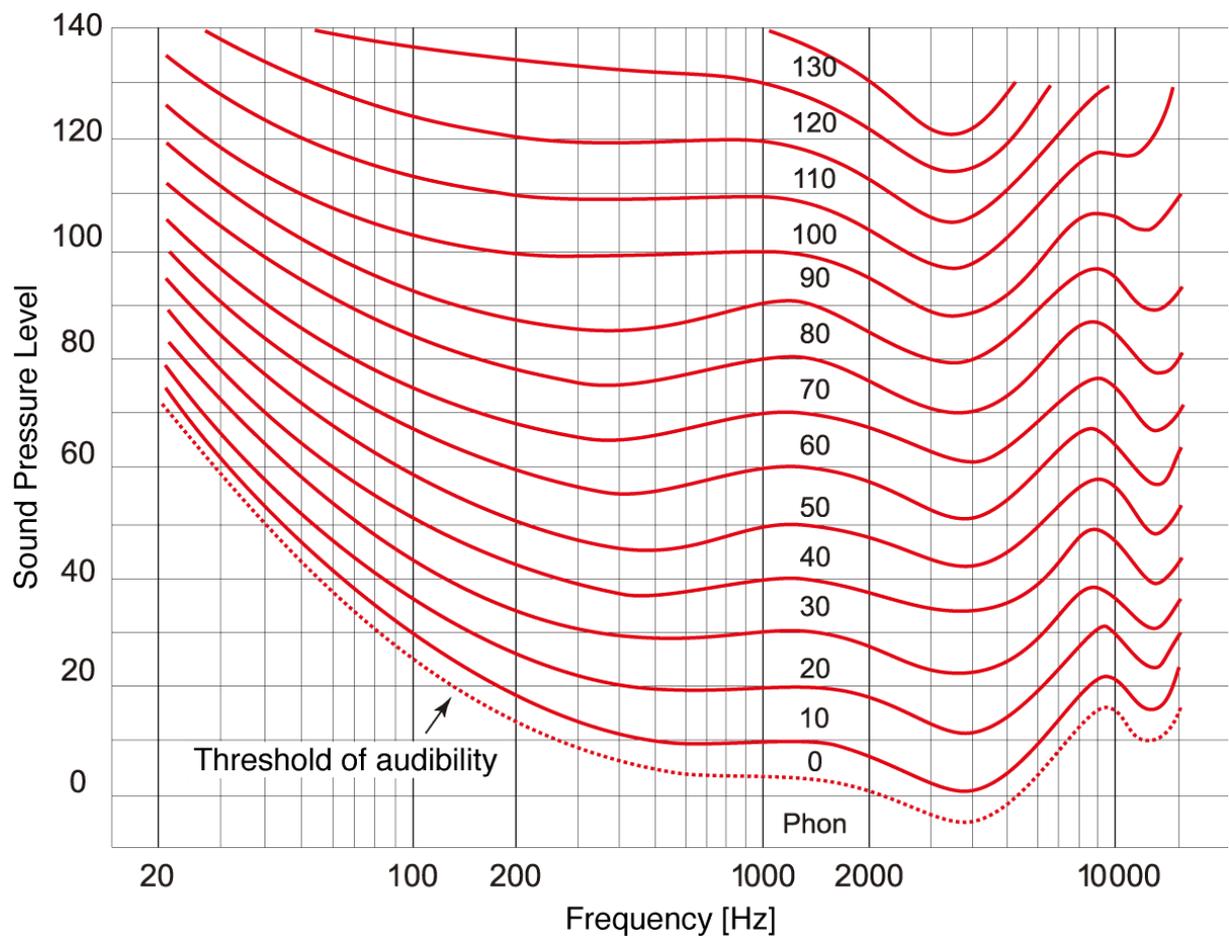


Figura 2.16: Curvas de Fletcher-Munson

Segundo Fletcher e Munson (1933), cada curva mostra o I_L necessário em frequências diferentes para se produzir uma sensação de volume igual em todas elas. Estas curvas são chamadas de isófonas e, por convenção, elas são rotuladas a partir de seu valor de intensidade na frequência de 1000 Hz. Este valor particular do nível de intensidade do som na frequência de 1000 Hz, para uma curva de Fletcher-Munson, é o *Loudness Level* (LL), ou nível de volume, expresso em uma unidade denominada Phon. Sendo assim, um *Loudness Level* de 60 phons corresponde a todos os níveis de intensidade ao longo da curva isófona de 60 phons (um som com intensidade de ~ 70 dB em 100 Hz é percebido pelo ouvido humano com o mesmo volume que um som com intensidade de ~ 58 dB em 4000 Hz – ambos possuem um LL de 60 phons).

O nível de compressão de um sinal pode ser avaliado por meio de medidas de rms, *root main square*, porém neste tipo de análise não se leva em consideração a região de frequência que mais foi alterada pela compressão. A utilização de outras unidades como os Luft's, que se tornaram famosos por fazerem parte do algoritmo de normalização de nível sonoro do Spotify, possibilita maior noção de equilíbrio na sensibilidade auditiva ao longo do espectro de frequências. No escopo deste projeto, a averiguação por RMS apresenta-se como eficiente, pois aponta para valores que demonstram alteração nas formas de onda, cabendo ao projetista julgar se tais alterações são musicalmente atraentes.

2.10 DIODO ZENER

Diodos Zener são fabricados para atuarem na região de ruptura da curva característica i-v. A figura 2.17 mostra o símbolo de circuito para um diodo Zener.

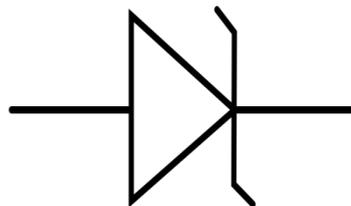


Figura 2.17: Símbolo de circuito para um diodo Zener

O modelo para o diodo Zener pode ser visto na figura 2.18.

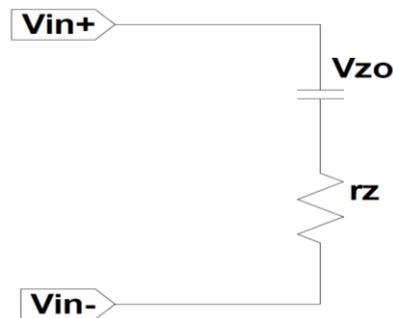


Figura 2.18: Modelo do diodo Zener

A resistência r_z é a resistência incremental do diodo Zener no ponto de operação. O valor de r_z está presente no *datasheet* do diodo (SEDRA; SMITH, 2000).

Segundo Sedra e Smith (2000), pode-se utilizar o diodo Zener em topologia de regulador de tensão Zener paralelo, para aplicação em projeto de circuito de alimentação do compressor. Sendo assim, a função de um regulador de tensão é fornecer uma tensão de saída V_{out} a qual seja a mais constante possível dada a necessidade de manter um ponto de polarização bastante preciso no estágio de compressão do circuito desenvolvido. Utilizam-se dois parâmetros para avaliar se um regulador de tensão funciona de forma adequada: (i) regulação de linha; (ii) regulação de carga. Na figura 2.19, observa-se um modelo simples de regulador de tensão.

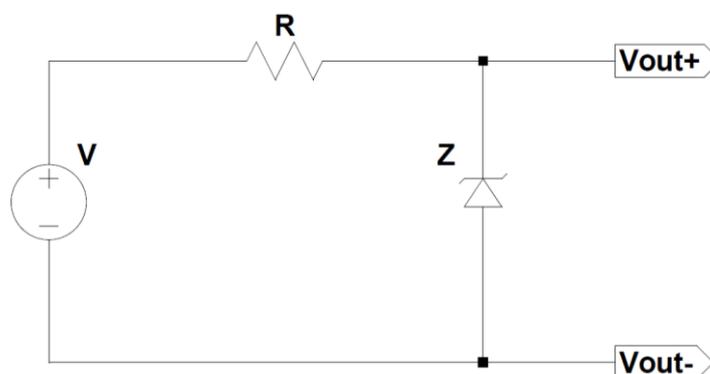


Figura 2.19: Circuito regulador de tensão

A regulação de linha é definida como a variação na tensão de saída de acordo com a variação na entrada da linha.

$$\text{Regulação de linha} \equiv \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V} \quad (2.14)$$

A regulação de carga é definida como a variação na tensão de saída que corresponde a mudanças no valor da corrente exigida pela carga do sistema.

$$\text{Regulação de carga} \equiv \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_L} \quad (2.15)$$

Onde I_L é a corrente no diodo Zener.

Utiliza-se o modelo 1N5378B para regulação de tensão em torno de 100V para o estágio de compressão de sinal, o qual será detalhado posteriormente no capítulo 4 (SEDRA; SMITH, 2000).

2.11 FILTROS PASSIVOS

O processo de projeto de um filtro leva em conta o contexto de aplicação do mesmo. A teoria dos filtros mostra que, na prática, um circuito físico não pode fornecer qualquer tipo de transmissão constante em todas as faixas de frequência do espectro (SEDRA; SMITH, 2000).

As especificações de filtros passivos, em geral, levam em conta um desvio nos valores de tensão em relação ao 0dB. Para filtros de primeira ordem, a atenuação na amplitude do sinal de saída é de 6dB cada vez que a frequência dobrar. O principal filtro utilizado no circuito desenvolvido é o passa-altas que é formado, em sua versão mais simples, de um capacitor em série com um resistor. A equação 2.16 define a função de transferência dos filtros passa-altas RC:

$$H(\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} \quad (2.16)$$

A frequência de corte F_C , em Hertz, é dada pela equação 2.17.

$$F_C = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.17)$$

O ganho do sistema G , em decibéis, pode ser dado pela equação 2.18.

$$G = 20 \times \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (2.18)$$

Em que V_{out} é a tensão de saída e V_{in} é a tensão de entrada.

Há também o filtro passa-baixas que é definido como um circuito eletrônico, o qual possibilita a passagem de frequências baixas sem dificuldades e atenua (ou reduz) a amplitude das frequências maiores que a frequência definida como de corte. A figura 2.20 apresenta a resposta em frequência de um filtro passa-baixas (RC), o qual possui resposta em frequência com comportamento inverso a um filtro passa-altas simples (CR).

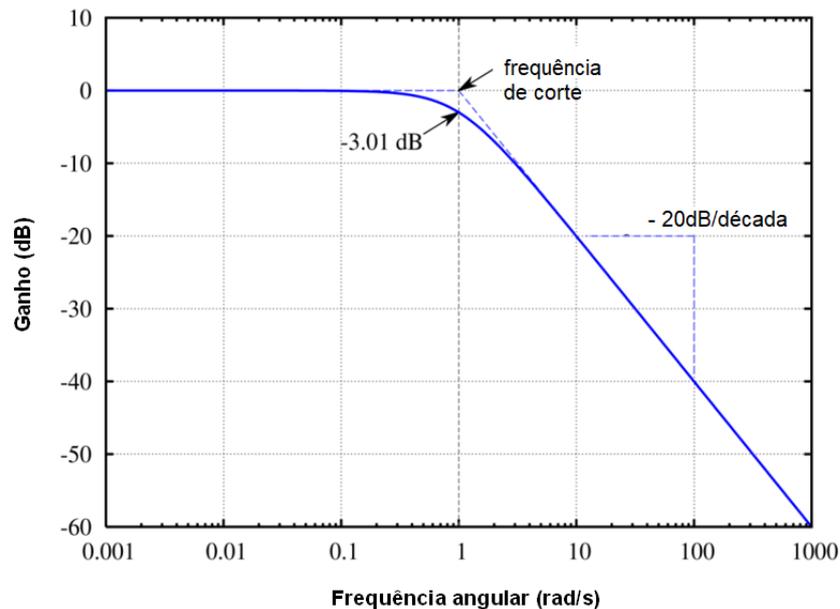


Figura 2.20: Resposta em frequência de um filtro passa-baixas (RC)

Na figura 2.21, mostra-se o esquemático do circuito RC (passa-baixa).

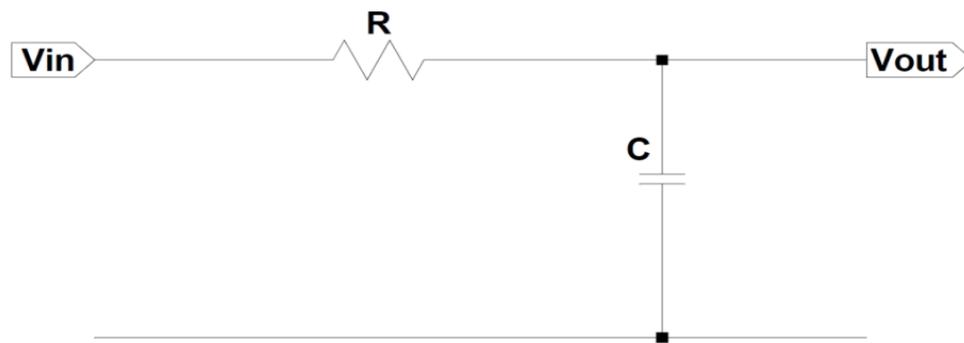


Figura 2.21: Circuito passa-baixas

Na figura 2.22, apresenta-se o esquemático do circuito CR (passa-alta).

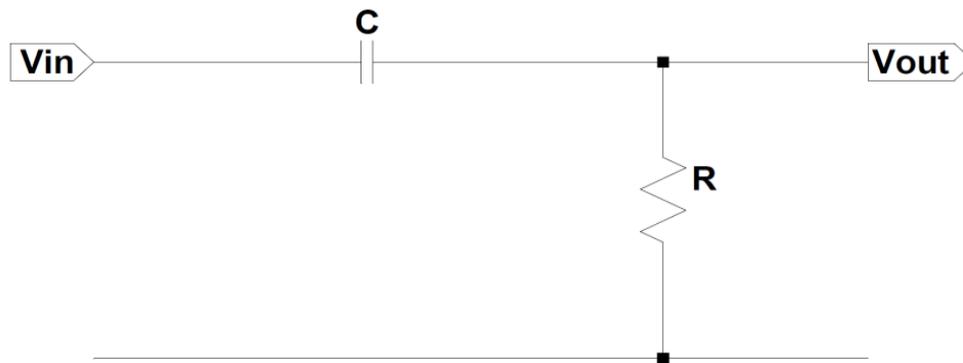


Figura 2.22: Circuito passa-altas

2.12 DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL

Uma distorção na forma de onda é dita harmônica quando a deformação se apresenta de maneira similar a cada ciclo da frequência fundamental. Define-se a distorção harmônica total como a razão entre a soma das potências de todos os componentes harmônicos e a potência da frequência fundamental.

Quando a utilização ocorre em sistemas de áudio, índices menores de distorção indicam que os componentes em um alto-falante, amplificador, compressor, ou outro equipamento, produzem uma reprodução mais limpa e fiel do áudio da gravação original (SLONE, 2001).

À medida que um sinal é injetado em um sistema não linear, como no caso do compressor desenvolvido, o sinal sofre alterações, entre elas, algum nível de

conteúdo adicional proveniente da adição das frequências harmônicas originais. Diz-se que o THD é uma medida desse nível de distorção do sinal, definido por:

$$\text{THD}_F = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \quad (2.19)$$

Onde V_n é a tensão RMS do n ésimo harmônico e $n=1$ é a frequência fundamental.

Utiliza-se uma onda senoidal pura, isto é, um tom definido simples como, por exemplo, a nota musical Lá que está na frequência de 440Hz. Define-se a medida como a razão entre a frequência da amplitude RMS de um conjunto de frequências harmônicas mais altas e a amplitude RMS em termos do tom fundamental.

Em projetos de amplificadores de áudio de alta fidelidade, busca-se encontrar pontos de operação com a menor distorção possível. Já em projetos de amplificadores e compressores *vintage*, no qual o compressor desenvolvido neste trabalho está inserido, níveis altos de distorção harmônica são muito utilizados. A 2.23 mostra um caso idealizado de THD, em que há adição de harmônicos nas frequências fundamentais (SLONE, 2001).

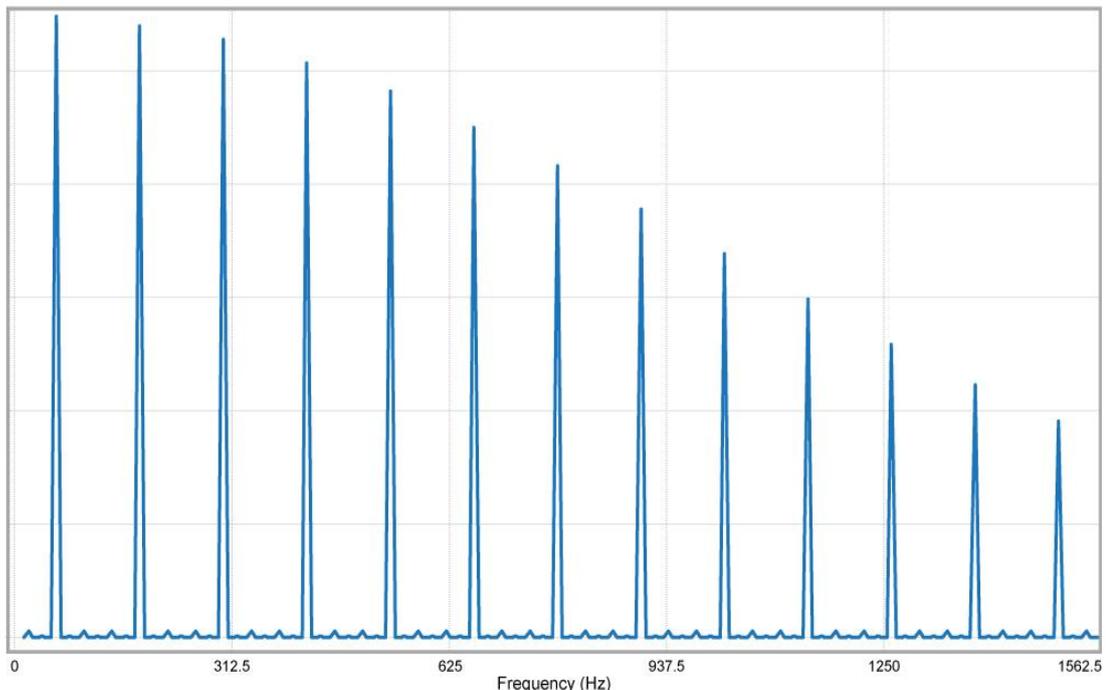


Figura 2.23: Caso idealizado de THD

Deve-se ressaltar que em termos de sonoridades agradáveis ao ouvido humano, as componentes ímpares devem possuir quantidade mínima ou será produzido um som “rachado” e desagradável, como já citado anteriormente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O circuito de compressão de áudio valvulado foi projetado e testado em laboratório. O circuito é uma variação do circuito comercializado pela Lisciel equipos cujo nome é Maletomp. Os materiais utilizados possuem valores amplamente encontrados na literatura da área, seja em textos técnicos como acadêmicos. Para montagem do circuito, dividindo-o em partes (estágios do circuito), temos:

3.1 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO

- 2 transformadores de 220/127 para 6v+6v
- 3 capacitores de 180 μ F
- 1 resistor de potência 2k2 Ω de 5W
- 1 resistor de 100k Ω
- 1 diodo Zener modelo 1N5378B
- 1 resistor de 10 k Ω de cerâmica com 10W

3.2 CIRCUITO DE COMPRESSÃO

- 1 transformador de entrada de linha 4:2
- 1 válvula duplo triodo 12AX7
- 4 resistores de 100 Ω
- 2 resistores de 330 Ω
- 1 resistor de 1k Ω
- 2 resistores de 4k7 Ω
- 2 capacitores de 0.1 μ F
- 1 potenciômetro duplo de 100 Ω

3.3 CIRCUITO DE AMPLIFICAÇÃO

- 1 transformador de saída de linha 4:1
- 2 resistores de 100k Ω

- 2 resistores de $8k\Omega$
- 2 capacitores de $0.22\mu F$
- 1 válvula duplo triodo 12AT7
- 2 capacitores de $4.7\mu F$

3.3 CIRCUITO DE *DETECTOR*

- 2 diodos de alta retificação 1N4148
- 1 resistor de $1M\Omega$
- 1 resistor de $1k\Omega$
- 1 capacitor de $1\mu f$
- 1 potenciômetro duplo de $100k\Omega$

O procedimento para construção de um circuito compressor subentende o projeto de estágios de amplificação. O procedimento em ambos os estágios para obtenção dos valores partiu do seguinte modelo:

- estimativa de um valor de ganho de tensão requerido da válvula;
- determinação de um valor tensão DC para polarização da válvula;
- medição dos valores de tensão no ânodo;
- cálculo do valor do resistor de ânodo (*plate*);
- desenho da reta de carga no gráfico $I_p \times V_p$;
- cruzamento da linha vertical a partir do ponto de tensão de ânodo;
- cruzamento da linha horizontal a partir do ponto de intersecção anterior;
- cálculo do resistor de cátodo;
- medições dos valores reais.

No primeiro estágio, o de compressão, projeta-se um ganho na casa dos 10V/1V, um ganho de tensão baixo, visto que o objetivo é situar o ponto de operação em uma região capaz de trazer o ponto para perto do ponto de corte, gerando o

processo de compressão sem a geração de quantidade significativa de amplificação e distorção.

A escolha pelo valor do ganho segue a lógica encontrada em alguns dos compressores mais famosos da área. A partir da determinação do valor de ganho de tensão estimado, calcula-se uma tensão de *plate* adequada ao circuito. Para tanto, deve-se levar em conta o tipo de acoplamento que haverá entre os estágios do circuito como um todo. O acoplamento utilizado é do tipo AC e a escolha do valor de tensão de ânodo é em torno de 90V ou similar. A partir desta determinação, para o caso da válvula 12AX7, calcula-se o valor do resistor de *plate* (R_p) por meio da equação 3.1.

$$A = \frac{\mu \times R_p}{r_p \times R_p} \quad (3.1)$$

Onde μ representa a capacidade da válvula de prover uma certa quantidade de ganho. Tipicamente em uma válvula 12AX7 os valores de μ ficam em torno de 80-100, o que deve ser usado apenas como estimativa e verificado experimentalmente; r_p representa a resistência interna da válvula em projetos AC; A é o ganho desejado.

Em consulta ao *datasheet* da válvula 12AX7, obtém-se para um valor de tensão de *plate* próximo a 100V, os seguintes valores.

r_p	μ	A
80000	100	10

$$R_p = \frac{80000 \times 10}{(100-10)} = 8,88k\Omega$$

Aproxima-se o R_p para o valor comercial de 10k Ω , o que corresponde a um ganho de tensão de 11,11, próximo o suficiente para teste.

PLATE CHARACTERISTICS

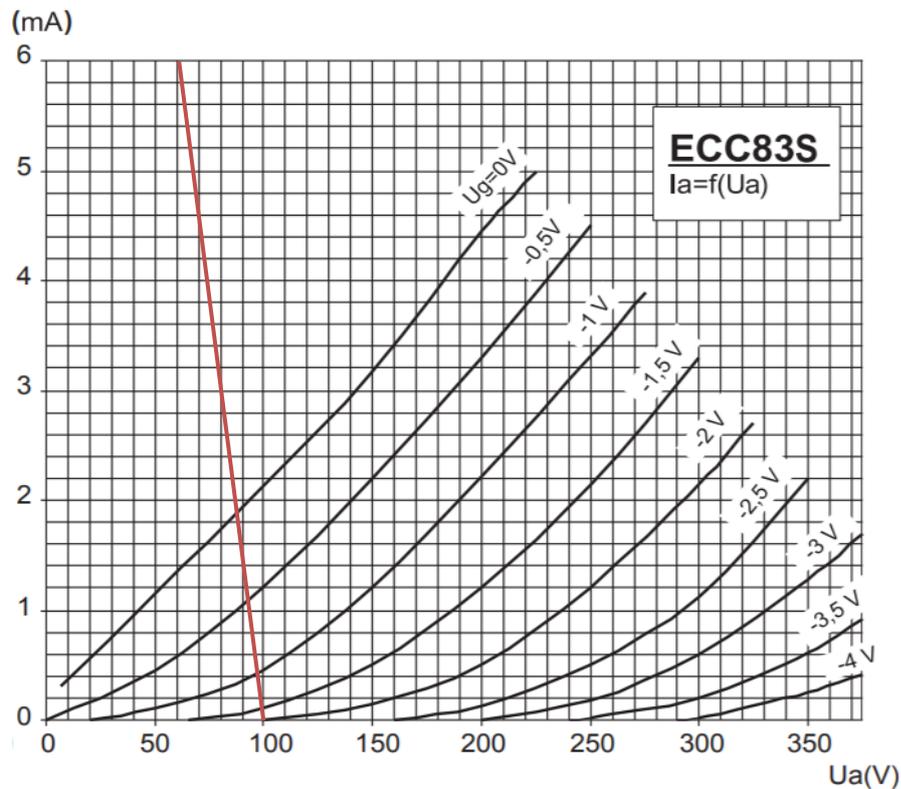


Figura 3.1: Curva de corrente x tensão de ânodo de 12AX7

Em seguida, utiliza-se a curva de corrente e tensão de ânodo, da figura 3.1, para esboçar uma reta de carga. A reta de carga deve ser uma linha reta ligando o 100V (tensão de ânodo de projeto) com o resultado de $\frac{B}{R_p} = \frac{100V}{10k\Omega} = 10mA$, onde B é a tensão de ânodo de projeto e R_p é a resistência de ânodo.

Utiliza-se, portanto, a curva -0,5V para tensão de grade (V_g). Traçando uma linha horizontal a partir do ponto de intersecção na curva de 0,5V, chega-se ao valor de 1,5mA para corrente de ânodo (I_{pq}). Este é o método mais utilizado para determinação do ponto de operação. Por seguinte, calcula-se o valor de R_k , resistor de cátodo, por meio da fórmula $R_k = \left| -\frac{V_g}{I_{pq}} \right|$. Obtém-se o resultado de $R_k = \left| -\frac{0,5V}{1,5mA} \right| = 333,3k\Omega$.

Continua-se o processo por meio de montagem para averiguação dos resultados. Em termos de simulação, os resultados apresentam valores genéricos no

software *Multisim* 12. Opta-se, portanto, por abordar a montagem física e testar os valores projetados, porém, antes, projeta-se o segundo estágio, de amplificação, cujo ganho de tensão será mais elevado em relação ao anterior e menos rígido em termos de valor de fixação de ponto de operação.

O processo de polarização é idêntico ao anterior. Primeiramente, escolhemos certo ganho de tensão, em torno de 20 a 30 de ganho de tensão, já prevendo perda em dB's na saída do último transformador do circuito. Calcula-se o valor do resistor de *plate* por meio da equação 3.2.

$$A = \frac{\mu \times R_p}{r_p \times R_p} \quad (3.2)$$

Em que μ representa a capacidade da válvula de prover uma certa quantidade de ganho. Tipicamente, em uma válvula 12AT7, os valores de μ ficam em torno de 60; A é o ganho desejado e r_p representa a resistência interna da válvula em projetos AC.

O cálculo dos valores retorna o seguinte resultado:

$$R_p = \frac{12000 \times 24}{60 - 24} = 8k\Omega$$

Escolhe-se o valor comercial de $8k2\Omega$, o que corresponde a um valor de 24,35 de ganho de tensão.

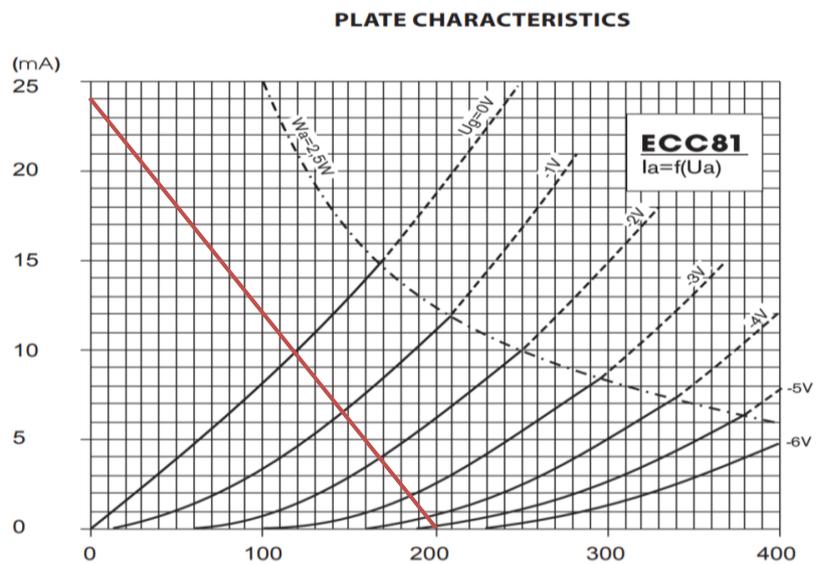


Figura 3.2: Curva de corrente x tensão de ânodo de 12AT7

Por seguinte, utiliza-se a curva de corrente e tensão de ânodo mostrada na figura 3.2 para esboçar uma reta de carga, que deve ser uma linha reta ligando o 200V com o resultado de $\frac{B}{R_p} = \frac{200V}{8K2\Omega} = 24mA$. Portanto, a curva escolhida em questão é a de -1V para tensão de grade (V_g). Traçando uma linha horizontal a partir do ponto de intersecção na curva de -1V, chega-se ao valor de 7mA para corrente de ânodo (I_{pq}). Por seguinte, calcula-se o valor de R_k (resistor de cátodo) por meio da fórmula $R_k = \left| -\frac{V_g}{I_{pq}} \right|$, obtendo-se o resultado de $R_k = \left| -\frac{1V}{7mA} \right| = 142,85\Omega$.

A partir das estimativas dos valores foi montado o circuito, e testado o funcionamento em osciloscópios do *software Pro-tools*. A seguir foto do processo de montagem do início do circuito de alimentação, figura 3.3, até a montagem final, figura 3.4, com alguns dos valores projetados inicialmente sofrendo algumas alterações baseadas no aspecto sonoro desejado na peça.

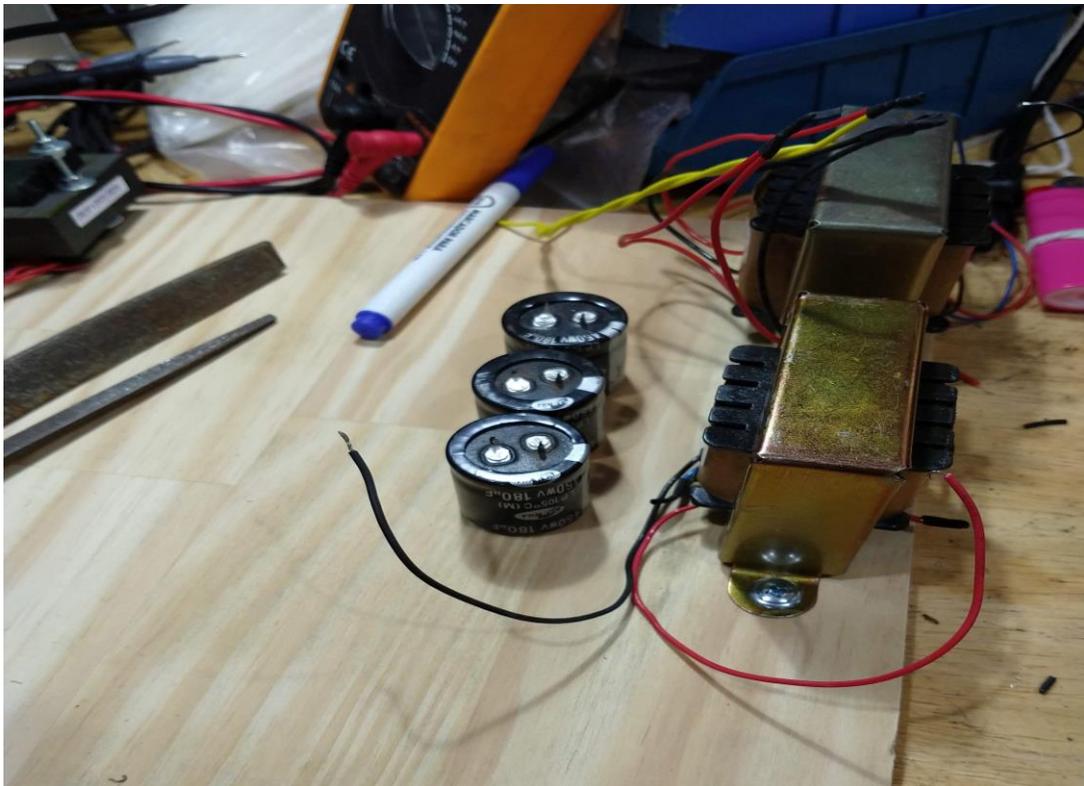


Figura 3.3: Montagem inicial

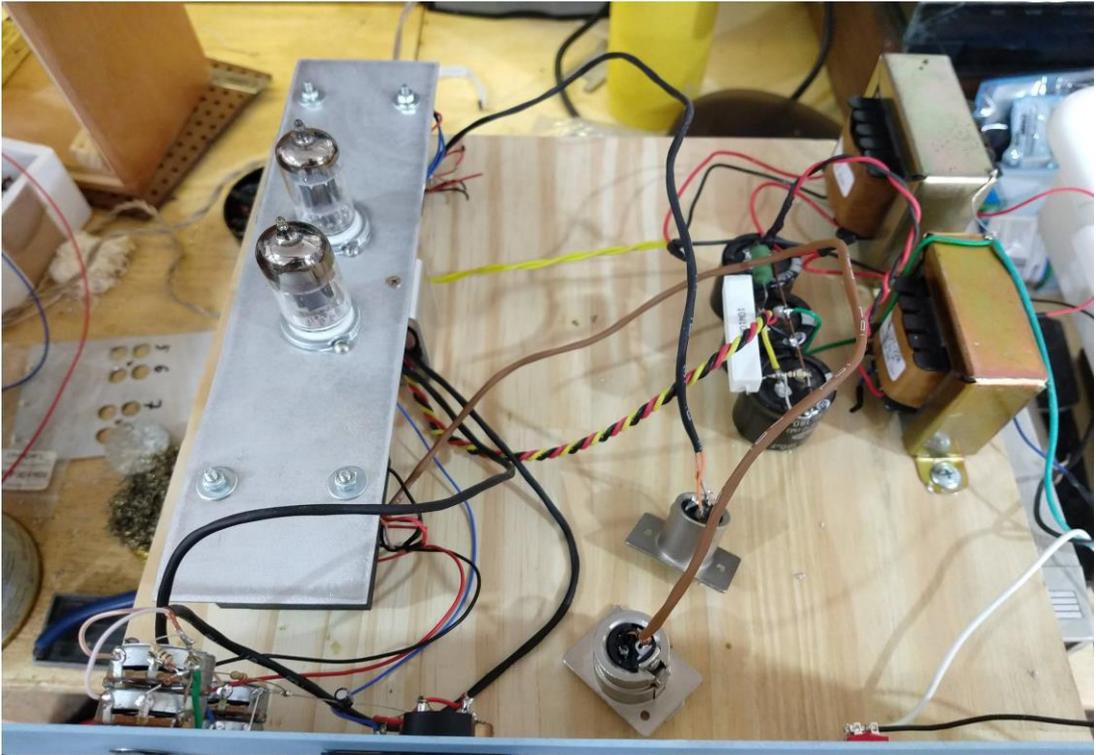


Figura 3.4: Montagem finalizada

As alterações realizadas ao longo da montagem se limitam a valores de resistores e capacitores, e estão detalhados no capítulo seguinte que trata sobre os diferentes estágios do compressor valvulado. O circuito de *sidechain* teve seus valores baseados no *datasheet* de compressores valvulados famosos como o UAD175B e Teletronix LA-2A.

4. ANÁLISE DO CIRCUITO PROPOSTO

4.1 ESTÁGIO DE ALIMENTAÇÃO E POLARIZAÇÃO

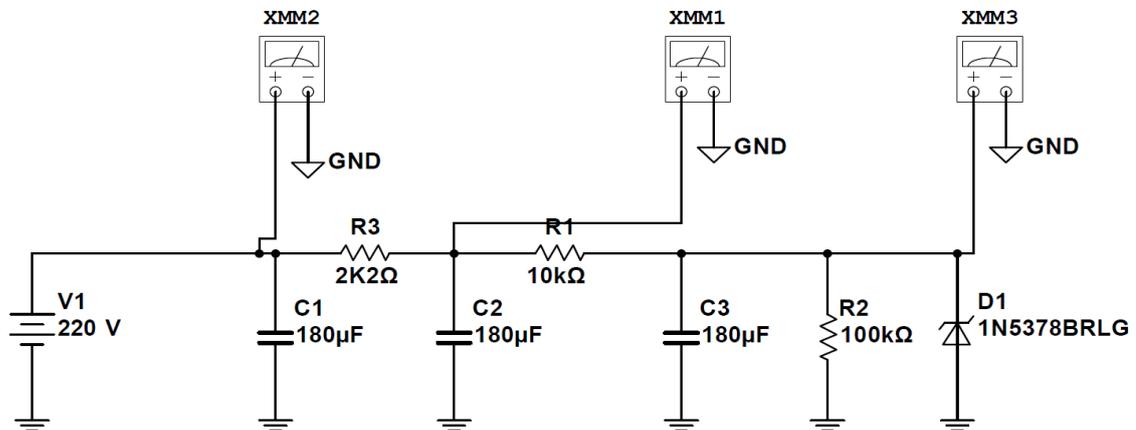


Figura 4.1: Circuito de alimentação e polarização

A alimentação do circuito de compressão caracteriza-se pela montagem do circuito apresentado na figura 4.1. A alimentação é de 220V, podendo haver troca para 110V por mudança na saída dos transformadores. O circuito de alimentação e polarização caracteriza-se como um circuito de fonte simples utilizado para estabelecer os valores de tensão DC necessários para a polarização das válvulas em cada um dos seus estágios. Como calculado anteriormente, o estágio de compressão, o qual utiliza uma válvula 12AX7, foi dimensionado em torno de uma tensão de 100V.

O estágio de compressão exige uma maior precisão na determinação do ponto de operação em relação ao estágio de amplificação do sinal. Utiliza-se o diodo Zener para estabilizar o ponto de operação por meio de uma topologia de regulação de tensão. Os valores dos resistores e capacitores foram selecionados por meio do método de tentativa e erro, baseando-se nos valores disponíveis em laboratório para montagem do circuito em questão.

Este tipo de circuito permite abordagem precisa em *softwares* de simulação, ao contrário dos circuitos valvulados com mais de um estágio. A *netlist* para simulação do circuito está fornecida no apêndice A. Os valores das medições na entrada do circuito (XMM2), no nó entre o resistor R3 e o capacitor C2 (XMM1) e no nó do diodo Zener (XMM3) estão apresentados na figura 4.2. Os valores

encontrados em simulação foram condizentes com os valores montados experimentalmente.



Figura 4.2: Resultados dos multímetros virtuais

4.2 ESTÁGIO DE COMPRESSÃO

O estágio inicial do circuito é o estágio de compressão do sinal, apresentado na figura 4.4, caracterizado pela saída do transformador de entrada balanceada devido à característica do circuito simétrico diferencial. Nesse circuito, aproveita-se a curva da válvula de forma a trabalhar suas características invertida e simétrica, visando a redução de distorção harmônica, já que o ouvido humano não acha agradável uma compressão de sinal acústico junto a uma forte distorção harmônica.

A utilização de um arranjo de *push-pull* logo após a saída do transformador de entrada visou a obtenção de um circuito balanceado cujo par de válvulas, que possuem sinais idênticos e invertidos em 180°, usam um mesmo resistor de cátodo sem um capacitor de *bypass*.

Assim, quando uma válvula está recebendo um sinal AC no semi-ciclo positivo, a outra válvula recebe o sinal no semi-ciclo negativo o que gera o aumento e a diminuição de condução de corrente, respectivamente. Ressalta-se que as variações de “bias” entre as válvulas tendem a reduzir a distorção. Esta é uma alternativa à utilização de capacitores de *bypass*, os quais são capacitores colocados em paralelo com o resistor de cátodo para possibilitar um caminho direto para a corrente AC até o “ground”, evitando problemas de flutuação em torno do ponto de operação estabelecido, que representa parte fundamental no estágio de compressão (JURICH, 2014).

A quantidade de espiras do transformador de entrada foi fruto de testes e dimensionamento e precisou ser encomendada especialmente para aperfeiçoar a entrada do circuito, visando a evitar o problema de filtragem de graves na entrada em função da impedância que é derivada dos outros equipamentos conectados. O sinal já entra no circuito balanceado, porém, sofre redução de -6dB dada a relação de 4000:2000 voltas no transformador de entrada. A utilização dos potenciômetros de 100k Ω deve-se à necessidade de referenciar a corrente AC de entrada e permitir, no ponto médio entre eles, a conexão do circuito de *Sidechain*.

Como já citado anteriormente, transformadores são utilizados como meio de acoplamento entre estágios do circuito, ou também como um meio para acoplamento entre um estágio final de um determinado circuito e sua carga. A utilização do transformador para aumento ou redução de tensões e correntes não é o único benefício associado à utilização na entrada do transformador de linha do circuito.

O transformador utilizado evita a necessidade de utilização de um capacitor para bloqueio de tensão, além de prover um caminho de baixa resistência para a corrente direta. As válvulas foram alimentadas diretamente na grade para mais fácil operação no ponto quiescente após a redução do sinal de entrada.

O sinal de *sidechain* do circuito detector poderia ser inserido diretamente no *center tap* de um transformador, porém isso acarretaria uma falta de controle de volume de entrada do sinal. Por isso, foram escolhidos potenciômetros de entrada, os quais visam a possibilidade de controle do ganho de volume do sinal de entrada. O potenciômetro de ganho de entrada aparece como 'GAIN' no painel de controle do compressor em sua construção física. Na figura 4.3, apresenta-se o parâmetro 'GAIN' do compressor valvulado projetado.



Figura 4.3: Parâmetro 'GAIN' do compressor valvulado

A escolha dos potenciômetros foi feita empiricamente de forma a não fornecer nenhuma carga para o circuito e ao mesmo tempo não haver geração de ruído. Observou-se que, à medida que o *knob* ia sendo controlado, uma elevada quantidade de ruído aparecia, o qual aumentava de maneira a parecer que algum cabo de ligação, seja de entrada ou de saída, estava solto.

O estágio de compressão apresenta seu comportamento devido à realimentação negativa proveniente da parte de *detector* do circuito. Isto é, essencialmente, a polarização do estágio de compressão, em torno das válvulas, se dá de forma igual ao estágio de amplificação do circuito. Portanto, o dimensionamento dos valores dos resistores e capacitores presentes no estágio de compressão segue um mesmo princípio de projeto encontrado na polarização de um estágio de amplificação básico. O estágio de compressão pode ser visto na figura 4.4.

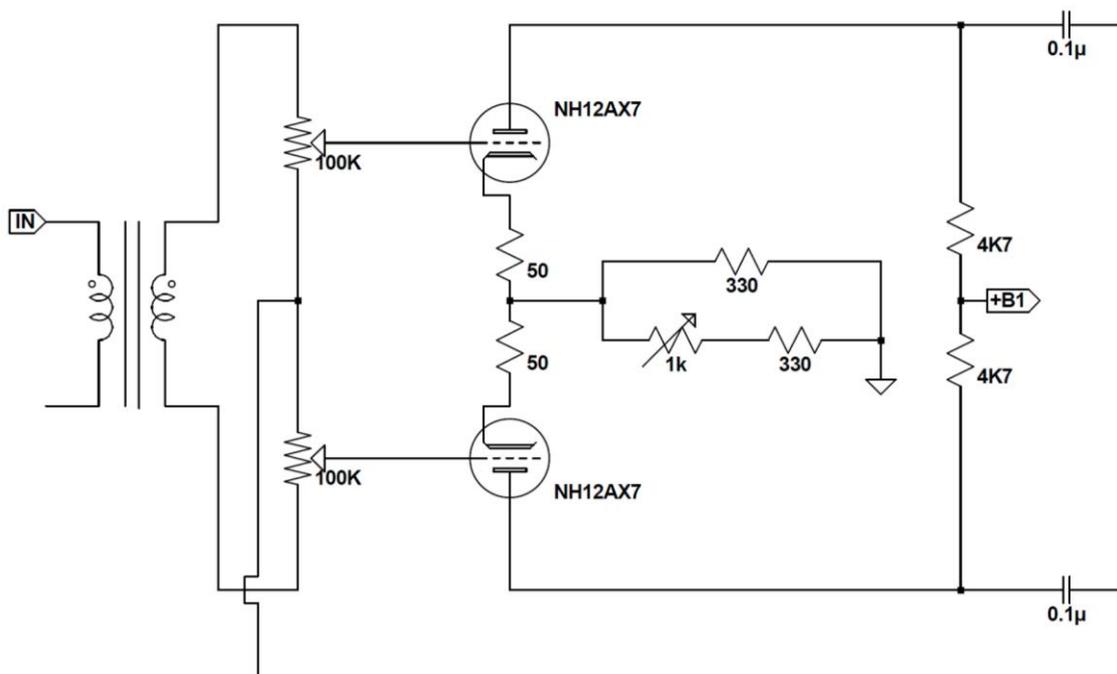


Figura 4.4: Estágio de compressão

Como a música situa-se numa área que depende fortemente da subjetividade, o trabalho de escolhas de resistores e capacitores envolve não apenas questões de

matemática pura, isto é, envolve o teste de funcionamento e avaliação do resultado dos processos em termos meramente musicais.

O processo de polarização foi amplamente discutido no capítulo anterior, em que os valores primeiramente dimensionados foram resultado de métodos de polarização de válvulas. As alterações em relação aos valores iniciais no estágio de compressão estão descritas abaixo.

Para o resistor de ânodo R_p , altera-se o valor para 4k7, em substituição ao valor de 10k Ω , visando à diminuição da distorção no sinal. A escolha gera redução de ganho de tensão. Inicialmente, tinha-se ganho de tensão na casa de 11V/V, após a troca, modifica-se o valor de ganho de tensão para aproximadamente 5,54V/V. O cálculo realizado está descrito na equação 4.1.

$$A = \frac{\mu \times R_p}{r_p \times R_p} = \frac{100 \times 4700}{80000 + 4700} = 5,5489 \quad (4.1)$$

O valor do resistor de cátodo foi projetado em torno de 333,3 Ω . A abordagem, durante a pesquisa, por arranjos possíveis de serem trabalhados, recorreu-se à consulta dos primeiros compressores famosos e seus relatórios e esquemáticos. Os valores adotados nos circuitos dos compressores Teletronix LA-2A, cuja sonoridade este trabalho procura aproximar, não apresentou a característica esperada na sonoridade. Vale ressaltar que circuitos de compressores são altamente sensíveis a mudanças em seus componentes, portanto a utilização de parte de um circuito encontrado em um Teletronix LA-2A não significa que o resultado será semelhante em determinada parte do circuito, pois o circuito como um todo é projetado de forma diferente.

Optou-se por usar os valores dos resistores, que entram na alimentação dos cátodos da válvula 12AX7, do projeto do Limiting Amplifier Model 175B da universal áudio. O *Limiting Amplifier Model 175B* é considerado por muitos como um marco na indústria de gravações musicais, pois, de acordo com o manual da própria *Universal Audio*, “o 175B é um verdadeiro compressor amplificador capaz de ganhos altos, distorções controladas e amplificação linear em níveis de volume abaixo do ponto de *threshold*”.

Os resistores escolhidos foram no valor de 47 Ω , 330 Ω , 300 Ω e 1k Ω . O potenciômetro de 1k Ω é necessário para o processo de calibragem do “Vu meter”, o

qual aparece no circuito do painel de entrada, da figura 4.3, como ZERO, em referência a um ponto qualquer em que não há compressão do sinal, e sua variação indica certa quantidade de compressão do sinal. O valor de $333,3\Omega$ projetado inicialmente sofreu ligeiro desvio, porém feito de acordo com combinações altamente funcionais. Na figura 4.5, mostra-se o arranjo montado para valor de resistência de cátodo, em recorte da figura 4.4.

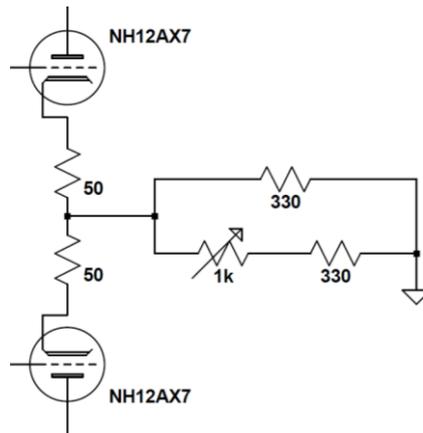


Figura 4.5: Arranjo para resistência de cátodo da 12AX7

A conexão com o estágio seguinte depende do ajuste dos valores de impedância e do correto acoplamento entre os estágios. O processo será explicado na seção do estágio de amplificação.

4.3 ESTÁGIO DE AMPLIFICAÇÃO

O estágio de amplificação é caracterizado de forma semelhante ao bloco de compressão. No entanto, algumas diferenças são facilmente percebidas, como por exemplo o nível de precisão do ponto de operação do segundo estágio, no que diz respeito à polarização, pois exige menos atenção que o caso anterior. Isto é, o ponto de operação não precisa ser tão fixo uma vez que o processo de amplificação desse estágio não necessariamente precisa apresentar grandes níveis de amplificação linear.

A escolha adequada do ponto quiescente é o início de um projeto de estágio de ganho, como apresentado no capítulo anterior. Desse modo, a partir da escolha

do ponto quiescente, todo o comportamento do circuito pode ser calculado ou, pelo menos, estimado. O ponto de escolha visou a um ganho de tensão na casa de 24V/V, com valor de resistência de ânodo no valor de 8k2Ω. O valor da resistência de cátodo adquirida no projeto foi de 142,85Ω.

Pode-se optar, porém, pela não utilização de resistores de cátodo neste estágio uma vez que a classe de amplificação A em *push-pull* possibilita a polarização das válvulas em torno de um ponto de polarização razoável. Ao longo do desenvolvimento, foram testados dois tipos de topologias. Com a utilização de resistores no cátodo, e a não utilização de resistores, ligando apenas ao “ground” do sistema. O resultado que apresentou maior efeito sobre a característica de saturação do sinal foi o arranjo conectado ao *ground*. Na figura 4.6, vê-se a topologia adotada em um recorte do circuito de polarização do estágio de amplificação, da figura 4.8.

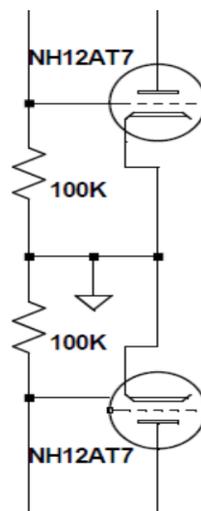


Figura 4.6: Arranjo para resistência de cátodo da 12AT7

Ao contrário do desenvolvimento do estágio de compressão, escolhe-se um ponto de operação mais próximo da região de saturação da curva de transferência de uma válvula, de modo a valorizar o ganho de harmônicos pares no sinal comprimido.

O circuito poderia ter um driver entre os estágios. Porém, foi utilizada a conexão direta entre a saída da 12AX7 e a 12AT7, que é válvula de saída.

Referencia-se a entrada do sinal, advindo do estágio de compressão, por meio de resistores de 100K Ω nos cátodos. Os valores do transformador de saída foram projetados em laboratório para que a saída tenha impedância baixa e um sinal alto o suficiente para chegar a qualquer *software* de gravação como Pro tools. A saída demarcada por A e B deve ser conectada a um outro estágio do circuito conhecido como *Sidechain*, ou circuito de *Detector*.

A compressão e a entrada do sinal do *Sidechain (detector)* ocorrem no estágio antecedente, o que acarreta a alteração do ponto quiescente na curva de tensão de grade vs corrente de ânodo, gerando a diminuição do ângulo da reta tangente ao ponto da curva, aproximando-se do ponto de corte da válvula, o que diminui a amplificação do sinal, gerando o processo de compressão. Na figura 4.7, vemos a curva de tensão de grade vs corrente de ânodo.

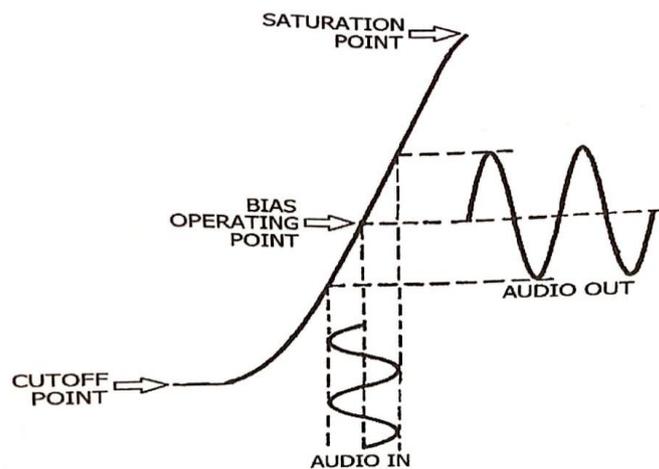


Figura 4.7: Tensão de grade x corrente de ânodo

Estas ações geram instabilidade no circuito, o que implica uma tensão de polarização bastante precisa, o que não ocorre tão bruscamente no estágio seguinte (amplificação). Os resistores de referência e os capacitores de acoplamento do sinal formam a saída deste circuito antes de entrar no último estágio, que seria o de volume. Na figura 4.8, observa-se o estágio de amplificação do sinal, em recorte logo após o estágio de compressão do sinal.

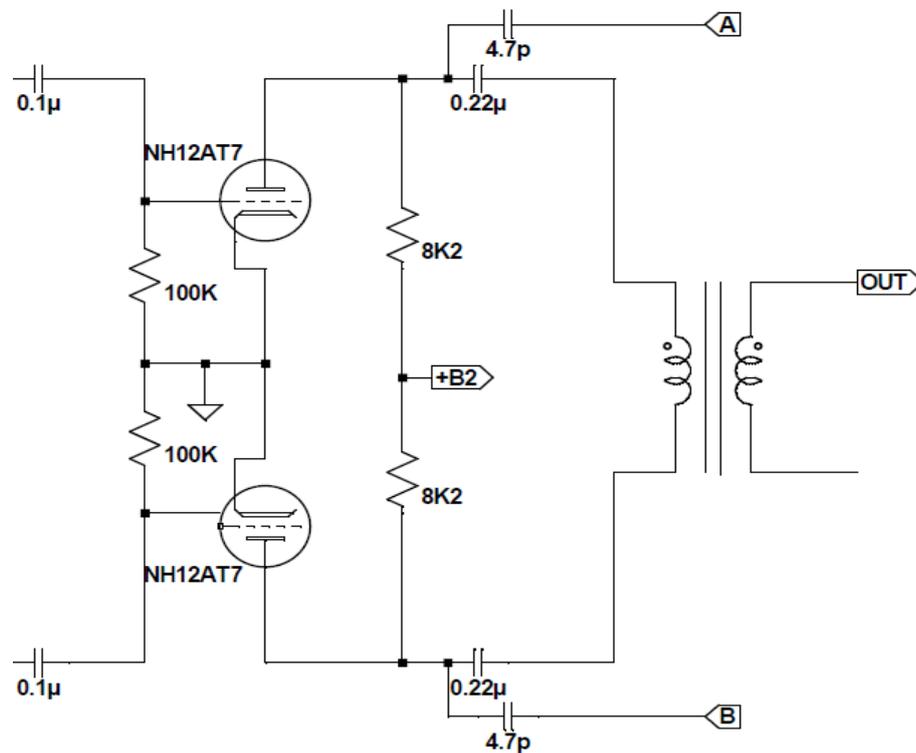


Figura 4.8: Estágio de amplificação do sinal

A conexão com um estágio final de volume seria utilizada para dar a opção de ganho ao final do processo de compressão, porém isto acarretaria na utilização de mais um estágio valvulado, semelhante à entrada do circuito em questão. Além disso, um controle de volume adequado depende da utilização de um transformador de *Center Tap*, que se provou um custo alto para o projeto desse circuito.

Por questões práticas, foi escolhido um circuito sem a opção de ganho de saída, portanto a saída do circuito de amplificação passa por um capacitor de acoplamento de $0.22\mu\text{F}$ e conecta-se ao transformador de saída de linha.

4.4 ESTÁGIO DE *DETECTOR (SIDECHAIN)*

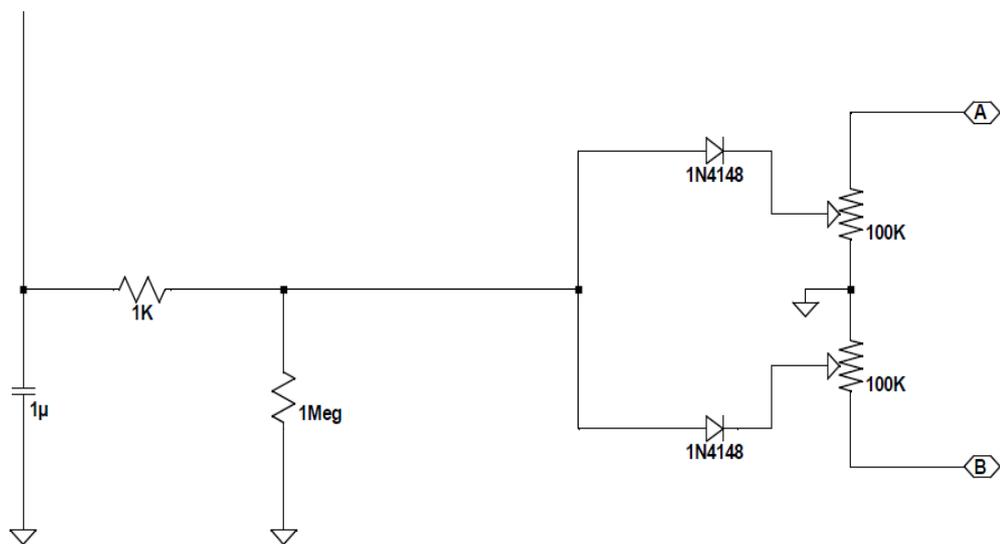


Figura 4.9: Circuito de detector

Os pontos A e B são acoplados com capacitores de 4,7pF para levar a informação AC (áudio) para o circuito de Detector, mostrado na figura 4.9. O potenciômetro de 100k Ω é utilizado para controle da quantidade de compressão no circuito. Neste estágio, utilizam-se dois diodos comuns do tipo 1N4148 a fim de fazer a retificação de onda completa no sinal do circuito, por meio de realimentação negativa. Os valores de *release* 1M Ω , e de *attack* 1K Ω definem o formato de atuação que o sinal retificado apresentará, isto é, o sinal retificado no diodo. O resistor de *release* define junto à impedância do circuito como um todo o tempo de descarga do capacitor. A escolha é feita de forma empírica em laboratório. Os valores foram também baseados no circuito do compressor 175B da universal áudio.

O circuito funciona como um detector de envelope. O sinal que passa pelos diodos retificadores gera a carga no capacitor. Por seguinte, à medida que o sinal que vem do estágio de amplificação cai abaixo do valor de pico anteriormente carregado no capacitor, ocorre a abertura do diodo. A partir disso, o capacitor se descarrega por meio dos resistores de *attack* e *release*, além de certa contribuição pela impedância total do circuito. Durante o próximo ciclo, o mesmo processo ocorre de forma que quando o sinal retificado tiver um pico que ultrapasse o anterior, ocorrerá a abertura do diodo, permitindo a passagem do sinal. O fato de o sinal ser negativo não influencia no processo realizado no detector. Caso seja utilizado o sinal

em seu ciclo positivo, a montagem gerará saturação nas válvulas e desgaste ao longo do tempo, além de comprometer o processo de compressão.

No circuito em questão, usaram-se valores fixos para *attack* e *release*. Poder-se-ia optar pela utilização de potenciômetros em ambos os casos, tanto para *attack* quanto para *release*, porém, foi escolhida uma sonoridade mais *vintage*. Caso escolham-se valores incompatíveis com o sistema, percebe-se que o sinal passa a aparecer com excesso de grave, gerando a sensação de um som de partida de motor de barco.

Ressalta-se que o circuito de *sidechain* (detector) é um *low filter* ou *high-pass* que acarreta o seguinte: quando há entrada de frequência grave, não há mudança significativa na intensidade destas frequências graves. Este processo não altera o sinal de saída, mas sim, o sinal que vai ser mandado para o circuito do compressor, a fim de responder com ganho de amplificação. Em caso de sinal agudo, o sinal passa e depois sofre a compressão. Caso o sinal contenha fortemente os dois casos, tanto grave como agudo, os dois sofrerão compressão em doses diferentes, por exemplo, no caso de um bumbo e uma caixa. Quando há sobra de grave no bumbo, o compressor pouco atuará, porém em caso de uma caixa com predominância de agudos, o compressor irá atuar mais fortemente.

O apêndice B mostra o esquemático de todos os estágios conectados, isto é, consiste no circuito completo desenvolvido do compressor valvulado.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DE COMPRESSÃO

5.1.1 Compressor analógico aplicado ao vocal



Figura 5.1: Formato de onda de trecho do vocal sem uso do compressor

Os resultados foram adquiridos por meio dos *softwares s(M)exoscope, Spectrum e Brainworx BX Meter* ao longo de toda análise de resultados do capítulo 5. Os *softwares* escolhidos para análise são utilizados em ambientes de engenharia e produção musical.

A figura 5.1 representa o formato de onda de um trecho do vocal utilizado antes do funcionamento do compressor. Observa-se que os picos dos transientes da voz estão em evidência em alguns pontos. Trata-se de um vocal de pouca dinâmica, isto é, a diferença entre as partes mais altas e as partes mais baixas é pequena.



Figura 5.2: Formato de onda de um trecho do vocal com uso do compressor

A figura 5.2 representa o trecho mostrado anteriormente comprimido pelo compressor. No caso de vocais, o compressor é altamente musical devido ao seu funcionamento valorizar o transiente inicial, de forma que o intervalo entre os outros picos depois do inicial diminuam consideravelmente, sem fazer com que o transiente inicial exceda um valor de volume adequado ao ouvido.

Antes da compressão do vocal, o *plugin* de medição de RMS apontava para um valor de -16,9. Após a compressão do sinal, para o mesmo valor de entrada de ganho, observa-se um valor de -21,7. Representa uma redução de RMS no valor de 4,8.

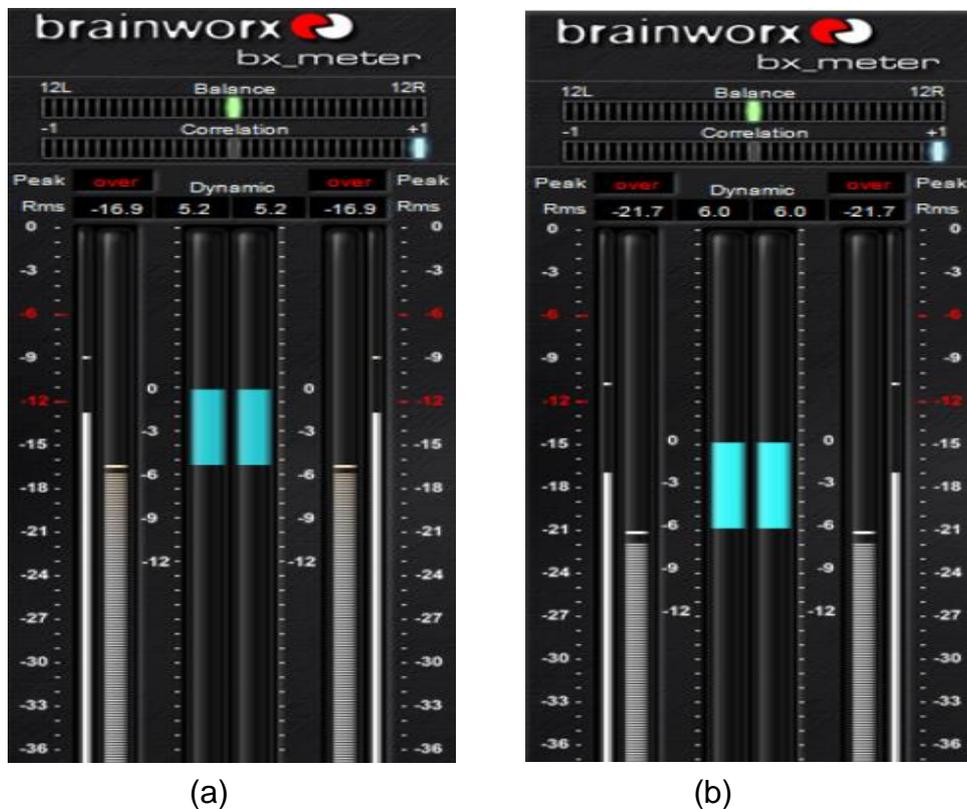


Figura 5.3: Medição de RMS: (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão

5.1.2 Compressor analógico aplicado à caixa de bateria

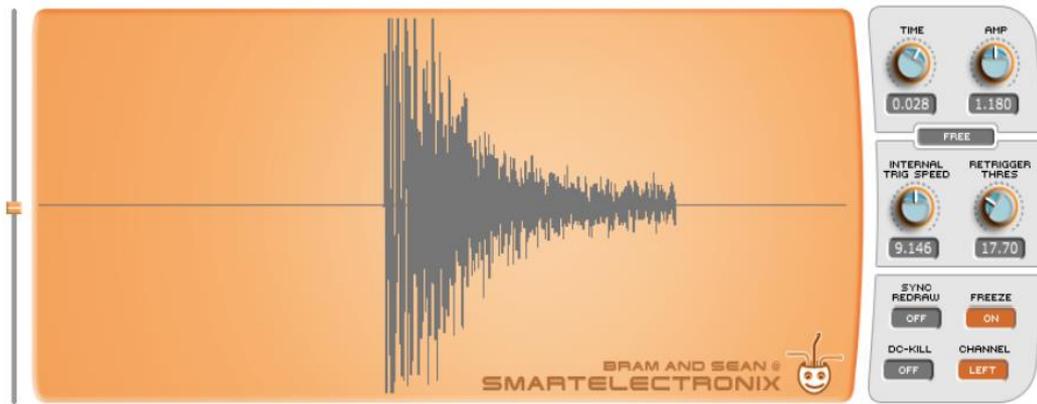


Figura 5.4: Formato de onda de um trecho da caixa de bateria sem uso do compressor

A figura 5.4 representa a caixa de uma bateria cujo *sample* foi utilizado ao longo de toda a análise de resultados. Observa-se que o transiente inicial possui elevado pico, o que dá uma sensação de que a caixa de bateria está frouxa após o início do som. A compressão é utilizada para diminuir o intervalo dos transientes próximos ao primeiro transiente, de forma a deixar o som mais “firme”.

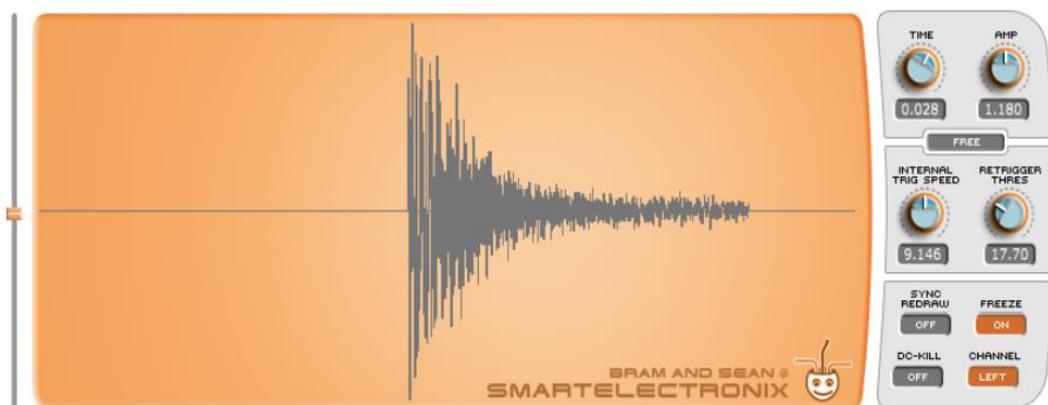


Figura 5.5: Formato de onda de um trecho da caixa de bateria com uso do compressor

A figura 5.5 demonstra que o início do som é mantido praticamente inalterado, porém, o som sofre grande diminuição após o transiente inicial, o que garante maior “firmeza” ao som da caixa de bateria. Em termos de valores, inicialmente o medidor de RMS aponta para um valor de -22,8. Após o processo de compressão, o medidor aponta para o valor de -25,4. O processo gerou redução de 2,6 em RMS.

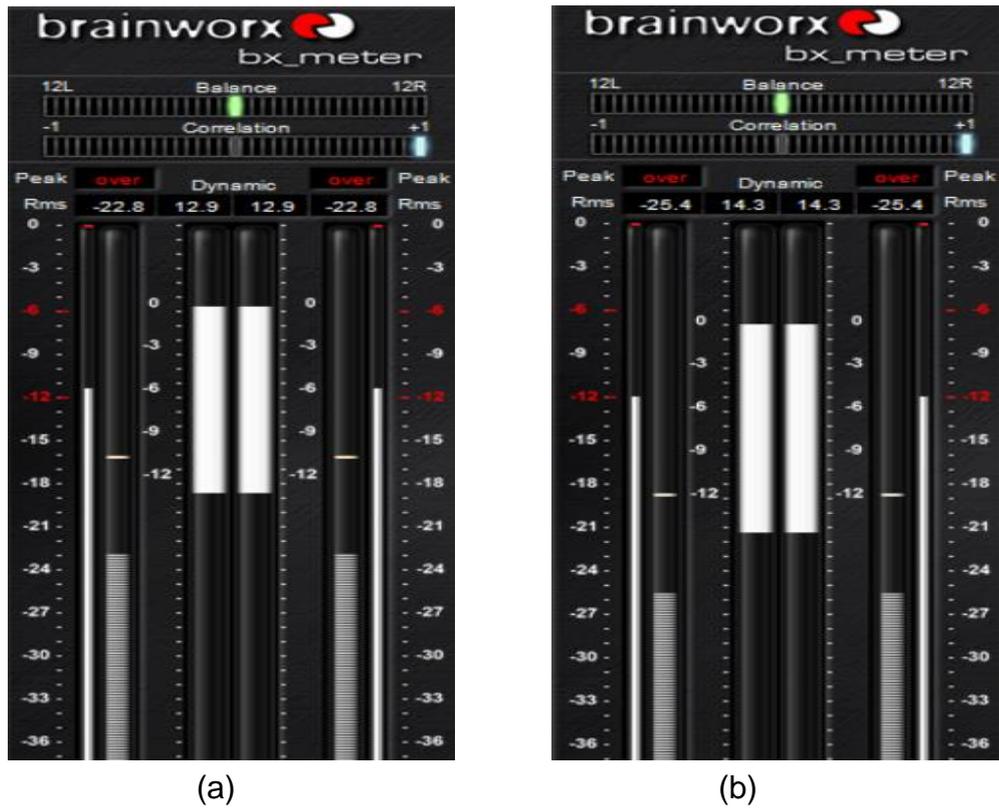


Figura 5.6: Medição de RMS: (a): Antes da compressão; (b) Depois da compressão

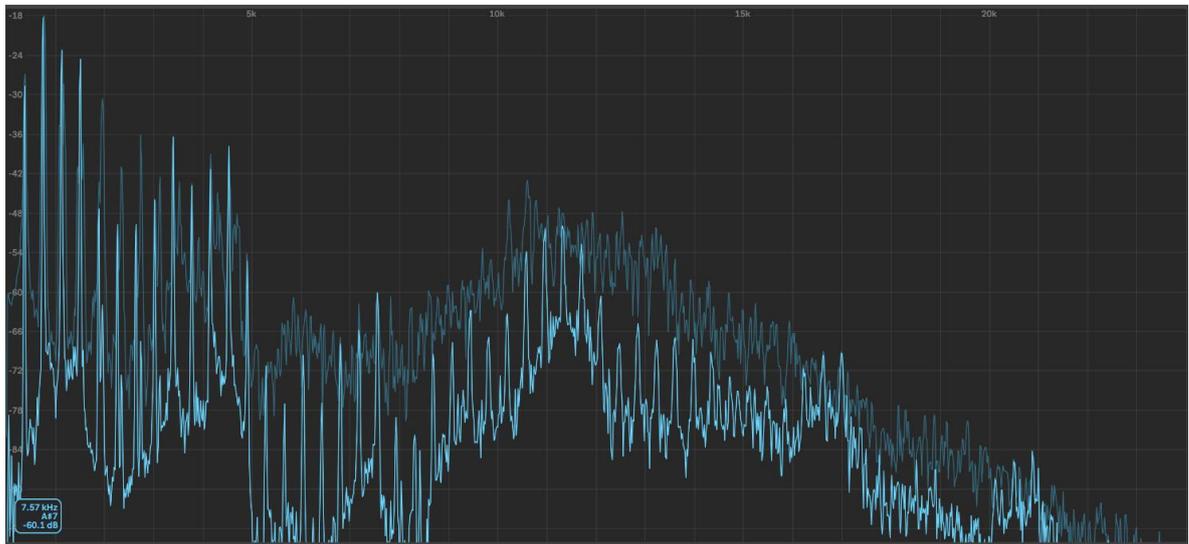


Figura 5.7: Espectro de frequências da voz antes da compressão

O espectro de frequências da voz pode ser visualizado na figura 5.7. O valor de -60.1dB na frequência de A#7 é utilizado para comparação com o valor neste pico após a compressão.

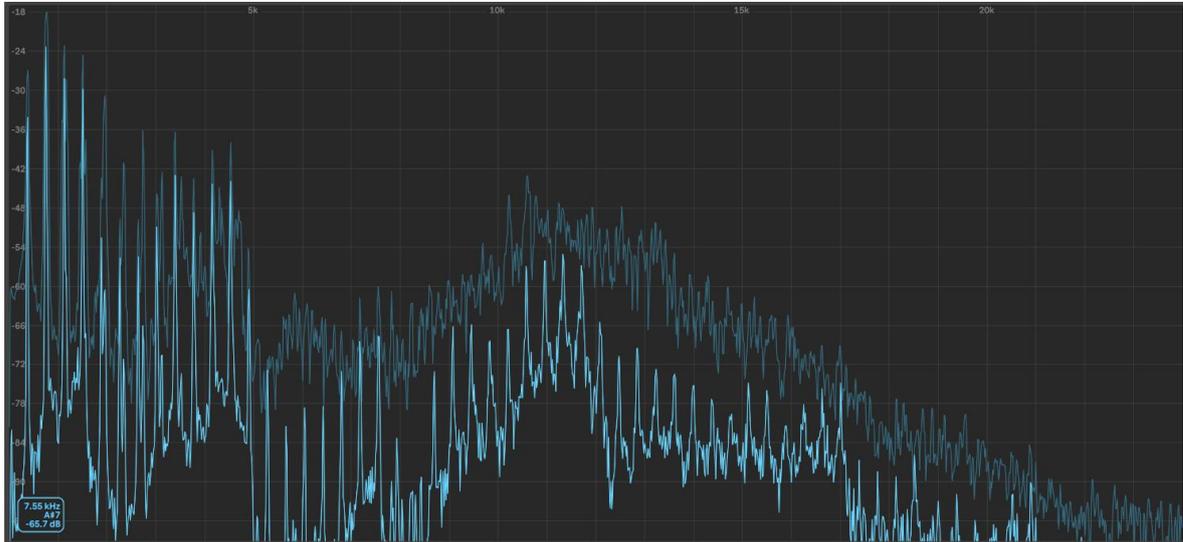


Figura 5.8: Espectro de Frequências da Voz Depois da Compressão

Após a compressão, na frequência de A#7, há redução de -5.6dB, o que indica um trabalho preciso do compressor ao longo de toda a ampla gama de frequências, conforme figura 5.8. Isto é, os valores em todas as frequências tendem a ter atenuação parecida nos picos ao longo de toda a gama de frequências. O resultado de projeto esperado está de acordo com o projetado em termos de funcionamento baseado no parâmetro *Threshold*, que, mantido em determinado ponto de escolha de seu potenciômetro, possui razão definida para comprimir valores que excedem determinado valor projetado.

Vale ressaltar que devido à complexidade dos valores que entram em um compressor de áudio, a escolha de um valor de *Threshold* é definido em teste por análise de redução de valores em RMS, e a escolha dos valores do potenciômetro do knob de compressão (no caso de 100k) apenas referenda uma intenção de redução sonora adotado pelo autor do texto.

5.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO DO *PLUGIN* PUIGCHILD 660

5.2.1 Aplicado ao vocal



5.9: Formato de onda de vocal, passando pelo *Plugin* Puigchild 660, sem uso do compressor

O *plugin* Puigchild 660, um emulador clássico do Fairchild 670, foi escolhido para se fazer uma comparação com o compressor desenvolvido, dada sua história que remonta à década de 50 e às gravações em vinil. A figura 5.9 apresenta a forma de onda do vocal utilizado sem nenhum tipo de compressão já passando pelo circuito do Puigchild 660.

Na figura 5.10, vê-se a forma de onda do vocal após o processo de compressão pelo *plugin* em questão.



Figura 5.10: Formato de onda de vocal, passando pelo *Plugin* Puigchild 660, com uso do compressor

Na figura 5.10, percebe-se que a compressão pelo *plugin* mostra-se mais intensa em relação à compressão realizada pelo console analógico desenvolvido. Observa-se, porém, a preservação dos transientes iniciais e forte compressão após o primeiro *bounce* de vocal possui -15,3. Quando realizada a compressão, percebe-se o valor reduz para -22,8, que corresponde a uma redução de 7,5.

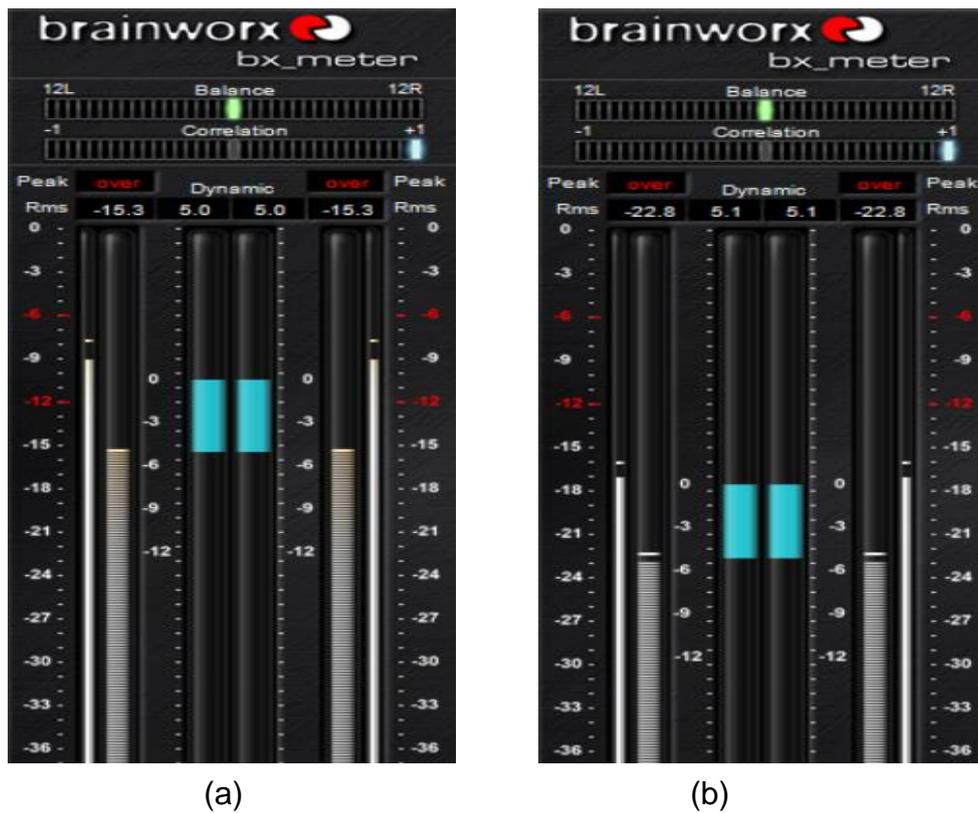


Figura 5.11: Medição de RMS, com *Plugin* Puigchild 660, aplicado ao vocal: (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão

5.2.2 Aplicado à caixa de bateria

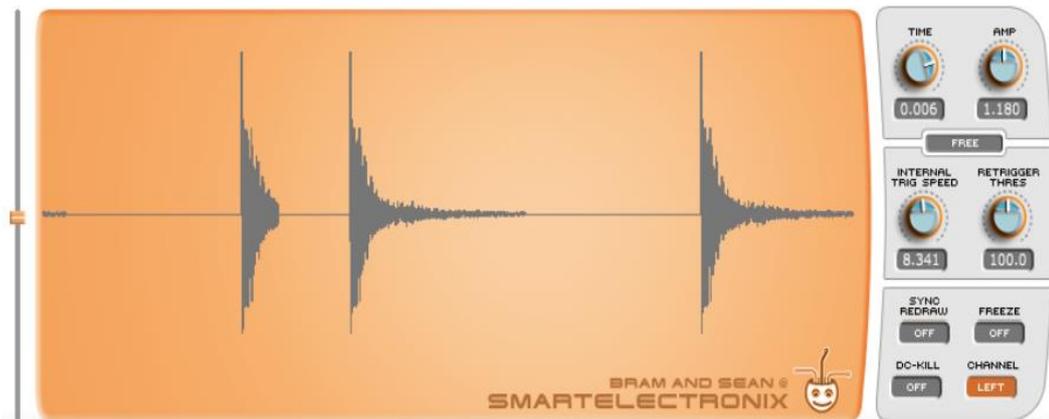


Figura 5.12: Formato de onda de caixa de bateria, passando pelo *Plugin* Puigchild 660, sem uso do compressor

A caixa de bateria, que passa pelo circuito do Puigchild 660, está representada, na figura 5.12, sem nenhum nível de compressão. Na figura 5.13, vemos a caixa de bateria após a compressão.

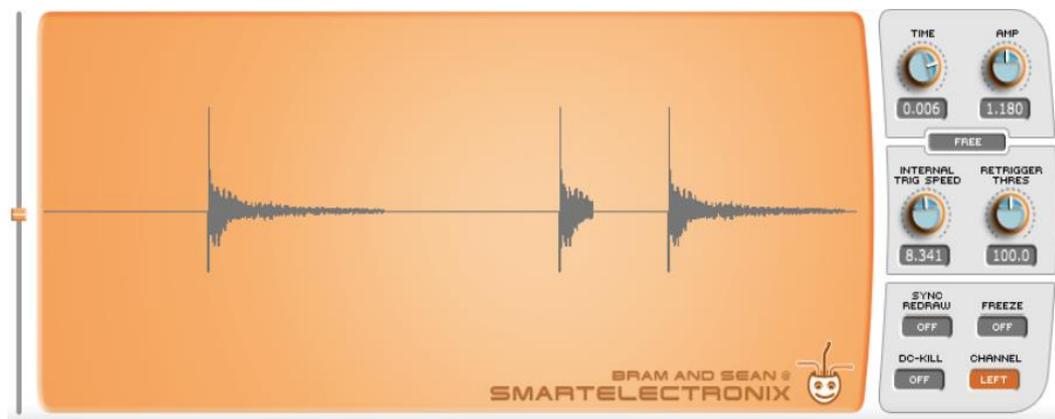


Figura 5.13: Formato de onda de caixa de bateria, passando pelo *Plugin* Puigchild 660, com uso do compressor

A figura 5.13 ilustra a ação dos compressores valvulados em questão. Preserva-se o *attack* inicial (transiente), ainda que possa haver redução de volume em relação à entrada do sinal, de maneira a comprimir logo em seguida ao início do som. A característica marcante deste tipo de compressão é uma sonoridade natural e cristalina, com sensação de maior brilho à peça comprimida.

Em termos de RMS, a caixa de bateria apresenta redução no valor de -7,4, semelhante à compressão no vocal escolhido. O valor de RMS passou de -23,4 para -30,8.

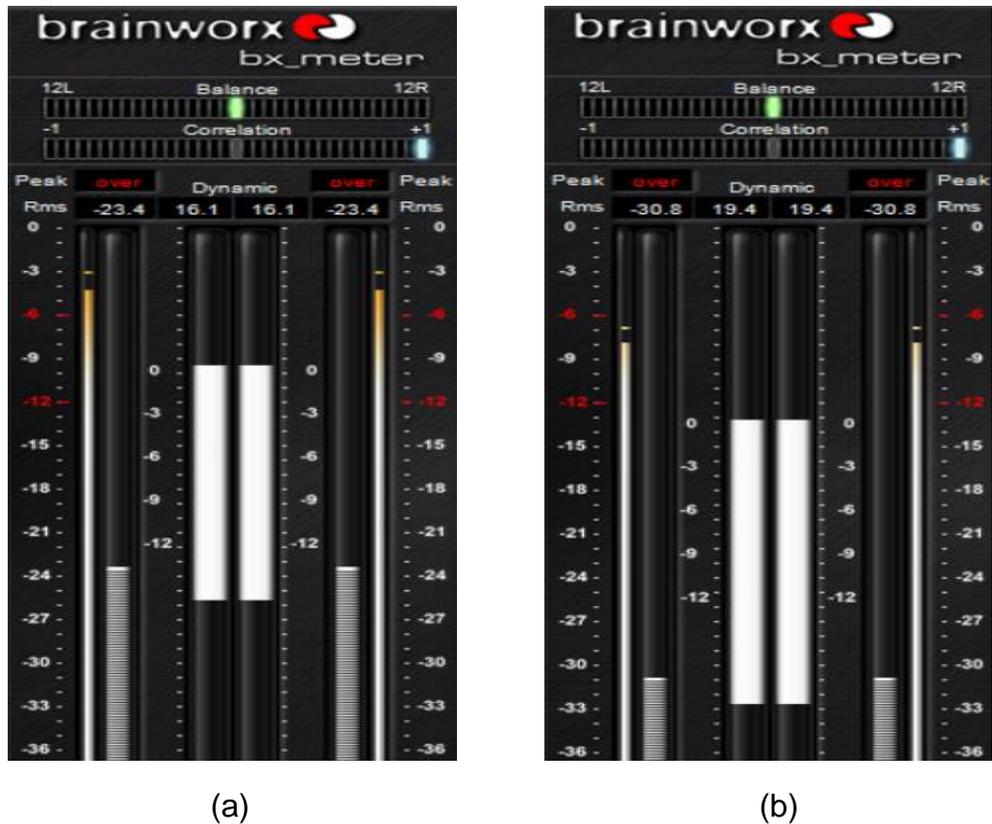


Figura 5.14: Medição de RMS, com *Plugin* Puigchild 660, aplicado à bateria: (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão

A análise de frequências do processo de compressão da caixa de bateria pelo *plugin* Puigchild 660, na frequência de A#3, mostrou-se uma boa forma de análise do processo de compressão. Na figura 5.15, vemos que na frequência A#3, o valor é de -36,3dB. Após a compressão, figura 5.16, observa-se que o valor em torno de A#3 reduziu para -44dB. Ou seja, houve redução de 7,7dB, o que junto ao restante do espectro, representa ótima linearidade na ação do circuito de compressão do Puigchild 660.

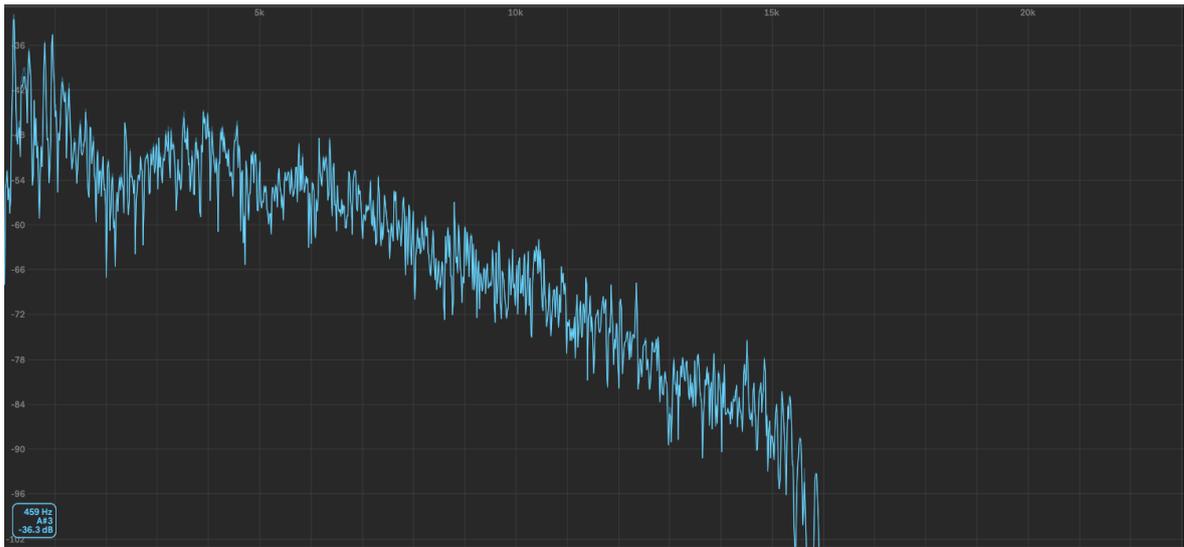


Figura 5.15: Espectro de frequências da voz, passando pelo *Plugin Puigchild 660*, antes da compressão

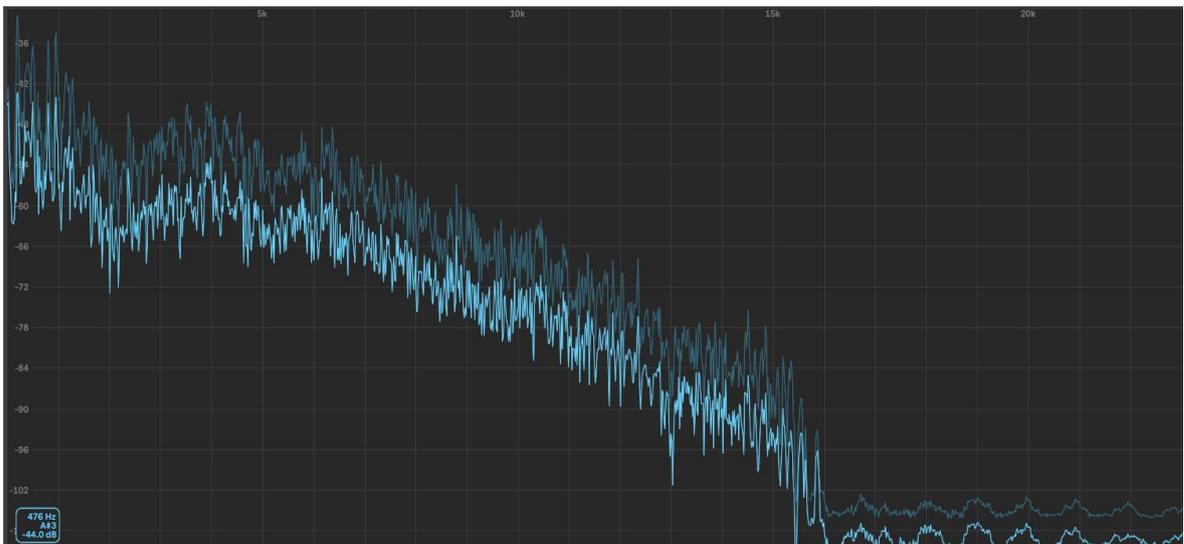


Figura 5.16: Espectro de frequências da voz, passando pelo *Plugin Puigchild 660*, depois da compressão

Em comparação com o compressor analógico desenvolvido, o Puigchild 660, apresenta maior grau de compressão, ou seja, consegue comprimir mais bruscamente o sinal que passa em seu circuito. Em termos de controle do ganho de entrada, o compressor analógico consegue gerar um som mais harmonioso aos ouvidos apesar de possuir intensidade máxima semelhante.

5.3 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO DO *PLUGIN CLA2A DA WAVES*

5.3.1 Aplicado ao vocal

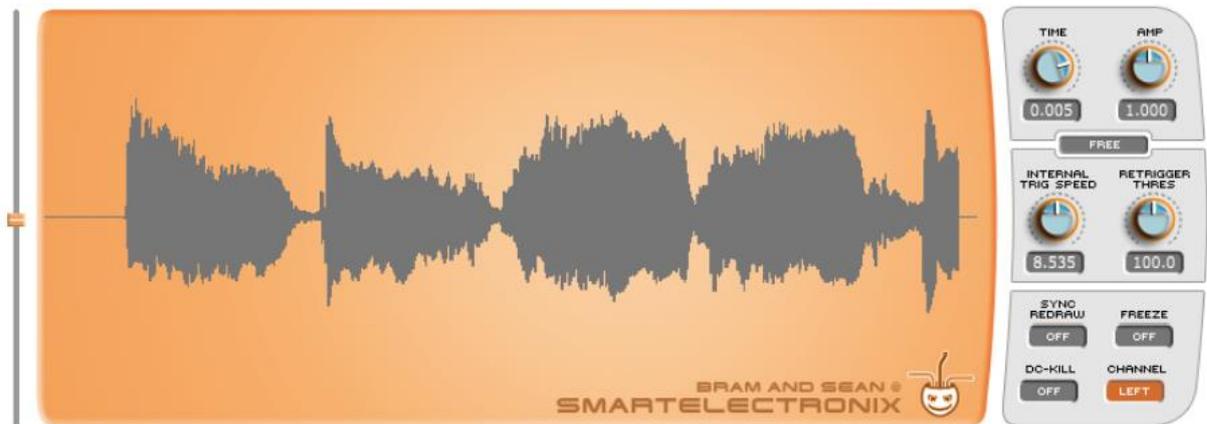


Figura 5.17: Formato de onda de vocal, passando pelo CLA2A da Waves, sem uso do compressor

A figura 5.17 apresenta a forma de onda do sinal de vocal ao passar pelo circuito do emulador de compressor LA-2A, o CLA2A da Waves. Este *plugin* emula um circuito de compressor óptico cujo funcionamento é acionado pela intensidade da luminosidade e lâmpada de fotocélula. A escolha pela análise das respostas desses compressores que pertencem à outra categoria passa pela sonoridade bastante semelhante e pela simplicidade do circuito destes compressores.

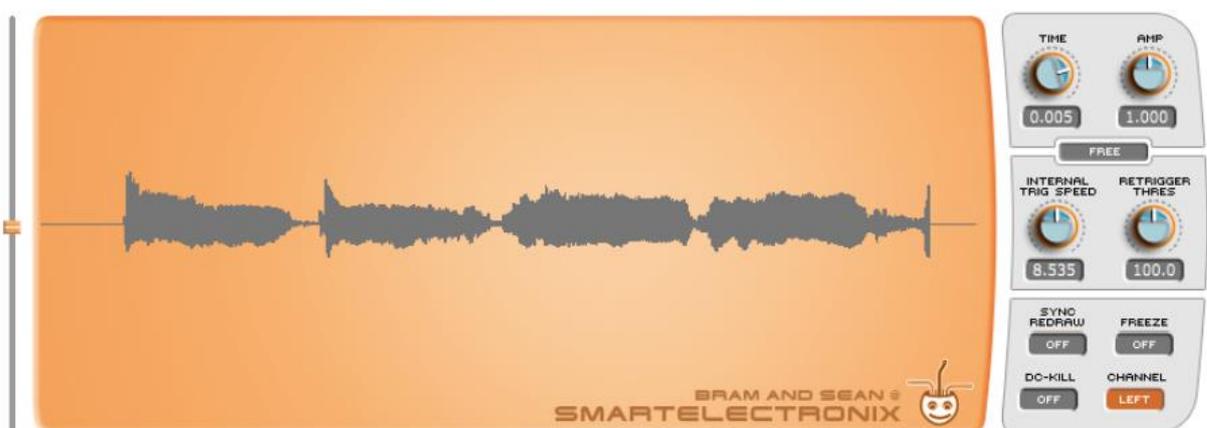


Figura 5.18: Formato de onda de vocal, passando pelo CLA2A da Waves, com uso do compressor

Na figura 5.18, vemos o sinal de voz comprimido pelo CLA2A. Percebe-se, pela análise dos transientes, que este compressor atua de forma um pouco mais rápida, comprimindo mais os picos iniciais. Porém, sua forma de compressão ainda mantém boa dinâmica em relação aos circuitos avaliados anteriormente.

Em termos de redução dos valores de RMS, há redução de 6,8, passando de -17 no sinal não comprimido para -23,8 no sinal após a compressão.

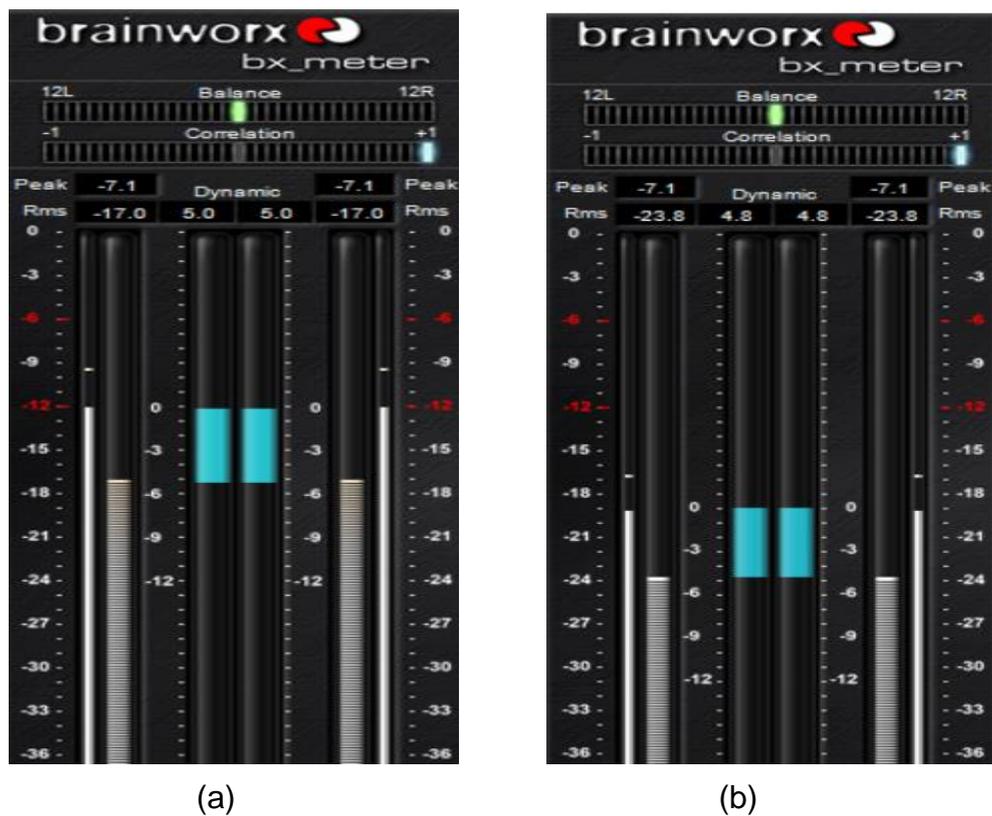


Figura 5.19: Medição de RMS, com *Plugin CLA2A* da Waves, aplicado ao vocal:
 (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão

5.3.2 Aplicado à caixa de bateria

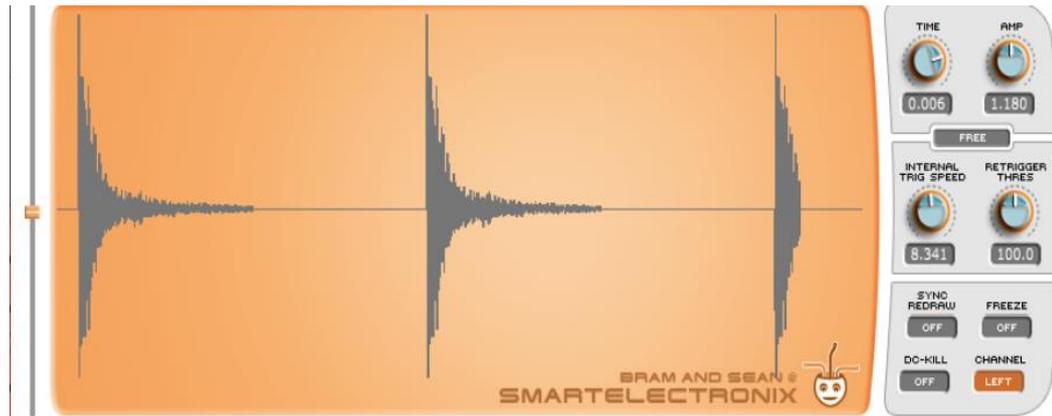


Figura 5.20: Formato de onda de caixa de bateria, passando pelo *Plugin CLA2A* da Waves, sem uso do compressor

A figura 5.20 mostra a caixa de bateria ao passar pelo circuito do *plugin* CLA2A sem o processo de compressão.

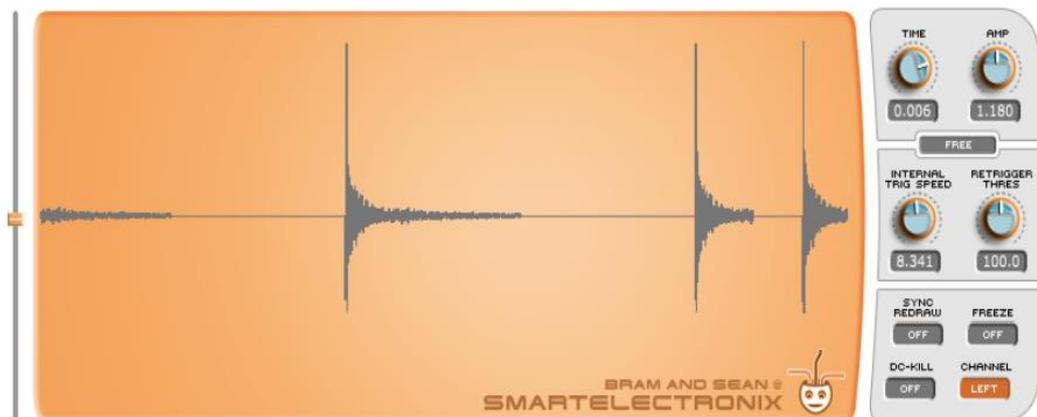


Figura 5.21: Formato de onda de caixa de bateria, passando pelo *Plugin CLA2A* da Waves, com uso do compressor

A figura 5.21 representa a caixa de bateria após o processo de compressão pelo *software*. Novamente o transiente inicial é preservado, como ocorreu no compressor analógico desenvolvido e no *plugin* emulador Puigchild 660, porém, no caso do CLA2A há uma compressão mais brusca e rápida em relação às anteriores.

Vale ressaltar que a sonoridade entre os três circuitos comparados é semelhante, portanto a escolha pela utilização de um ou outro fica a cargo do músico ou do interessado em questão.

Conforme a figura 5.22, em termos de valores de RMS, observa-se redução de 8,1, o que significa que a compressão apresentada pelo CLA2A foi, de fato, mais forte em relação às evidenciadas pelos anteriores, ainda que mantenha a semelhança de sonoridade e propósito de atuação. Antes da compressão o valor de RMS era de -20,2 e após o processo de compressão o valor é de -28,3.

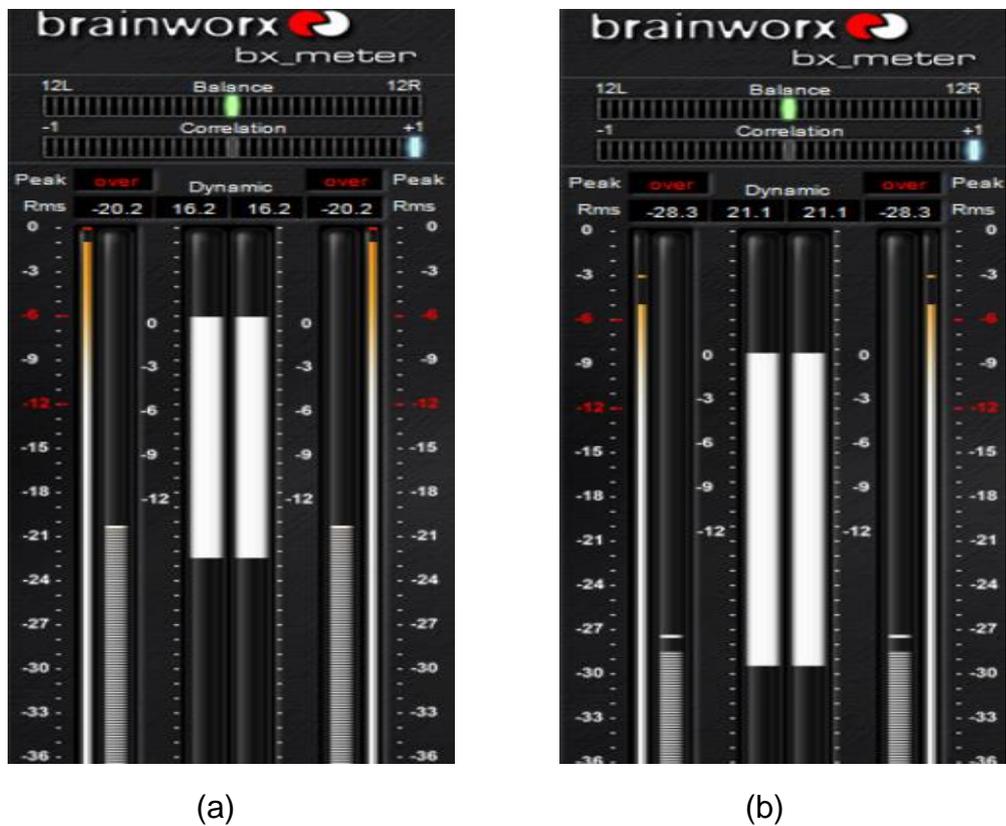


Figura 5.22: Medição de RMS, com *Plugin CLA2A* da Waves, aplicado à caixa de bateria: (a) Antes da compressão; (b) Depois da compressão

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho, realizou-se o desenvolvimento de um compressor valvulado de áudio, cujo processo envolveu a concepção do circuito e seu esquemático, até sua construção física. O relatório escrito a partir dos resultados teve como meta resultados práticos em aplicações comuns no mercado musical, isto é, o trabalho versa sobre um tipo de circuito e suas possíveis contribuições para os sinais processados. Os resultados foram adquiridos por meio dos *softwares s(M)exoscope, Spectrum e Brainworx Bx Meter*. Para projeto de circuito foi utilizado o *software Multisim 12*. Os circuitos desenhados foram projetados no *Ltspice* e no *Multisim 12*.

Os principais aspectos teóricos envolvidos em circuitos de compressão à válvula foram elucidados. Inicialmente, utiliza-se a apresentação de conceitos importantes do elemento ativo do circuito, a válvula. Em seguida, as principais características gerais foram tratadas de forma a explicar certos comportamentos e justificar certas escolhas de componentes e topologias de projeto, encontradas em um circuito de compressão.

Apresentaram-se os componentes utilizados em cada um dos estágios do circuito em questão. Explicou-se o tipo de análise de projeto realizada para esboçar o funcionamento de circuito. Nessa etapa, projeta-se o circuito por meio de análise da literatura da área, além de suporte de resultados com a utilização do *software Multisim 12*, apesar de suas limitações para simulações de circuitos valvulados. A montagem ocorre ao longo dessa etapa de projeto, e como explicado anteriormente, o método de tentativa e erro, para circuitos que envolvem gosto musical, é uma boa forma de abordar melhorias de projeto.

O texto apresenta abordagem para explicação detalhada de cada estágio do circuito, isto é, a forma que o sinal é processado em cada um dos pontos do circuito. A análise, basicamente, está fundamentada em aspectos teóricos abundantes na literatura, ou seja, versa com maior intensidade sobre a forma que o sinal é processado, e não foca em valores propriamente ditos de tensão e corrente, visto que a ampla gama de sinais possuem diferentes características.

Os resultados de funcionamento do circuito são discutidos de forma a apontar o grau de eficácia do problema em questão. Observa-se que o compressor

apresenta compressão de sinal que preserva o transiente inicial e comprime o sinal de forma não brusca, não gerando qualquer tipo de sensação de não naturalidade no processo. Observa-se também, que o circuito projetado, oferece uma ótima qualidade de sinal de saída, haja visto que o sinal sonoro apresenta-se sem ruído perceptível. Aborda-se a questão dos valores de RMS do sinal de saída pré-processado e pós-processado como meio de avaliação da intensidade de nível de compressão exercido pelo compressor analógico e as emulações utilizadas para efeito de comparação.

Concluiu-se que a qualidade do processamento de sinal realizada demonstrou padrões satisfatórios, seja em termos do acoplamento adequado do sinal do compressor com interface externa, seja com o resultado adquirido pelos *softwares* de medição utilizados. Também, observa-se que o projeto atende a necessidades de mercado, sendo inclusive utilizado na compressão de vocais em músicas autorais. Todavia, este trabalho encontra-se em uma seara muito pouco explorada atualmente, seja pela existência de componentes ativos mais atuais que as válvulas, seja por questões mercadológicas.

Dentro deste contexto, encoraja-se para o futuro que sejam feitas novas contribuições, entre as quais: (i) projeto de sistemas com controle de ganho de saída, *attack* e *release* para aumento da capacidade de compressão de formas de onda pelo acréscimo de parâmetros; (ii) projeto de circuitos com classes de amplificação diferentes a fim de possibilitar variações no processo de polarização das válvulas e melhor aproveitamento em termos de potência dissipada; (iii) desenvolvimento de *softwares* mais precisos para simulação de circuitos valvulados com intuito de facilitar o projeto de estágios de circuito e tornar economicamente mais viável projetos com maior grau de complexidade; (iv) projeto de novas topologias que visam a um som de característica *vintage* e essencialmente analógica, como forma de impulsionar o mercado de uma tecnologia essencial na história das gravações musicais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMATO, G.; Design of an Integrated Push-Pull Tube Amplifier Made Easy:1.ed. Independently Published, 2018.
- [2] BLENCOWE, M.; Designing High-Fidelity Valve Preamps:1.ed. Merlin Blencowe, 2016.
- [3] CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas: 5. Ed. Mc Graw Hill, 2013.
- [4] CHAFFE, E.L;Theory of thermionic vacuum tubes:1.ed.McGraw Hill,1933.
- [5] EICHMEIER, A.J.;THUMM, M; Vacuum Eletronics: Components and Devices:1.ed.Springer, 2008.
- [6] FLETCHER, H.; MUNSON, W.A. Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation. Bell Labs Technical Journal. v. 12, n.4, p. 377-430, 1933.
- [7] HOOD, J. L. Audio Electronics: 2. ed. Newnes, 1998.
- [8] HOOD, J. L. Valve and Transistor Audio Amplifiers: 1. ed. Newnes, 1998.
- [9] JONES, M.; Building Valve Amplifiers:2.ed.Newnes, 2014.
- [10] JONES, M.; Valve Amplifiers:4.ed.Newnes, 2012.
- [11] JURICH, Ej. VacuumTube Amplifier Basic: 4. ed. Createspace, 2014.
- [12] KUEHNEL, R.; Guitar Amplifier Electronics: Basic Theory:1.ed. Amp Books LLC, 2018.
- [13] LATHI, B.P.; DING. Z. Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos: 4. ed. LTC, 2012.
- [14] LEYVA, K.; MEGANTZ, C.R.; Design and Construction of Tube Guitar Amplifiers: 3.ed.TacTec Press, 2009.
- [15] LINDE, R.Z.; Build Your Own AF Valve Amplifiers: Circuits for Hi-fi and Musical Instruments: 1.ed. Elektor Electronics Publishing, 1995.
- [16] LYNAR, N. Digital Audio Systems: Written Review 2 Digital Tube Simulation Models. Graduate Program in Audio and Acoustics: Faculty of Architecture, Design and Planning, The University of Sydney, 2013.
- [17] MILLMAN, J.;Vacuum Tube and Semiconductor Electronics:2.ed.McGraw Hill,1965.
- [18] MONK, S.;Scherz, P.;Practical Eletronics for Inventors:4.ed.McGraw Hill, 2016.
- [19] NELMS, M.R.; IRWIN D.J .; Análise Básica de Circuitos Para Engenharia: 10.ed.LTC, 2013.

[20] NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. Circuitos Elétricos: 6. ed. LTC, 2001.

[21] PERTENCE, A. jr. Amplificadores operacionais e filtros ativos: 3. ed. McGraw – Hill, 1990.

[22] RIDER, F.J.; Inside The Vacuum Tube: 1. ed. Audio Amateur, 2017.

[23] ROBJOHNS, H.; WHITE, P.; LOCKWOOD, D. The Studio SOS Book: Solutions and Techniques for the Project Recording Studio: 1. ed. Focal Press, 2013)

[24] ROMANOWITZ, H.A. Fundamentals of Semiconductor and Tube Electronics: 1. ed. John Wiley & Sons, 1962.

[25] ROZENBLIT, B.; Tubes and Circuits: 1. ed. Createspace, 2012.

[26] SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. Microeletrônica: 4. ed. Pearson, 2000.

[27] SLONE, G. R. The audiophile's Project sourcebook: 80 High-Performance Audio: 1. ed. McGraw – Hill, 2001.

[28] VANDERBIJL, H.J.; The Thermionic Vacuum Tube-Physics and Electronics: 1. ed. Wexford College Press, 2003.

[29] WEBER, G.; All About Vacuum Tube Guitar Amplifiers: 1. ed. Kendrick Books, 2009.

[30] WHITAKER, C.J.; Power Vacuum Tubes Handbook: 3. ed. CRC Press, 2017.

[31] WHITAKER, C.J.; The TAB Guide to Vacuum Tube: Understanding and Building Tube Amps (TAB Eletronics): 1. ed. McGraw Hill, 2011.

[32] ZOTTOLA, T.; Vacuum Tube Guitar and Bass Amplifier Theory: 1. ed. Bold Strummer Ltd, 1996.

APÊNDICE A - NETLIST SIMULAÇÃO CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO

```

xGND GND DGND__POWER_SOURCES__1
XMM3 3 GND XXMM3_119454432
XMM2 2 GND XXMM2_119454432
XMM1 1 GND XXMM1_119454432

rR1 1 3 10000 vresR1
.model vresR1 r( )

vV1 2 0 dc 220 ac 0 0
+   distof1 0 0
+   distof2 0 0

rR2 3 0 100000 vresR2
.model vresR2 r( )

xD1 0 3 D1N5378B/ON__ZENER__1

cC1 2 0 0.00018
cC2 1 0 0.00018
cC3 3 0 0.00018

rR3 2 1 2200 vresR3
.model vresR3 r( )

.subckt XXMM3_119454432 2 1
I_multi_meter 1 2 DC 0.000000e+000
R_multi_meter 2 1 1.000000e+009
.ends

.subckt XXMM1_119454432 2 1
I_multi_meter 1 2 DC 0.000000e+000
R_multi_meter 2 1 1.000000e+009
.ends

.subckt DGND__POWER_SOURCES__1 1
.mergenodes 1 0

```

```

.ends

.SUBCKT D1N5378B/ON__ZENER__1 2 1
* Model generated on Jun 22, 2004
* MODEL FORMAT: PSPICE
*  anode cathode
*node: 2  1
*  Forward Section

D1 2 1 MD1

.MODEL MD1 D IS=1.53614e-17 N=1 XTI=1 RS=0.1
+ CJO=1e-11 TT=1e-08
*  Leakage Current

R 1 2 MDR 1.52e+08

.MODEL MDR RES (TC1=0 TC2=0)
*  Breakdown

RZ 2 3 70.629

IZG 4 3 0.057

R4 4 3 4500

D3 3 4 MD3

.MODEL MD3 D IS=2.5e-12 N=5.66556 XTI=0 EG=0.1

D2 5 4 MD2

.MODEL MD2 D IS=2.5e-12 N=7.48849 XTI=0 EG=0.1

EV1 1 5 6 0 1

IBV 0 6 0.001

RBV 6 0 MDRBV 98296.2

.MODEL MDRBV RES (TC1=1e-07)
*-- SPICE3 DIODE MODEL DEFAULT PARAMETER
*  VALUES ARE ASSUMED
*IS=1E-14 RS=0 N=1 TT=0 CJO=0
*VJ=1 M=0.5 EG=1.11 XTI=3 FC=0.5

```

```
*KF=0 AF=1 BV=inf IBV=1e-3 TNOM=27  
.ENDS d1n5378b  
.subckt XXMM2_119454432 2 1  
I_multi_meter 1 2 DC 0.000000e+000  
R_multi_meter 2 1 1.000000e+009  
.ends
```

