



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Nuno Coelho Pacheco

Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre
em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Luís Gonçalves

Julho de 2017

DECLARAÇÃO

Nome: Pedro Nuno Coelho Pacheco

Endereço eletrónico: pedroncp90@gmail.com Telefone: 913796904

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 13784120

Título da dissertação: Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio

Orientador:

Professor Luís Gonçalves

Ano de conclusão: 2017

Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Luís Gonçalves, o meu sincero agradecimento pela orientação neste projecto. Muito obrigado pelo profissionalismo e disponibilidade que sempre revelou para comigo. O seu apoio foi determinante na elaboração desta Tese.

Dedico esta tese à memória da minha mãe.

RESUMO

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma interface áudio, com recurso a tecnologia puramente analógica. Trata-se de uma interface com os elementos comuns a uma mesa de mistura. A interface tem como objetivo, assim como numa mesa de mistura, a preparação/processamento do sinal para gravação, mas com maior margem de resultados possíveis. Para isso usa circuitos com funções semelhantes mas com diferentes tecnologias utilizadas no processamento de áudio analógico (na fase de amplificação e equalização), sendo estas os circuitos integrados e válvulas (tubos de vácuo). Existe também um processador de sinal acrescentado (compressor de áudio) tem como objetivo complementar esta interface.

A interface, comparativamente a uma mesa de mistura, pode ser vista como tendo dois canais. Os circuitos do primeiro canal são circuitos baseados em tecnologias a válvulas, enquanto os do segundo dão uso à tecnologia de circuitos integrados. De modo a obter uma maior amplitude de resultados, é possível fazer o mapeamento do sinal, sendo possível decidir qual o circuito do estágio seguinte ou mesmo enviar/receber do exterior da interface, quando é do interesse a adição de equipamento(s) externo(s). A saída do sinal é proveniente do canal auxiliar *Master* e tem como função o controlo de volume do *output* e monitorização por auscultadores.

Para efeitos de teste da interface foram realizadas várias gravações do sinal de saída percorrido por várias combinações dos controlos dos circuitos da interface, usando um mesmo sinal de entrada, avaliando posteriormente através de testes auditivos e visualmente através das amostras dos sinais.

ABSTRACT

This paper presents the development of an audio interface that uses only analog technology. It is an interface with all the elements common to this type of equipment. The interface aims, as well as a mixing console, to prepare/process the signal for recording, but with a wider range of results. For this purpose it uses circuits with similar functions but with different technologies used in analog audio processing (in amplification and equalization phase), these being integrated circuits and valves (vacuum tubes). There is also an added signal processor (audio compressor) to complement this interface.

The interface, compared to a mixing console, can be seen as having two channels. The circuits of the first channel are circuits based on valve technologies, while the second channel use integrated circuit technology. In order to obtain greater amplitude of results, it is possible to do the signal mapping, being possible to decide the circuit of the next stage and even send/receive a signal from outside the interface, when it's desired to add external equipment(s). The output signal comes from the Master auxiliary channel, which has the function to control de volume and monitoring the results with headphones.

For the purposes of interface testing, several recordings of the output signal were made, traversed by various combinations of interface circuit controls, using a same input signal, subsequently evaluating through auditory tests and visually through signal samples.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE ACRÓNIMOS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos e motivação.....	1
1.2. Enquadramento	2
2. ESTADO DA ARTE	6
2.1 Sinal áudio - O que é o som?	6
2.2 Psicoacústica	8
2.3 Ruído	9
2.4 Sinais de alta e baixa impedância	10
2.5 Balanceamento do sinal	11
2.5.1 Sinal não Balanceado	11
2.5.2 Canal Balanceado.....	13
2.6 O que é uma DI Box.....	15
2.7 Válvulas	16
2.8 Amplificadores operacionais	20
2.9 Válvulas vs. Amplificadores operacionais.....	22
3 CIRCUITOS DO PROJETO	28
3.1 Pré-amplificador “G9”	28
3.2 Pré-amplificador “5 <i>dollar</i> ”	31
3.3 Equalizador “Pulteq”	33
3.4 Equalizador “W492”	37
3.5 Compressor Stereo “GSSL”	38
3.6 Circuitos de alimentação	42

3.6.1	Transformadores	42
3.6.2	Tensões de funcionamento	43
4.	DIAGRAMA DA INTERFACE	44
5.	TESTE E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	50
6.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	75
	BIBLIOGRAFIA	76
	ANEXOS	77

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 – Canal Genérico de uma mesa de mistura.....	3
Ilustração 2 - Mesa de mistura <i>Behringer</i>	4
Ilustração 3 - Curvas de Fletcher-Munson.....	9
Ilustração 4 – Esquema de uma linha não balanceada.....	12
Ilustração 5 – Exemplo de um cabo não balanceado	12
Ilustração 6 - Conectores Jack de 6.3mm (<i>mono</i> em cima, <i>stereo</i> em baixo)	13
Ilustração 7 - Conectores RCA - canal <i>Left</i> a branco e canal <i>Right a vermelho</i> (prática comum)	13
Ilustração 8 – Esquema de uma linha balanceada	14
Ilustração 9 – Esquema do processo de eliminação de ruído numa transmissão balanceada	14
Ilustração 10 – Exemplo de um cabo Balanceado	14
Ilustração 11 – Exemplo de conectores XLR (Fêmea e macho, respetivamente).....	15
Ilustração 12 –Sinal resultante quando usada como retificadora de corrente alternada.....	17
Ilustração 13 - Sinal resultante quando usada como amplificadora de sinal	17
Ilustração 14 - Sinal resultante quando usada como gerador de sinal oscilador de alta frequência	18
Ilustração 15 - Sinal resultante quando usada como modificador de onda	18
Ilustração 16 - Sinal resultante quando usada como gerador de sinal oscilador de alta frequência	18
Ilustração 17 - Modelos de válvulas multi-unidade	19
Ilustração 18 – Esquemático tipo de um amplificador operacional.....	21
Ilustração 19 – Características de distorção das tecnologias usadas em pré-amplificação	23
Ilustração 20 – Distorção harmónica tipo de um pré-amplificador com válvula de tríodo	24
Ilustração 21 – Onda de saída em <i>overload</i> de um pré-amplificador com válvula de tríodo.....	24
Ilustração 22 – Distorção harmónica tipo de um pré-amplificador com amplificador operacional.....	25
Ilustração 23 - Onda de saída em <i>overload</i> de um pré-amplificador com amplificador operacional.....	25
Ilustração 24 – Diagrama de ligação do Pré-amplificador G9	28
Ilustração 25 - Selecção do tipo de sinal de entrada	29
Ilustração 26 – Desbalanceamento do sinal e primeiro estágio de amplificação	30
Ilustração 27 – Segundo estágio de amplificação e balanceamento do sinal	31
Ilustração 28 - Diagrama de ligação do Pré-amplificador 5 <i>dollar</i>	32
Ilustração 29 – Controlo do tipo de <i>input</i> e controlo do ganho	33
Ilustração 30 - Circuito de balanceamento de sinal.....	33

Ilustração 31 - Diagrama de ligação do Equalizador Pulteq	34
Ilustração 32 - Curvas dos filtros <i>shelving</i> implementados no circuito com válvulas.....	35
Ilustração 33 - Curvas do filtro <i>bell</i> implementado no circuito com válvulas.....	35
Ilustração 34 - Desbalanceamento e equalizador passivo	36
Ilustração 35 - Estágio de <i>buffer</i>	36
Ilustração 36 - Diagrama de ligação do Equalizador W492.....	37
Ilustração 37 – Curvas dos filtros <i>shelving</i> implementados no circuito de equalização com IC's	38
Ilustração 38 – Curvas dos filtros <i>bell</i> implementados no circuito de equalização com IC's	38
Ilustração 39 - Diagrama de ligação do Compressor SSL (canal esquerdo)	39
Ilustração 40 - Diagrama de ligação do Compressor SSL (canal direito)	39
Ilustração 41 - Desbalanceamento do sinal	40
Ilustração 42 - Balanceamento do sinal.....	40
Ilustração 43 - Selecção de <i>attack</i> e <i>release</i>	41
Ilustração 44 - Controlo de ganho de <i>makeup</i> e <i>threshold</i>	42
Ilustração 45 – Diagrama de disposição de equipamentos na interface	44
Ilustração 46 – Diagrama geral do <i>layout</i> da interface	45
Ilustração 47 – Diagrama do <i>layout</i> da interface - Detalhe do circuito pré-amplificador G9	45
Ilustração 48 - Diagrama do <i>layout</i> da interface - Detalhe do circuito pré-amplificador 5 <i>dollar</i>	46
Ilustração 49 - Diagrama do <i>layout</i> da interface - Detalhe do circuito equalizador Pulteq	46
Ilustração 50 - Diagrama do <i>layout</i> da interface - Detalhe do circuito equalizador W492	47
Ilustração 51 - Diagrama do <i>layout</i> da interface - Detalhe do circuito compressor.....	47
Ilustração 52 - Diagrama do <i>layout</i> da interface - Detalhe dos circuitos auxiliares e <i>Output</i>	48
Ilustração 53 – Diagrama de ligação do Master Output	49
Ilustração 54 - Diagrama do <i>layout</i> da interface - Detalhe das ligações na parte de trás	49
Ilustração 55 - Espectro do sinal <i>white noise</i> à entrada.....	51
Ilustração 56 - Sinal à saída do pré amplificador “G9” (Ganho no máximo e volume aproximadamente a meio)	51
Ilustração 57 - Sinal à saída do pré amplificador “G9” (Ganho a meio e volume próximo do máximo)	52
Ilustração 58 - Sinal à saída do pré amplificador “G9” (Ganho no máximo e volume aproximadamente a meio)	52
Ilustração 59 - Sinal à saída do pré amplificador “G9” (Ganho a meio e volume próximo do máximo)	53
Ilustração 60 - Sinal à saída do pré amplificador “G9” (em saturação, com ganho no máximo).....	53

Ilustração 61 - Sinal à saída do pré amplificador “G9” (em saturação, com ganho no máximo).....	54
Ilustração 62 – Sinal à saída do pré amplificador “5 dollar”	54
Ilustração 63 – Sinal à saída do pré amplificador “5 dollar”	55
Ilustração 64 – Sinal à saída do pré amplificador “5 dollar” (em saturação)	55
Ilustração 65 – Sinal à saída do pré amplificador “5 dollar” (em saturação)	56
Ilustração 66 - Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>Bypass</i>)	57
Ilustração 67 – Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>Boost Low</i> no máximo, <i>Low frequency</i> no mínimo)	57
Ilustração 68 – Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>Boost Low</i> no máximo, <i>Low frequency</i> no máximo).....	58
Ilustração 69 – Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>Cut Low</i> no máximo, <i>Low frequency</i> no mínimo).	58
Ilustração 70 – Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>Cut Low</i> no máximo, <i>Low frequency</i> no máximo)	59
Ilustração 71 - Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>High boost</i> no máximo, <i>High frequency</i> no mínimo, <i>High Q</i> no mínimo).....	59
Ilustração 72 - Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>High boost</i> no máximo, <i>High frequency</i> no mínimo, <i>High Q</i> no máximo)	60
Ilustração 73 - Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>High boost</i> no máximo, <i>High frequency</i> no máximo, <i>High Q</i> no mínimo)	60
Ilustração 74 - Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>High boost</i> no máximo, <i>High frequency</i> no máximo, <i>High Q</i> no máximo)	61
Ilustração 75 - Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>High cut</i> no máximo, <i>High cut frequency</i> no mínimo)	61
Ilustração 76 - Sinal à saída do equalizador “Pultec” (<i>High cut</i> no máximo, <i>High cut frequency</i> no máximo).....	62
Ilustração 77 - Sinal à saída do equalizador “W492” (<i>Bypass</i>)	63
Ilustração 78 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 1 (<i>Gain</i> no mínimo, <i>Frequency</i> no mínimo)	63
Ilustração 79 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 1 (<i>Gain</i> no máximo, <i>Frequency</i> no mínimo)	64

Ilustração 80 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 1 (<i>Gain</i> no mínimo, <i>Frequency</i> no máximo)	64
Ilustração 81 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 1 (<i>Gain</i> no máximo, <i>Frequency</i> no máximo)	65
Ilustração 82 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 2 (<i>Gain</i> no mínimo, <i>Frequency</i> no mínimo)	65
Ilustração 83 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 2 (<i>Gain</i> no máximo, <i>Frequency</i> no mínimo)	66
Ilustração 84 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 2 (<i>Gain</i> no mínimo, <i>Frequency</i> no máximo)	66
Ilustração 85 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 2 (<i>Gain</i> no máximo, <i>Frequency</i> no máximo)	67
Ilustração 86 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 3 (<i>Gain</i> no mínimo, <i>Frequency</i> no mínimo)	67
Ilustração 87 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 3 (<i>Gain</i> no máximo, <i>Frequency</i> no mínimo)	68
Ilustração 88 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 3 (<i>Gain</i> no mínimo, <i>Frequency</i> no máximo)	68
Ilustração 89 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 3 (<i>Gain</i> no máximo, <i>Frequency</i> no máximo)	69
Ilustração 90 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 4 (<i>Gain</i> no mínimo, <i>Frequency</i> no mínimo)	69
Ilustração 91 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 4 (<i>Gain</i> no máximo, <i>Frequency</i> no mínimo)	70
Ilustração 92 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 4 (<i>Gain</i> no mínimo, <i>Frequency</i> no máximo)	70
Ilustração 93 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 4 (<i>Gain</i> no máximo, <i>Frequency</i> no máximo)	71
Ilustração 94 – Sinal à saída do compressor “GSSL” (<i>Makeup gain</i> perto do mínimo, <i>Ratio</i> 10)	72
Ilustração 95 - Sinal à saída do compressor “GSSL” (<i>Makeup gain</i> no máximo, <i>Ratio</i> 10)	72
Ilustração 96 – Sinal à saída do compressor “GSSL” (<i>Makeup gain</i> perto do mínimo, <i>Ratio</i> 10)	73
Ilustração 97 – Sinal à saída do compressor “GSSL” (<i>Makeup gain</i> perto do mínimo, <i>Ratio</i> 10)	73

Ilustração 98 - Sinal à saída do compressor “GSSL” (<i>Makeup gain</i> no máximo, <i>Ratio</i> 10)	73
Ilustração 99 - Sinal à saída do compressor “GSSL” (<i>Makeup gain</i> no máximo, <i>Ratio</i> 10)	74

LISTA DE ACRÓNIMOS

SPL – *Sound pressure level* (nível de pressão sonora)

SNR – *Signal-to-noise ratio* (relação sinal-ruído)

DI – *Direct Input* (entrada direta)

THD – *Total harmonic distortion* (distorção harmónica total)

RFI – *Radio-frequency interference* (interferência de radiofrequência)

VCA – *Voltage-controlled amplifier* (amplificador controlado por tensão)

IC – *Integrated circuit* (circuito integrado)

ADC – *Analog-to-digital converter* (conversor analógico-digital)

1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo são expostas as motivações e apontados os objetivos do trabalho proposto. É feito um enquadramento sobre filtros, tratamento/processamento de sinal áudio e a relação das tecnologias utilizadas na qualidade sonora. Por último, é descrita a estrutura e organização da presente dissertação.

1.1. Objetivos e motivação

A presente dissertação insere-se no âmbito de obtenção de grau do 2º ciclo de estudos do curso Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores da Universidade do Minho. Trata-se de um projeto de investigação individual, pondo à prova os conhecimentos adquiridos no decorrer dos dois ciclos de ensino do curso, procurando também promover a capacidade de investigação a nível pessoal.

Esta dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma interface, um conjunto de circuitos, que recebe e transforma (modela) um sinal elétrico (que representa um sinal de áudio). Esta modelação é composta por vários estágios, estando presentes o estágio de amplificação, de equalização e compressão do sinal. O principal objetivo deste projeto é ser um instrumento versátil tanto nos resultados que consegue obter atuando como equipamento único, como quando são inseridos processadores externos através de reencaminhamento. Esta interface tem também a capacidade de receber o sinal de várias fontes distintas, como instrumentos (guitarras, guitarras baixo, entre outros que usem transdutores capazes de captar sinais sonoros e que façam a transmissão elétrica via cabo), microfones dinâmicos, microfones de condensadores e saídas de equipamento áudio. É importante ter estes dados em conta, uma vez que diferentes origens do sinal, significam diferentes amplitudes de sinal à entrada da interface e, por sua vez, diferentes ou nenhuma amplificação. É também importante ter em conta que, por vezes, é necessária uma tensão de alimentação para alguns equipamentos.

Após a conclusão da implementação da interface, e para efeitos de teste, será aplicada à entrada dos circuitos um sinal e serão feitas gravações do sinal de saída, de modo a visualizar através de gráficos e através de testes auditivos, os diferentes resultados dos circuitos aplicados ao mesmo sinal. Estas gravações serão o resultado de um mesmo sinal de entrada exposto a várias configurações de circuitos. Está previsto que, efetivamente, conseguimos sinais de “qualidades” de som diferentes,

através do mesmo tipo de processamento, mas com diferentes tecnologias. Entenda-se por “qualidade” sonora o resultado ótimo para o efeito que estamos a projetar o sinal, ou seja, a versatilidade pretendida procura que se possa utilizar sinais com propósitos diferentes e trabalhá-los com componentes distintos, de modo a ser utilizado em diferentes situações, tendo estes diferentes “qualidades”.

A motivação para o desenvolvimento deste projeto recaiu principalmente pelo recente interesse na engenharia de áudio e a sua ligação com a eletrónica analógica. Sabendo que a evolução tecnológica afeta também este tipo de equipamento de processamento de sinal, criando assim uma tendência para tornar todo o equipamento digital mesmo numa área tão sensível como o áudio, o uso do equipamento analógico de processamento é ainda hoje venerada pelos audiófilos e promete manter-se junto dos vários tipos de profissionais da área durante muito tempo, despertando também o meu interesse nesse sentido. Tendo grande ligação pessoal com a música e intenção de futuro contacto com produção áudio, este projeto serve também para ter mais conhecimento sobre o como, o porquê e quando se devem aplicar o(s) processamento(s) no sinal. Para mim este projeto trata-se de uma possível base de conhecimento para um projeto futuro, mesmo que seja de auto-realização, sabendo também que esta interface é uma ótima base, com qualidade profissional, para que este tipo de projeto se torne mais facilmente concretizável.

A elaboração desta dissertação iniciou-se por uma recolha de informação e revisão bibliográfica acerca de engenharia do som, onde existiu um estudo de circuitos de equalização, compressão de sinal, interfaces de áudio, mesas de mistura e respetivos temas que estão associados a estas. Posteriormente foi planeada e implementada a interface. Por fim foi escrito o presente documento que descreve toda a execução deste trabalho.

1.2. Enquadramento

O nome de mesa de mistura está associado a um aparelho que tem vários canais de entrada independentes uns dos outros. Cada um destes canais está associado normalmente a um pré-amplificador, um equalizador, uma saída auxiliar do sinal e controlo de volume (entre outras opções adicionais não relevantes a não implementar neste projeto). Representado na ilustração 1 está um canal genérico de uma mesa de mistura e os seus diferentes estágios. Numa mesa de mistura podem existir desde 2 até tantos quantos os necessários. Mesmo numa interface com, por exemplo, 64

canais, compreender apenas um deles é um passo enorme para trabalhar com este equipamento porque compreender apenas um canal significa compreender todos os restantes (Dittmar, 2012).

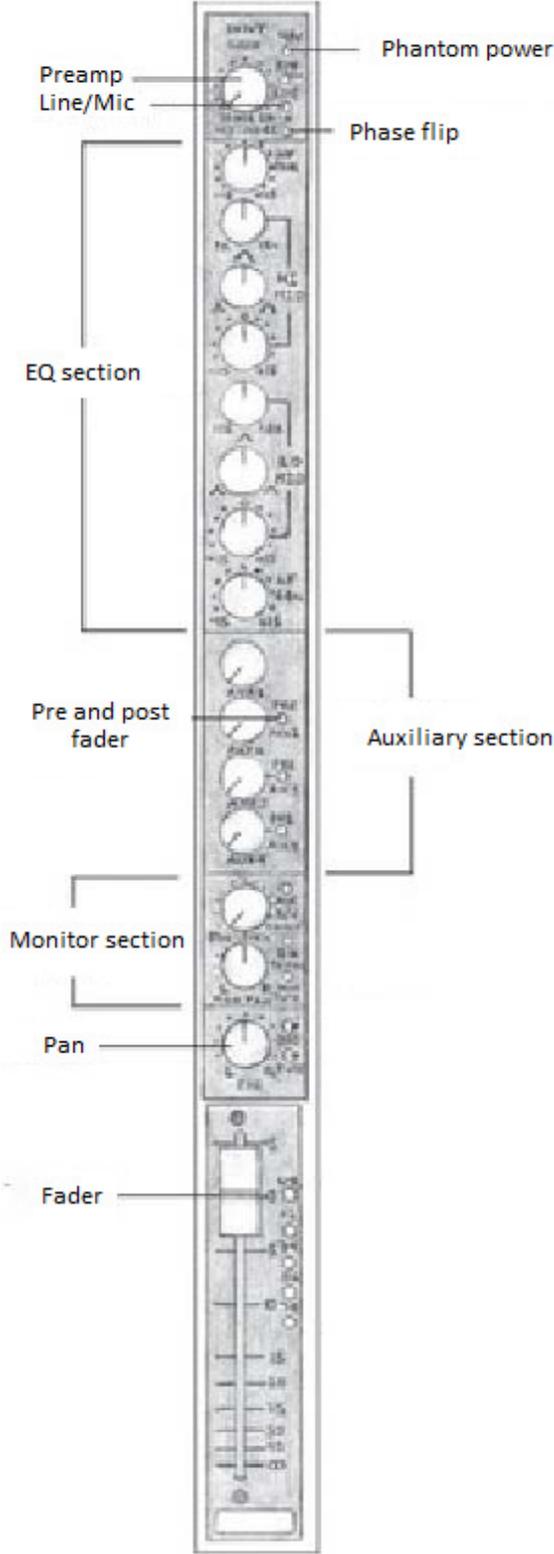


Ilustração 1 – Canal Genérico de uma mesa de mistura

Cada mesa de mistura está implementada com circuitos baseados numa única tecnologia nos seus estágios. Existem circuitos com recurso a válvulas ou circuitos integrados. Os restantes estágios destas mesas não afetam o sinal na sua modulação, tratam-se apenas de circuitos de controlo de volume e encaminhamento de sinal.

Existe também em comum com todas as interfaces o canal *Master*. Este canal tem como entrada todos os outros canais, sendo então este o canal que fornece o único sinal de *output*.

Representado na ilustração 2 está um exemplo de uma mesa de mistura, onde é possível facilmente identificar os canais de entrada à esquerda (4 colunas idênticas) e o canal *Master* à direita (descrita como *MAIN SECTION*). Na zona superior estão as entradas e saída físicas do sinal.



Ilustração 2 - Mesa de mistura *Behringer*¹

Como é possível observar ao comparar a ilustração 1 com a ilustração 2, este equipamento possui as componentes acima representadas, apesar de o aspeto não totalmente igual. No entanto cada canal de entrada tem um circuito que percorre todos os estágios, todos eles baseados no mesmo tipo de tecnologia (no caso deste modelo, uso a circuitos integrados). O mesmo acontece em mesas mais, ou menos, profissionais do que a apresentada na ilustração 2; podem ter mais ou menos canais, melhor ou pior circuito de pré amplificação, melhor ou pior circuito de equalização mas cada canal está

¹ Behringer Xenix 802 – Mesa de mistura de 6 canais (2 canais *mono* e 2 *stereo*)

destinado a um tipo de tecnologia e um circuito fechado desde o estágio de amplificação à sua entrada no canal *master*.

Num estúdio profissional é comum haver equipamentos com recurso a circuitos com válvulas. Este equipamento tem sempre um custo de produção superior que o equipamento que usa circuitos integrados e é considerado por muitos técnicos, superior em termos de qualidade sonora. No entanto, no mundo áudio, não é possível avaliar um som como melhor ou pior após passar por um ou outro equipamento (independentemente da tecnologia), apenas se pode distinguir como sendo diferente. No mundo áudio tudo é relativo e o gosto varia entre cada indivíduo. É possível sim, para um ouvido treinado, distinguir facilmente um som que passou por um circuito a válvulas e um com circuitos integrados. Para um ouvido não treinado, também é possível fazer a distinção após uma comparação dos dois, isto porque os dois tipos de circuitos geram sinais com informação sonora diferente.

Tendo como base a premissa que diferentes tecnologias geram informação diferente no sinal resultante e, sabendo que, num estúdio, mais propriamente numa interface de áudio, seria desejável haver versatilidade, pode-se afirmar que se trata de um projeto inovador e útil para pequenos estúdios onde os recursos e espaço de trabalho serão reduzidos.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo pretende-se introduzir alguns conceitos básicos relacionados com o som e a resposta do ouvido humano na sua presença, assim como conceitos que ajudaram na escolha dos circuitos e nos cuidados a ter durante a construção da interface.

2.1 Sinal áudio - O que é o som?

O som é uma vibração ou uma série de vibrações que se deslocam no ar. Aquilo que cria uma vibração, ou uma onda, é a sua fonte. Esta pode ser uma corda de um instrumento, um sino, uma voz ou qualquer outra coisa que crie uma vibração dentro da gama do espectro audível pelo ser humano. A propagação de uma onda no ar é similar às ondas criadas quando uma pedra cai sobre a água em repouso. As ondas que surgem na água formam-se por compressão das moléculas por ação da pedra, e a área plana é a ausência desta compressão, isto é, uma rarefação. A propagação de uma onda sonora é também formada por compressões e rarefações, formando ondas similares a estas (Dittmar, 2012).

A uma onda sonora podemos atribuir várias características como: amplitude, frequência, fase, velocidade, comprimento de onda, harmónicos e o envelope. Destes elementos, apenas serão discutidos os relevantes a este projeto.

Amplitude – a amplitude relaciona-se com a altura da onda sonora e está associada ao volume. Sempre que numa televisão, rádio ou outro qualquer equipamento que emita som, se altere o volume, estamos a aumentar ou diminuir a amplitude da onda sonora. Com o aumento do volume aumenta-se também a onda sonora e o seu nível de pressão sonora (*sound pressure level* ou SPL), acontecendo o oposto quando se diminui o volume. A amplitude é, portanto, a característica que relaciona a intensidade sonora (associado ao “volume”) e o SPL, sendo uma grandeza medida em decibéis (dB). Durante o dia-a-dia somos confrontados com valores entre 0dB até 140dB em algumas situações. É preciso ter em conta que a exposição regular acima dos 85dB pode provocar danos na audição. Como referência temos os seguintes exemplos:

0dB – Silêncio quase absoluto

15dB - Sussurrar

40-50dB – Ruído ambiente num espaço público

60dB – Uma conversa em tom normal

80-85dB – Trituradora de alimentos

90dB – Ruído numa fábrica

110dB – Buzina de um carro

120dB – Um concerto ou um motor de avião

140dB – Um disparo de uma arma ou fogo de artifício

Frequência – a quantidade de ciclos por segundos criados por uma onda sonora é denotada de frequência e é medida em Hertz (Hz). Esta medida traduz diretamente os ciclos por segundo em hertz, isto é, 1000 ciclos por segundo corresponde a 1000Hz, ou 1kHz. O ouvido humano tem capacidade de captar o som entre os 20 e os 20kHz. Esta sensibilidade varia de indivíduo para indivíduo e a tendência é de, com a idade, esta margem tornar-se mais estreita.

A gama de frequências audíveis pelo ser humano é normalmente dividida em 3 grupos, sendo comum um deles ter subdivisões. Estes 3 principais grupos são os graves, médios e agudos. Por vezes é feita uma sub-divisão na gama dos médios: médios-graves, médios-médios e médios-agudos.

Associados aos “graves” temos a gama de frequências entre 20 e 200Hz, aos “médios” as frequências entre 200 e 5kHz e os “agudos” abrangem a restante gama audível, dos 5k aos 20k Hz.

Numa gravação é importante ter em conta as frequências mais presentes, pois estas podem ser destrutivas, criar a sensação de um som estar distante ou de fadiga no ouvido.

As frequências “graves” são omnidireccionais, poderosas e fazem o som parecer “grande” e mais “cheio”, no entanto o abuso destas frequências pode fazer com que muitas outras deixem de ser ouvidas.

As frequências dos “médios” são a gama que nós ouvimos melhor (maior sensibilidade no ouvido) e, como foi dito, podem ser subdivididos. Temos então os “médios graves” que correspondem às frequências entre 200 e 700Hz e uma maior presença desta gama irá fazer o som parecer mais “sombrio”. Os “médios-médios” associam-se à gama entre 700 e 2kHz e fazem o som parecer mais vivo e os “médios-agudos” associam-se a um tom mais “claro”, mais “brilhante” e presente. No entanto o abuso dos “médios” pode causar desconforto rapidamente ao ouvido.

Os Agudos são sons extremamente direccionais e com menos “poder” sonoro. Aumentando estas frequências podemos dar ao som um aspeto mais “brilhante”, “aéreo” e “fino”. Com estas frequências conseguimos acrescentar “presença” ao som sem criar fadiga aos ouvidos.

Fase – designa um ponto num ciclo duma onda sonora e está diretamente relacionada com a frequência. É medida em graus e é usada para medir a relação temporal entre duas ou mais ondas. No

caso dos dois ou mais sinais estarem em fase, existe um aumento de amplitude mas o seu desfasamento a 180° faz com que se anulem e exista nenhum ou muito pouco som na gravação.

Harmónicos – A riqueza e carácter de uma nota musical é encontrada nos seus harmónicos, também conhecido como timbre. Todos os instrumentos reproduzem a frequência fundamental e os harmónicos únicos associados a eles. É também devido a estes harmónicos que facilmente distinguimos um trombone de uma flauta ou piano, mesmo que estas estejam a tocar a mesma nota (a mesma frequência fundamental). Estes harmónicos têm uma relação direta com a frequência da fundamental. Temos que, por exemplo, se a frequência fundamental for de 41Hz (nota Mi, oitava 0), temos o segundo harmónico aos 82Hz ($2 \times 41\text{Hz}$) (nota Mi, oitava 1), o terceiro a 123Hz ($3 \times 41\text{Hz}$) (nota Si, oitava 1) e por aí a diante (Dittmar, 2012).

Estes harmónicos são também divididos em pares e ímpares. Com a acentuação de harmónicos pares forma-se um som mais confortável para o ouvinte (pois são frequências de notas musicais sonantes com a fundamental), enquanto os harmónicos ímpares podem tornar um som menos sonante para o ouvinte quando estão muito presentes no sinal (porque são frequências de notas musicais dissonantes).

2.2 Psicoacústica

A psicoacústica é um ramo da ciência que estuda o comportamento psicológico e fisiológico do som sobre os humanos. Para o nosso ouvido, ouvir não é apenas um processo associado à propagação de ondas, mas sim um acontecimento sensorial e perceptual. Isto é, quando ouvimos um som, este foi propagado como uma onda que atravessa o ar, e no nosso ouvido essa onda é transformada numa vibração e, por sua vez, em impulsos nervosos. Deste modo, quando procuramos solucionar algum “problema” no mundo áudio, não podemos apenas considerar a resposta acústica do ambiente onde nos encontramos. É importante ter noção que o nosso ouvido e cérebro têm um papel fundamental na leitura destas vibrações.

Apesar de haver claras e fortes relações entre certas quantidades subjetivas e objetivas – por exemplo entre tonalidade e frequência – existem outras quantidades objetivas que podem influenciar a nossa percepção. Por exemplo, o nível sonoro pode afectar a nossa percepção de tonalidade. Este fenómeno deve-se à nossa percepção não linear. Um estudo feito com recurso a sons puros (de uma só frequência) revelou que temos sensibilidade superior para frequências entre os 2k e 5kHz (Ballou,

2008). O gráfico que demonstra este estudo é conhecido por curvas de Fletcher-Munson e está representado na ilustração 3.

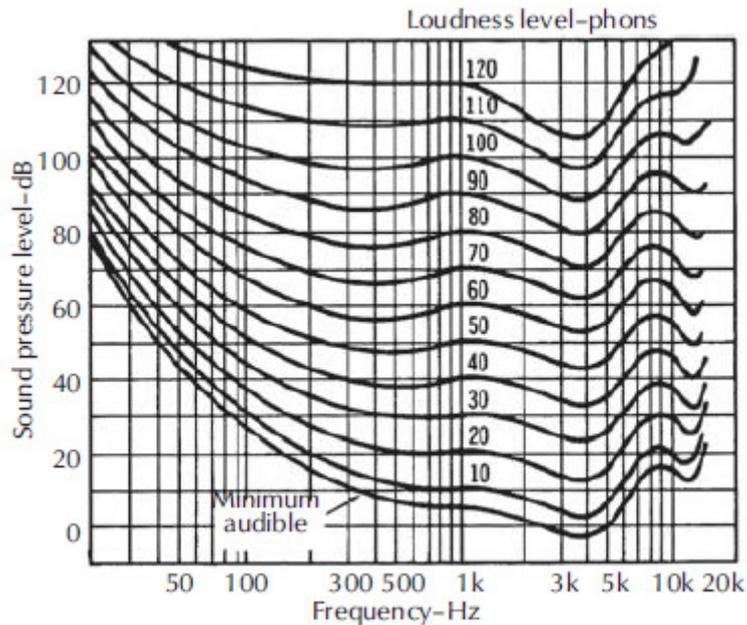


Ilustração 3 - Curvas de Fletcher-Munson

Cada uma das curvas representa o nível de pressão sonora (em dB) para que a nossa percepção seja linear, isto é, para termos percepção que os sons nas várias frequências estão com o mesmo volume. A psicoacústica é uma ciência ainda recente mas já com bastante evolução. Os conhecimentos que esta ciência nos traz permite desenvolver equipamentos mais “perfeitos” para o nosso ouvido, obtendo bons resultados rapidamente.

2.3 Ruído

Chamamos de ruído à parte do sinal não intencional adicionada ao longo da transmissão do sinal. Esta adição ao sinal pode chegar a ser destrutiva, dependendo da sua origem e nível. Este ruído pode ser proveniente de *ground loops*, campos magnéticos, diferenças de potência de alimentação dos circuitos, e interferências de rádio frequência.

Os *ground loops* são provavelmente o problema mais comum nos circuitos áudio. Um sistema sem *ground loops* é pouco afetado por problemas como os *hum* (frequência acrescentada ao sinal por norma bastante audível, normalmente entre 50-60Hz ou entre 100-120Hz) e interferências de rádio frequência. Estes loops são criados quando dois circuitos têm ligados ambos os grounds do circuito de alimentação como os grounds de sinal através do cabo de ligação. Estes providenciam um meio para

captação de fortes campos magnéticos, ou grandes interferências rádio frequência, adicionando ruído audível e indesejado (Boscorelli, 1999).

É também importante referir que os sinais de alta impedância, como os gerados pelos instrumentos, são muito mais suscetíveis aos ruídos criados pelos campos magnéticos. Essa suscetibilidade aumenta proporcionalmente com o comprimento do cabo usado, sendo importante manter os cabos curtos ou fazer uma conversão para um sinal de baixa impedância para reduzir o ruído.

2.4 Sinais de alta e baixa impedância

O sinal de *output* de grande parte dos aparelhos eletrônicos de um sistema de áudio usam sinais de baixa impedância (por volta dos 150 Ohms ou menos). No entanto, o *output* de aparelhos passivos, como os *pickups* de guitarra ou microfones de alta impedância podem ter valores muito superior a estes. É importante perceber a diferença e como lidar com este tipo de aparelhos.

A impedância (Z) é a soma vetorial de dois componentes, a resistência (R) e reatância (X), e mede a oposição do fluxo da corrente num circuito com corrente alternada. Enquanto que a resistência é praticamente constante na gama de frequências audíveis, a reatância representa oposição ao fluxo de corrente por efeitos de indutância(L) e capacitância(C).

As fórmulas relativas à reatância indutiva e capacitiva demonstram que os seus valores são dependentes da frequência, portanto um valor de impedância é válido para uma frequência apenas. Por isso, o valor real da impedância varia ao longo do espectro de frequências áudio.

É também observável que com o aumento da frequência, o valor de reatância indutiva (X_L) aumenta, enquanto que o da reatância capacitiva (X_C) diminui.

$$X_L = 2 * \pi * F * L \qquad X_C = \frac{1}{2 * \pi * F * C}$$

O sinal de *output* (voltagem) de um microfone de alta impedância ou de um instrumento como a guitarra tem um valor muito mais elevado do que o sinal que sai de um microfone típico. Este sinal de alta impedância tem vantagens sobre o de baixa impedância pois não precisa de tanta amplificação numa mesa de mistura ou amplificador, deste modo também não é feita amplificação do ruído. No entanto, a impedância da linha de transmissão (cabo condutor) é afetada pelas impedâncias dos aparelhos que este faz ligação. Um microfone de baixa impedância irá baixar a impedância de tudo a que está ligado, enquanto que um microfone de alta impedância trará maior impedância em toda a linha de transmissão entre o microfone e a mesa de mistura, o que pode ser um problema agravado pela qualidade e comprimento do cabo de transmissão.

Linhas de transmissão de alta impedância são mais afetadas pela própria capacitância do próprio cabo que usam. Esta capacitância combina-se com a impedância da fonte e do destino e transforma-se num filtro. À medida que a impedância aumenta e/ou a capacitância por metro aumenta também, a frequência a que o filtro atua torna-se mais baixa e toda a gama de frequências acima desse valor acaba por ser eliminada ou atenuada mesmo antes de chegar à mesa de mistura. Manter a impedância baixa (assim como usar cabos de qualidade) é um ponto a ter em consideração quando a montagem do sistema requer o uso de cabos longos para usar toda a gama de frequências inalteradas. Tentando manter o nível do sinal, assim como a sua resposta em frequência, é importante fazer ligação entre equipamentos onde o equipamento de origem tem uma impedância de saída bastante inferior à impedância de entrada do equipamento destino. Caso contrário o sinal vai ser atenuado e o SNR e a resposta em frequência serão afetados. Regra geral, procura-se que a impedância de entrada pelo menos dez vezes superior à impedância de saída.

2.5 Balanceamento do sinal

Num sistema de áudio a transmissão do sinal entre os vários circuitos/processadores de sinal pode ser feita através de um sinal balanceado ou não balanceado. De um modo geral, um sinal balanceado oferece mais qualidade ao sinal e ao resultado final da gravação, deve-se por isso ter em conta o seu uso. No entanto, nem sempre a sua utilização é possível ou necessária. É importante fazer o estudo de ambos e adequar o seu uso.

2.5.1 Sinal não Balanceado

Regra geral, um cabo de instrumento possui apenas dois condutores. Num desses condutores atravessa o sinal áudio e é chamado de *hot*. O outro condutor está ligado a uma malha que envolve o primeiro condutor, estando esta malha isolada do dele. Por sua vez, este condutor que forma a malha, também conhecido como *shield*, está ligado ao *ground* dos dois circuitos a que faz ligação, criando um *ground* comum e tem como objetivo isolar o condutor de sinal (*Hot*) das interferências externas que introduzem “hums” ou outros ruídos eletrónicos no sinal áudio (ilustração 4 e 5). No entanto, em termos práticos, verifica-se que não é totalmente verdade. Existe um isolamento importante feito pelo *shield*, mas existe ruído que o consegue ultrapassar e degradar o sinal. Temos também de ter em conta que quanto maior o cabo que liga os dois circuitos, maior será a interferência/degradação no sinal.

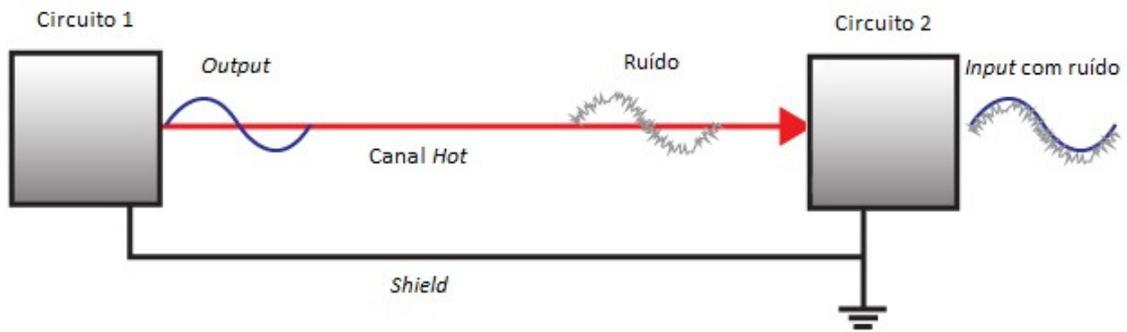
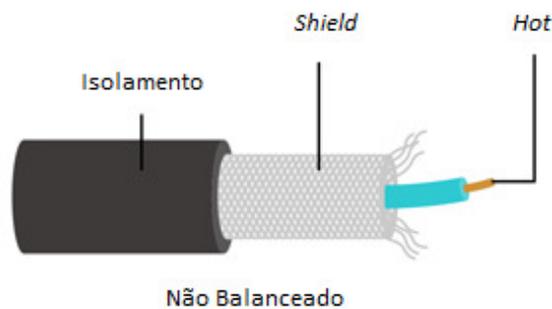


Ilustração 4 – Esquema de uma linha não balanceada



Não Balanceado



Ilustração 5 – Exemplo de um cabo não balanceado

Uma ligação com um cabo de instrumento tem apenas um condutor de sinal e é portanto uma ligação *mono*. No entanto, ligações com mais conectores (ligações *stereo* ou *surround*, por ex.) são também ligações feitas por cabos não balanceados, tendo como único método de prevenção de ruído o isolamento do *shield*.

Como exemplos comuns de cabos que usam este tipo de ligação de 2 condutores temos o cabo de instrumento que utiliza um conector *jack* e os cabos com conectores RCA (ilustração 6 e 7). Normalmente os conectores *jack* com 6.3mm de diâmetro são usados nos sistemas de estúdio, instrumentos ou em outros equipamentos profissionais, podendo variar entre *jack mono* e *stereo* consoante a necessidade. O *jack* de 3.5mm de diâmetro é mais comum em auscultadores/colunas

desenhados para o uso do público comum. O cabo com conectores RCA normalmente é usado aos pares, para fazer uma ligação stereo, fazendo a distinção entre canais através de diferentes cores dos conectores.

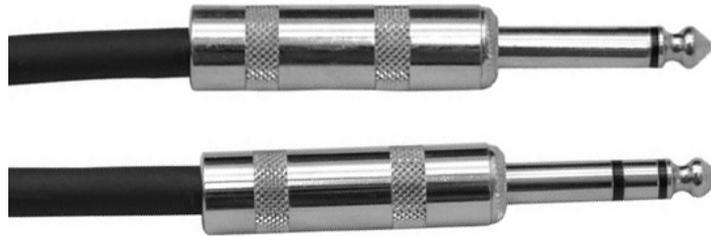


Ilustração 6 - Conectores Jack de 6.3mm (*mono* em cima, *stereo* em baixo)



Ilustração 7 - Conectores RCA - canal *Left* a branco e canal *Right* a vermelho (prática comum)

2.5.2 Canal Balanceado

No caso de um cabo balanceado, temos num mesmo cabo três condutores, dois destes de sinal e um que serve como *shield*. Os dois condutores de sinal, denominados agora *hot* (+) e *cold* (-), recebem do circuito de *Output* o sinal áudio dividido pelos dois canais em igual amplitude e, no condutor *cold*, com a polaridade inversa. O circuito de *Input* recebe o sinal e faz o processo contrário, isto é, inverte novamente a polaridade do sinal do condutor *cold* e soma ambos os sinais (ilustração 8, 9 e 10). O resultado deste processo permite eliminar o ruído induzido ao longo da transmissão (mesmo através de longos cabos). Como ambos os condutores estão expostos ao mesmo ruído, fazendo a inversão e soma dos sinais (+ruído) à entrada do circuito de *Input*, o ruído do canal *hot* anula-se com o ruído de polaridade oposta do canal *cold*.

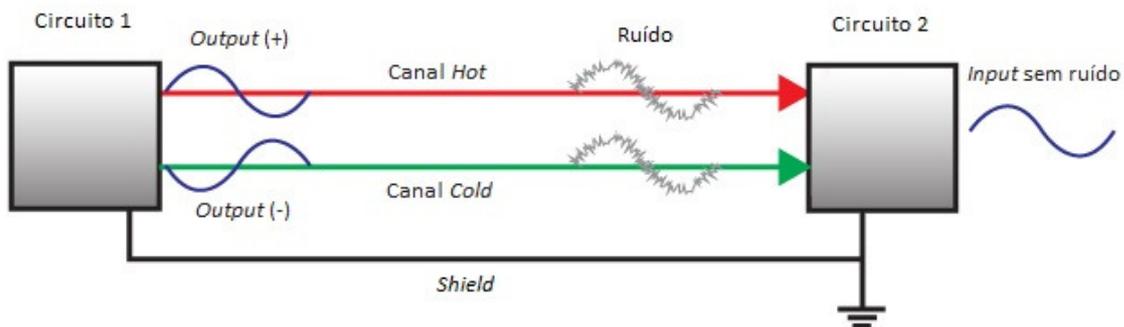


Ilustração 8 – Esquema de uma linha balanceada

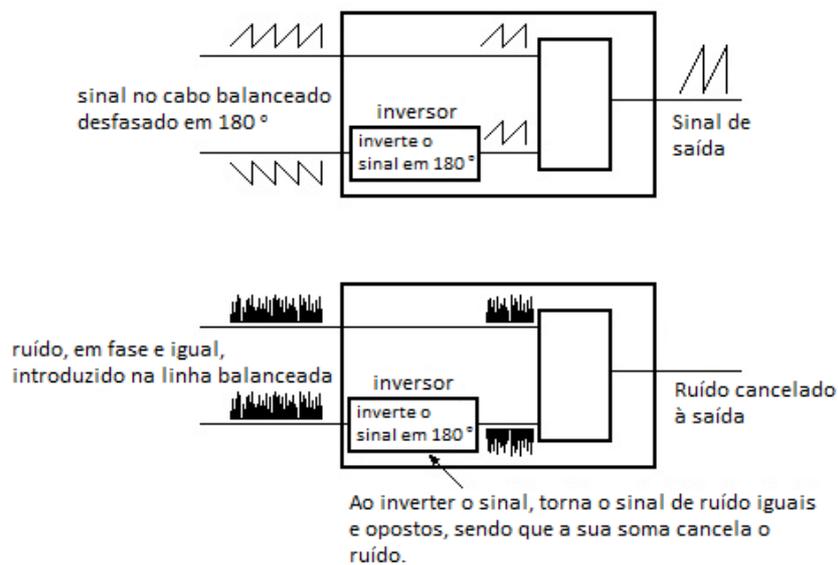


Ilustração 9 – Esquema do processo de eliminação de ruído numa transmissão balanceada

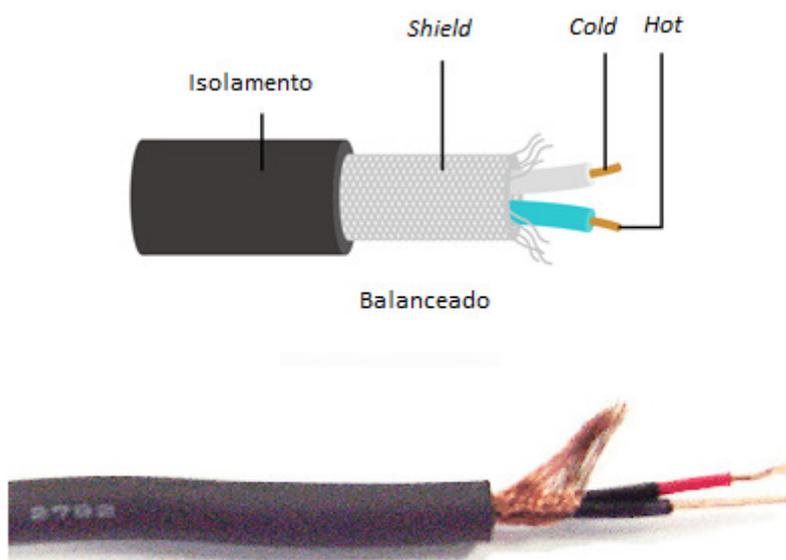


Ilustração 10 – Exemplo de um cabo Balanceado

O *shield* continua com o intuito de proteger os condutores de interferências indesejadas, fazendo a ligação entre circuitos exatamente da mesma maneira que num canal não balanceado.

O uso de *Inputs* e *Outputs* balanceados, quando usado corretamente, pode limpar “hums”, zumbidos, RFI e outros ruídos no geral. Quando não usados corretamente, o seu objetivo pode ser parcialmente derrotado, mas a ligação provavelmente irá melhorar o SNR do sistema (Sinclair, 2009).

Os cabos que são usados nestas ligações são, por norma, cabos com conectores XLR de três pinos ou com conectores *jack* de 6.3mm de diâmetro, com três condutores (normalmente usado para ligação *stereo*). O cabo com conector *jack* que normalmente é visto como cabo *stereo*, neste caso, tomando a posição de balanceamento do sinal, portará o sinal apenas de um canal, isto é, será um transmissor *mono*.



Ilustração 11 – Exemplo de conectores XLR (Fêmea e macho, respetivamente)

2.6 O que é uma DI Box

Uma *DI box* tem dois propósitos distintos. O primeiro é fazer a conversão de um sinal de alta impedância de um instrumento ou microfone com sinal de alta impedância (equipamento pouco comum) para um sinal de baixa impedância (comum entre os microfones), tornando-se assim ideal para ligação com equipamentos de estúdio que têm este requisito para um funcionamento ideal. O segundo propósito é tornar um sinal não balanceado em balanceado.

Tendo em conta a informação já referida anteriormente, podemos concluir que uma parte indispensável para complementar este projeto é introduzir uma *DI Box* de modo a utilizar também instrumentos. Existem dois tipos de *DI Box*, uma passiva e outra ativa, tendo cada uma destas vantagens e desvantagens.

Uma *DI Box* passiva não necessita de circuito de alimentação, sendo esta a maior vantagem sob as *DI Box* ativas. Não existe a hipótese de deixar de funcionar quando a bateria acaba, nem mesmo a

hipótese do circuito amplificador sofrer de *overload* e distorcer o sinal. No circuito passivo, dá-se uso a um transformador e, no caso de haver saturação do sinal, esta ocorre de maneira semelhante a uma válvula, criando assim um resultado semelhante ao de uma compressão agradável ao ouvido. Neste tipo de *DI Box* é também fácil de eliminar possíveis *ground loops*, pois o transformador serve como isolador entre o circuito da mesa de mistura e o instrumento.

Numa *DI Box* ativa temos mais opções como controlo de ganho e tom do sinal, sendo essa a maior vantagem em relação às *DI Box* passivas. No entanto ao escolher o circuito ativo cria-se distorção do sinal, ao invés de saturação, que a certo ponto torna-se desagradável (esquema eletrónico no Anexo I).

Regra geral, usa-se uma *DI Box* passiva quando o instrumento é ativo (teclado ou guitarra com *pickup* ativo, por ex.) e uma *DI Box* ativa quando o instrumento é passivo (baixo com *pickup* passivo, por ex.).

Neste projeto foi implementada uma *DI Box* passiva, procurando evitar problemas de *ground loops* e de modo garantir um som mais harmonioso, procurando a saturação ao invés da distorção.

2.7 Válvulas

Existem vários tipos de válvulas diferentes, cada uma delas capaz de ter vários propósitos. Assim sendo, a sua classificação/distinção é feita pela diferença do número elétrodos que ela possui ao invés da função que esta irá desempenhar.

Com base no número de elétrodos podemos então nomear os principais, começando no mais simples com dois elementos e são chamados de díodos; com três elementos são chamados de tríodos; com quatro elementos chamam-se de tétrodo; cinco elementos de pêntodo.

As funções desempenhadas por este componente são variadas e com variações, mas por conveniência estas funções podem ser consolidadas em alguns grupos genéricos. A função a desempenhar não depende apenas do tipo de válvula mas também do circuito onde está inserida. Uma função vulgar deste equipamento é a de retificador, com o funcionamento igual a de um diodo (ilustração 12).

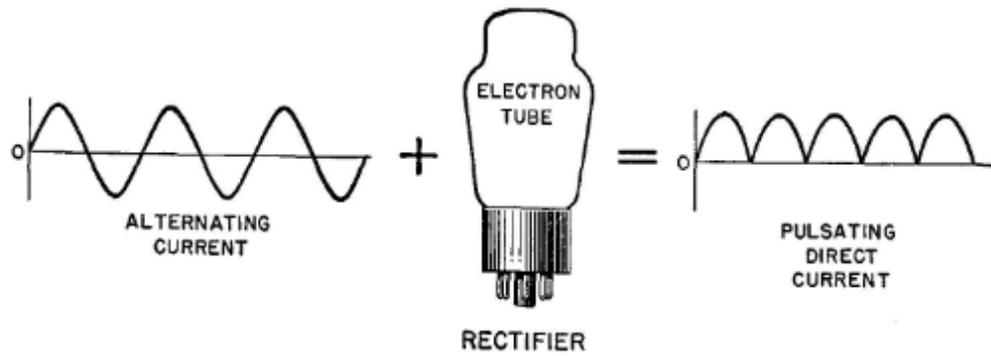


Ilustração 12 – Sinal resultante quando usada como retificadora de corrente alternada

Outra função comum, e a mais importante mencionar, é a função de amplificação. Conseguimos obter um sinal muito mais amplo à saída com o recurso a esta função, tendo como função a amplificação da tensão do sinal. Um sinal equivalente a 1 Volt de entrada pode facilmente corresponder a um sinal de 20V na saída. O rácio de amplificação está definido pelo circuito e válvula associada (ilustração 13).

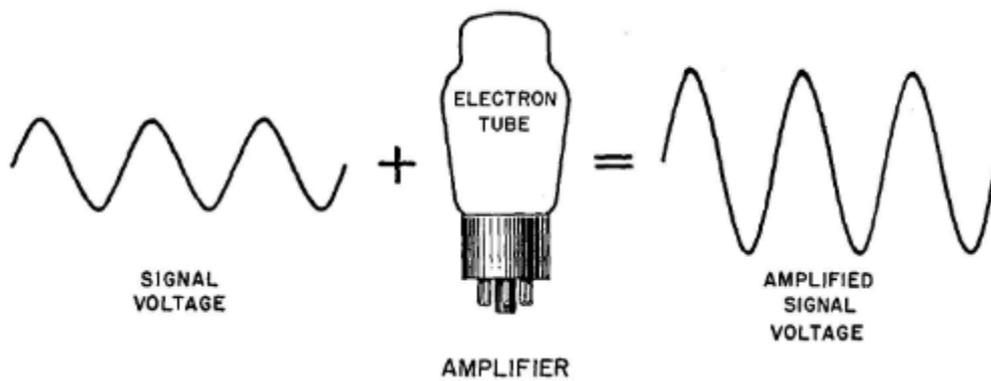


Ilustração 13 - Sinal resultante quando usada como amplificadora de sinal

Uma outra função capaz de ser desempenhada pelas válvulas e que foi importante no campo da comunicação, nomeadamente rádio, é a capacidade de usar um sinal de corrente contínua para gerar um sinal oscilante de alta frequência (Ilustração 14).

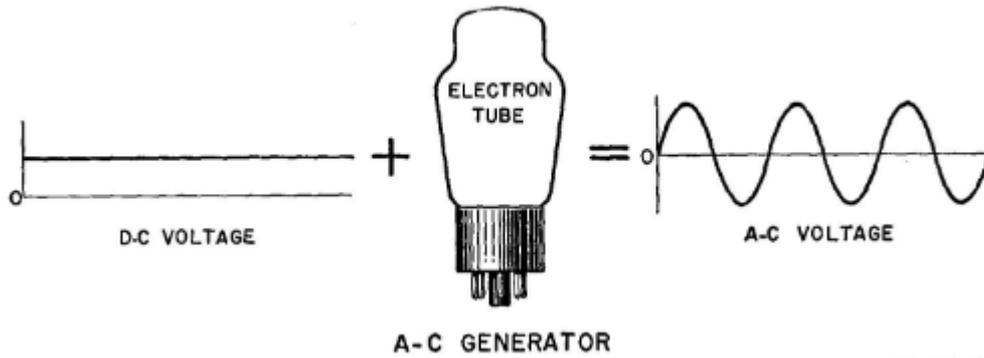


Ilustração 14 - Sinal resultante quando usada como gerador de sinal oscilador de alta frequência

As válvulas conseguem também modificar a forma das ondas de tensão e corrente, isto é, consegue alterar a amplitude destes relativamente ao tempo (ilustração 15 e 16).

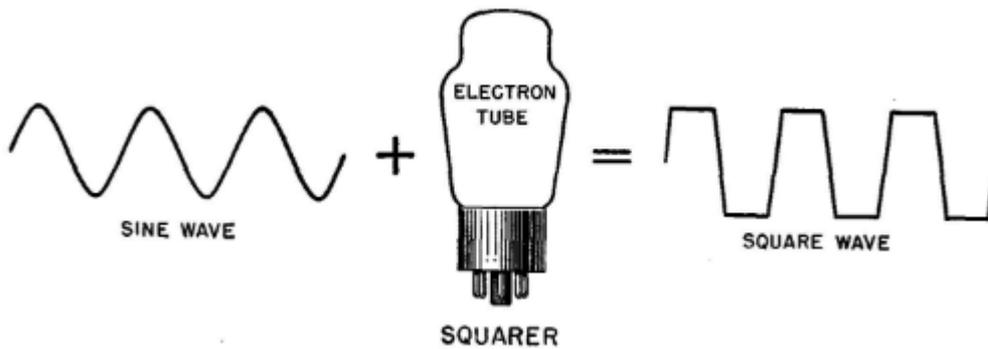


Ilustração 15 - Sinal resultante quando usada como modificador de onda

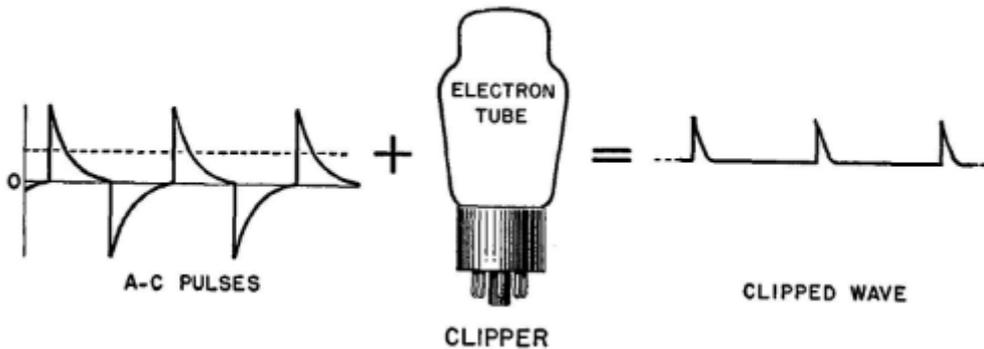


Ilustração 16 - Sinal resultante quando usada como gerador de sinal oscilador de alta frequência

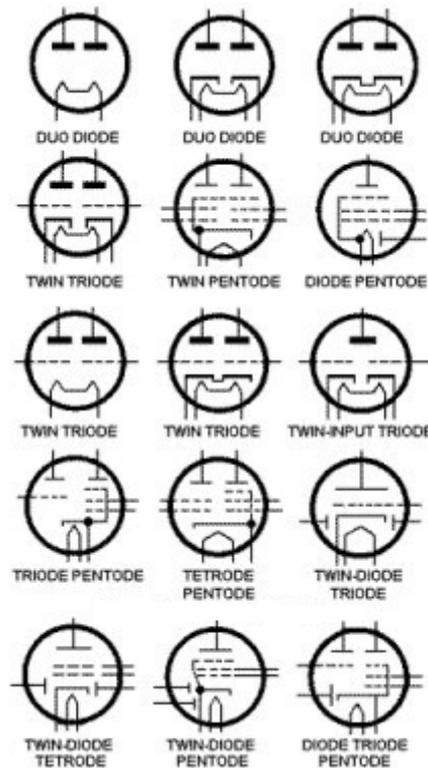


Ilustração 17 - Modelos de válvulas multi-unidade

Uma característica deste tipo de equipamento é que é fundamental a cápsula estar em vácuo, pois a presença de gases no seu interior torna impossível o método de transmissão de eletrões. Para além disso é também necessário atingir uma temperatura alta dentro da válvula para que esta troca de eletrões ocorra. Este aquecimento é feito por um filamento especialmente introduzido na válvula para este efeito, alimentado por uma tensão contínua proveniente de um regulador de tensão. Este aquecimento gera até uma pequena luz no interior da válvula, sendo esta uma referência de que a válvula está pronta a desempenhar o seu papel.

Todas as válvulas são compostas por pelo menos dois elétrodos, o cátodo e o ânodo (válvula díodo). O cátodo, emissor de eletrões, após ser aquecido forma uma nuvem de eletrões à sua volta à espera que uma tensão positiva seja aplicada ao ânodo. Ao introduzir uma tensão positiva no ânodo passa a haver uma transmissão de eletrões, sendo esta proporcional à tensão, ou seja, uma maior tensão aplicada resulta numa maior passagem eletrões do cátodo para o ânodo.

Numa válvula de tríodo existe um terceiro elétrodo denominado *grid* que controla este fluxo de eletrões através da tensão aplicada no mesmo. Esta válvula vai ser usada como amplificador de sinal, onde o *output* é à saída do ânodo ou *plate*. O sinal aplicado à *grid* é a do sinal de áudio que queremos amplificar, tendo este o controlo sobre movimento de eletrões que atravessam a válvula. Para exemplificar o funcionamento o mais simples é recorrer a uma onda sinusoidal. Durante o seu semi

ciclo positivo o fluxo de elétrons é privilegiado em função da amplitude da onda sinusoidal, isto é, quando maior a amplitude da senoide, maior o fluxo de elétrons a passar do cátodo para o ânodo. No semi ciclo negativo acontece precisamente o oposto, havendo uma repulsão proporcional à senoide mas sem atingir um fluxo nulo (de modo a preservar forma de onda no *output*) (Hood, 1997). Esta variação de fluxo de elétrons gera à saída um sinal idêntico ao aplicado na *grid* mas com maior amplitude (com ganho). O valor do ganho é definido pela válvula e o circuito onde ela se integra. Ligado ao ânodo (ao *output*) está um condensador (ou transformador) que filtra a tensão contínua e que dá seguimento ao caminho do sinal áudio.

Ao acrescentar novos elétrodos estamos a acrescentar controlo sobre a variação do fluxo de elétrons no interior da válvula. Válvulas com três elétrodos são os usados na pré-amplificação por fatores como o seu baixo ruído e baixa distorção, portanto, serão os únicos a ser abordados neste documento.

2.8 Amplificadores operacionais

Um amplificador operacional é um amplificador de sinal com um ganho idealmente infinito, assim como a sua largura de banda. É constituído por dois pinos de entrada e um de saída (e dois de alimentação), sendo esses sinais o V_{in+} , o V_{in-} e o V_{out} . A saída deste componente (V_{out}) é o resultado da diferença destes dois sinais de entrada com um ganho associado (V_{in+} e V_{in-}). No seu interior, um amplificador operacional é constituído por um circuito semelhante ao apresentado na ilustração 18.

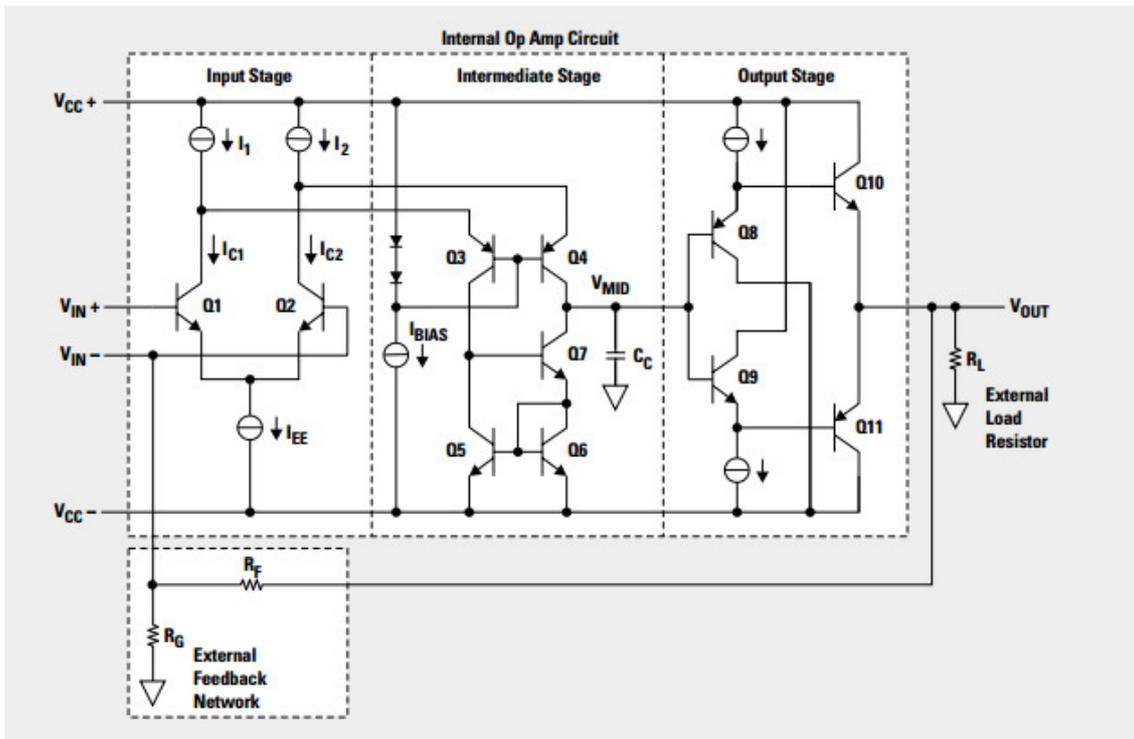


Ilustração 18 – Esquemático tipo de um amplificador operacional

O par de transistor de entrada Q1 e Q2 são emparelhados, o que significa que quando a tensão é nula nos dois pinos de entrada, as correntes que os atravessam será igual e o V_{out} será nulo. Por sua vez, ao introduzir tensão nos pinos de entrada vai fazer com que a corrente I_{C1} se torne diferente da corrente I_{C2} . O par Q3 e Q4 desdobram as correntes referidas para um circuito de espelho de corrente de Wilson, formado pelo Q5, Q6 e Q7. Este espelho tenta manter a mesma corrente nos coletores. Qualquer variação de correntes I_{C1} e I_{C2} gera uma tensão à saída do espelho, no ponto representado na imagem por V_{MID} . O condensador C_c , representa um conjunto de condensadores com o propósito de estabilizar o amplificador através de compensação por pólo dominante. Neste tipo de compensação de frequência consegue-se evitar oscilação, tendo como inconveniente uma diminuição da gama de frequências e uma diminuição do *slew rate* (velocidade de resposta), impossibilitando a reprodução de rápidas transições (altas frequências) com altas amplitudes corretamente. O V_{MID} é então introduzido ao estágio de saída, sendo este o Q8 e Q10 ou o Q9 e Q11, dependendo da polaridade do sinal no momento (Karki, 2001).

Este tipo de componentes, apesar de compactos e com circuitos completos no seu interior, tem as suas limitações e desvantagens. Este componente tem uma resposta não linear, causando um estado de saturação quando o sinal de input sair fora da região linear. Este limite antes da saturação está dependente do tipo de amplificador operacional e da tensão de alimentação aplicada nele. Um outro aspeto importante a ter em conta é a resposta em relação à distorção harmónica total (*total harmonic*

distortion ou THD). No estado de saturação um circuito integrado, devido à sua resposta não linear, forma uma onda quadrada. Este tipo de onda, matematicamente falando, é equivalente à soma de ondas sinusoidais com a mesma frequência numa série de múltiplos ímpares com amplitude decrescente. Isto é, uma onda quadrada com 1V de pico e frequência de 50Hz é equivalente à soma de 1 onda sinusoidal com 1V de pico a 50Hz multiplicada por $4/\pi$, somado a uma senoide com 1/3V de pico a 150Hz multiplicada por $4/\pi$, somado a uma senoide de 1/5V de pico a 250Hz multiplicada por $4/\pi$, somado a uma senoide de 1/7V a 350Hz multiplicada por $4/\pi$, (...) até ao infinito. Por outras palavras, significa que devido às suas características, este componente apenas produz harmónicos ímpares quando entra em saturação.

2.9 Válvulas vs. Amplificadores operacionais

O engenheiros elétricos, especialmente aqueles que desenvolviam os equipamentos de gravação, tentaram provar que não existia diferença alguma entre o som de válvulas e transístores. Para isso faziam-se apresentar das folhas técnicas que mostravam realmente que, de acordo com os parâmetros medidos, a diferença entre os dois era marginal. Mas a psicoacústica defendia o contrário. A pergunta que se fez foi se havia algum parâmetro importante que não estava a ser medido. Um destes engenheiros envolvidos chegou mesmo a afirmar que a diferença no som baseava-se no fato de haver menos distorção com os transístores, e era uma questão de hábito até se se começar a apreciar a nova tecnologia.

Como a psicoacústica indicava, havia grandes diferenças e todos os músicos e profissionais da área referiam os mesmos pontos. Os transístores trazem um resultado limpo mas sem clareza. Não havia separação do som dos vários instrumentos e havia muito “buzz” e *white noise* adicionado. Muito pelo contrário, as válvulas traziam clareza e “corpo”, mesmo quando reproduzidos a baixas amplitudes (volume baixo). Foi até dito por um guitarrista que com o uso de válvulas, o baixo (instrumento guitarra-baixo) soava uma oitava abaixo da que realmente estava a ser tocada (a mesma nota mas a metade da frequência – som mais grave, mais “corpulento”). Neste momento percebeu-se que a resposta do ouvido humano não será equivalente à representação dada pelo osciloscópio.

Após testes feitos em cerca de 50 circuitos tipo, foi capaz de se fazer uma leitura do THD de cada um dos tipos de componentes e do seu funcionamento em função do ganho do circuito.

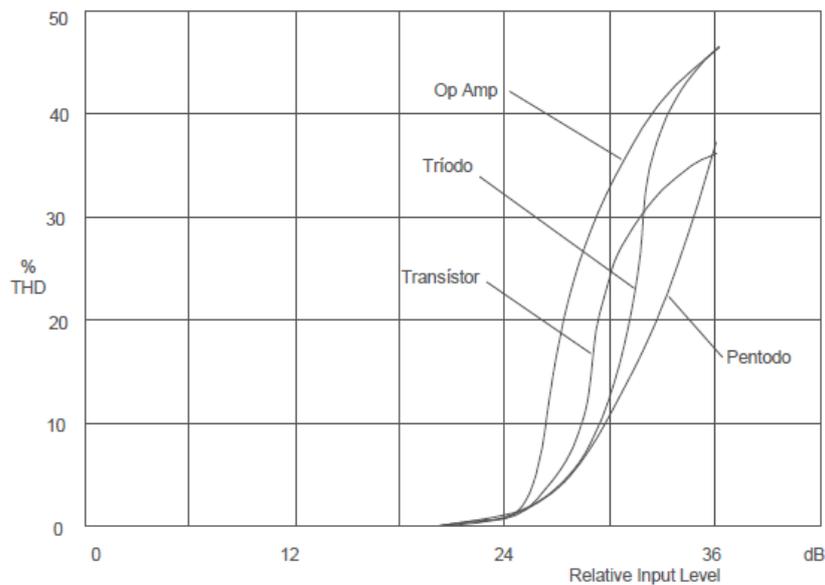


Ilustração 19 – Características de distorção das tecnologias usadas em pré-amplificação

A ilustração 19 mostra as características de distorção tipo dos 4 elementos de amplificação usados em pré amplificadores, com dois ou mais estados de amplificação (como os usados neste projeto), com um ganho de 40dB. Todos eles mantêm-se semelhantes até ao ponto de THD de 1% (aproximadamente a 24dB de ganho). Com este método de análise obteve-se uma resposta similar a nível de ascensão de THD, concluindo-se que esta análise não é relevante comparando com os resultados audíveis. Partiu-se então para um analisador de espectros para medir a amplitude de cada harmónico. Foram estudados os primeiros 7 harmónicos.

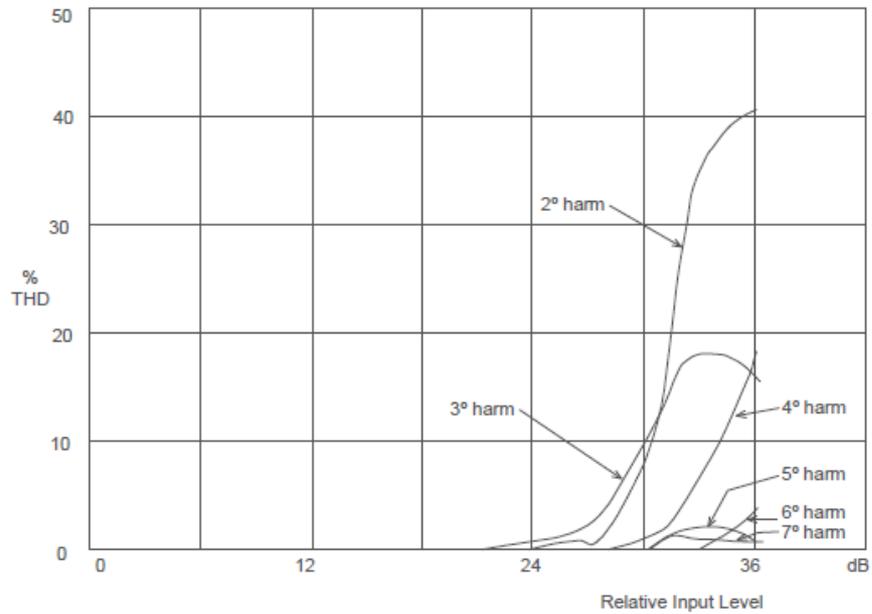


Ilustração 20 – Distorção harmónica tipo de um pré-amplificador com válvula de triodo

A ilustração 20 representa a THD dos primeiros 7 harmónicos num pré-amplificador tipo, com dois estados de amplificação com válvulas de triodo. A característica identificativa na amplificação com válvulas de triodo é a grande dominância da THD do segundo harmónico em relação aos restantes. Independentemente do esquema utilizado na amplificação com válvulas de triodo, estas curvas representam as características tipo destes amplificadores.

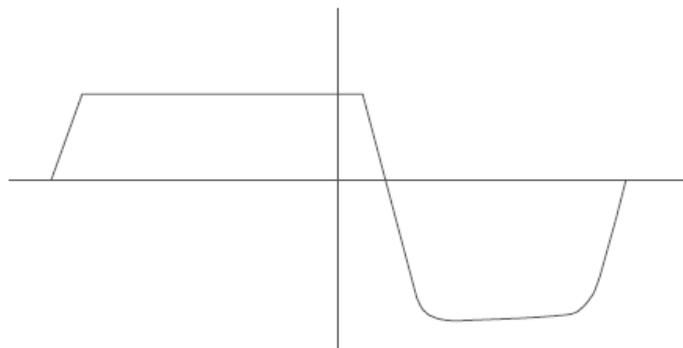


Ilustração 21 – Onda de saída em *overload* de um pré-amplificador com válvula de triodo

A ilustração ilustração 21 mostra a forma de onda de saída de uma onda sinusoidal num estado de *overload* de 12dB. O efeito de *clipping* não é simétrico e o *duty cycle* está desfasado. Esta característica também é comum a este tipo de amplificador (triodo).

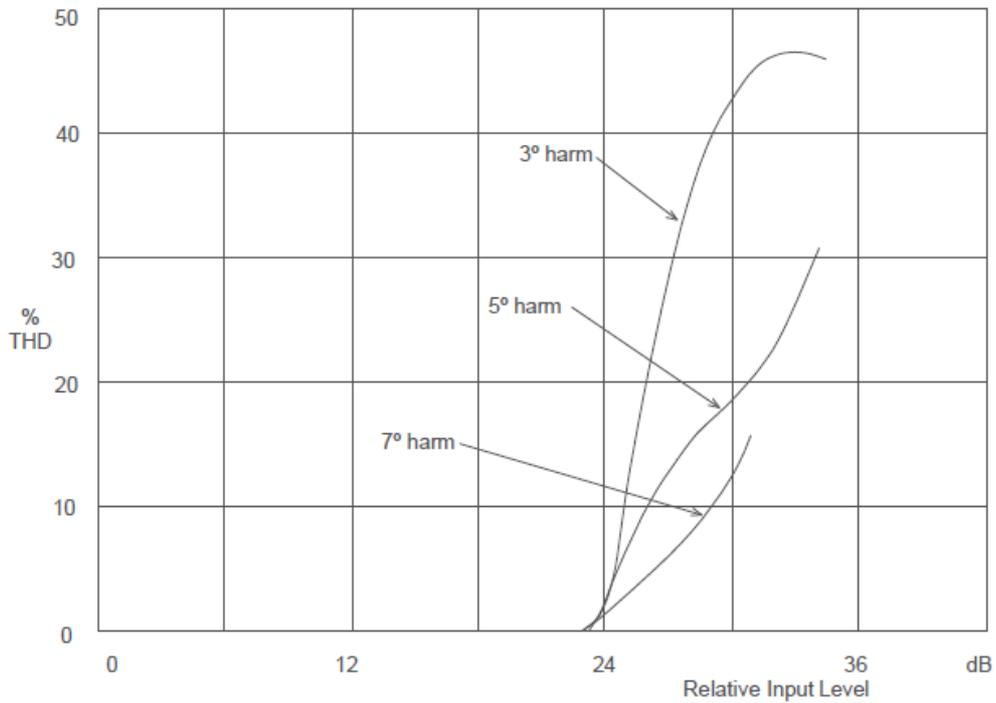


Ilustração 22 – Distorção harmónica tipo de um pré-amplificador com amplificador operacional

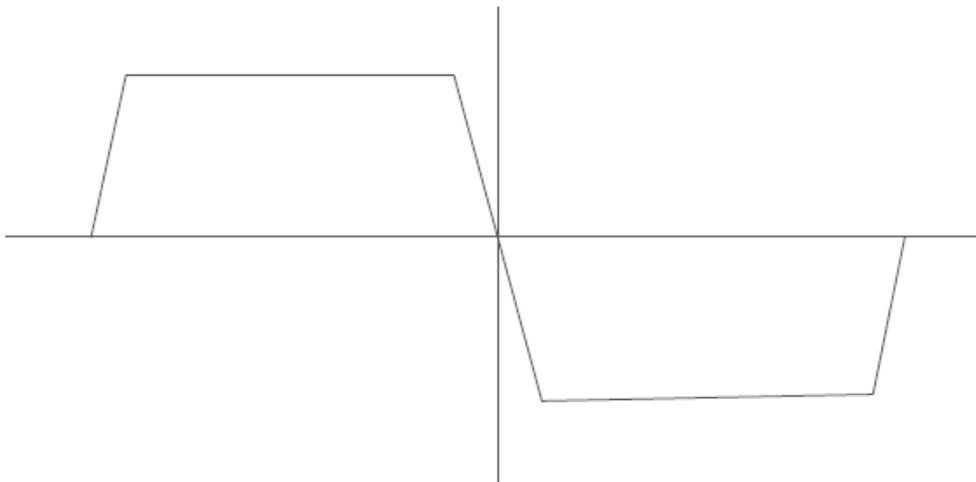


Ilustração 23 - Onda de saída em *overload* de um pré-amplificador com amplificador operacional

O terceiro harmónico aumenta distintivamente, sendo ele o componente dominante (similar ao transistor). Com grande presença, com a mesma origem, são também o quinto e sétimo harmónico. Como descrito, todos os harmónicos pares são suprimidos por completo. A forma de onda da ilustração 23 representa, como esperado, uma onda quadrada. Classificando por grupos, os

amplificadores operacionais são os que apresentam características mais uniformes com desvios não relevantes às curvas aqui apresentadas.

Existe um paralelo próximo entre distorção elétrica e coloração no tom musical que é a chave pela qual as válvulas soam diferentes da tecnologia que as veio substituir.

A característica primária da coloração de um instrumento é determinada pela força dos seus primeiros harmónicos. Cada um destes primeiros harmónicos produzem o seu próprio efeito característico quando é dominante ou pode alterar outro harmónico dominante se for proeminente. De uma maneira simples, os primeiros harmónicos estão divididos em dois grupos. Por um lado temos os harmónicos ímpares que produzem um som “parado” ou “tapado” enquanto que os harmónicos pares produzem um som de “coro” ou de “canto”.

Não há dúvida que o segundo e terceiro harmónico são os mais importantes de um ponto de vista de distorção harmónica. Musicalmente, o segundo harmónico é uma oitava acima da fundamental e é quase inaudível, no entanto traz “corpo” ao som, fazendo-o parecer mais “cheio”. O terceiro por sua vez já é uma quinta (intervalo entre uma nota e outra, que esteja a quatro graus de distância da primeira, dentro de uma escala), que produz um som considerado pelos músicos de “tapado” ou “abafado”. Assim, ao invés de tornar o som cheio, este harmónico traz uma qualidade “metálica” ao som que se torna desagradável à medida que a sua amplitude aumenta. No entanto um segundo harmónico forte em conjunto com este terceiro harmónico, tende-se a perder esse efeito “abafado”. Adicionando o quarto e quinto harmónico introduz-se um som com carácter mais “aberto” e com a adição dos menos pronunciados sexto e sétimo harmónico adicionamos um toque de som “nervoso”, mais “estridente” mas de forma controlada, sendo agradável. Quando os harmónicos de maior nível estão muito presentes, podem trazer qualidade dissonante ao som, por isso é preciso ter em consideração a sua presença porque o ouvido humano é bastante sensível a estes sons estridentes.

Uma válvula, quando sobrecarregada, gera um espectro completo de harmónicos que aumenta a sua amplitude à medida que é levado mais perto do seu estado de saturação. Num estado elevado de saturação, estão também significativamente presentes os harmónicos superiores ao sétimo, trazendo aquele som “nervoso” que também é traduzido pelo ouvido humano como um som mais “alto”. Uma outra característica das válvulas é o seu alargado intervalo de sobrecarga de 20dB.

Os amplificadores operacionais produzem elevados harmónicos mesmo com um baixo nível de sobrecarga. O som resultante, como referido, é “metálico” e “estridente”, sendo reconhecido pelo ouvido como altamente distorcido. Dado que este som é tão significativo, age como um aviso de “danos” (a nível de som) de sobrecarga. Consequentemente este tipo de componente raramente opera

na sua região de saturação. Isto traz resultados limpos de amplificação com pouca coloração com boa gama dinâmica dentro das limitações do amplificador.

Amplificadores a válvulas diferenciam-se dos amplificadores operacionais porque podem ser operados na região de sobrecarga sem adicionar distorção significativa. A combinação da resposta na região de sobrecarga em conjunto com a estrutura de harmónicos formam quase um compressor ideal para gravação. Na margem entre os 15 e 20dB da margem “segura” de sobrecarga, eletricamente o *output* aumenta apenas 2 a 4dB, atuando como um limitador (compressor com rácio muito alto, normalmente acima de 20). Este efeito causa os sinais aparentemente mais “altos” apesar de não aparecer representado nos indicadores de volume.

As válvulas soam mais “alto” e têm melhor SNR e, como como o sinal amplificado é gravado a níveis mais elevados (mesmo os sons mais “baixos”, devido ao efeito de “compressão”) o som fica a partir desse ponto mais separado dos ruídos introduzidos a jusante do sistema, sendo fácil obter um sinal limpo no resultado final (Hamm, 1973).

3 CIRCUITOS DO PROJETO

Este projeto envolve circuitos para que o resultado final seja uma interface *all-in-one* (tudo em um) num pequeno estúdio. É composta por dois circuitos de pré-amplificação, dois circuitos equalizadores e um compressor. Nesta secção é feita uma pequena análise a cada um dos circuitos e é apresentado um diagrama das entradas saídas dos mesmos.

3.1 Pré-amplificador “G9”

O circuito utilizado como pré-amplificador com recurso a válvulas é destacado pela sua performance, simplicidade e por ser bastante completo. Trata-se de um circuito de preamplificação puramente por válvulas, de alto ganho, com o sinal de entrada e saída balanceados. A seguinte ilustração mostra o diagrama dos *inputs* e *outputs* deste circuito.

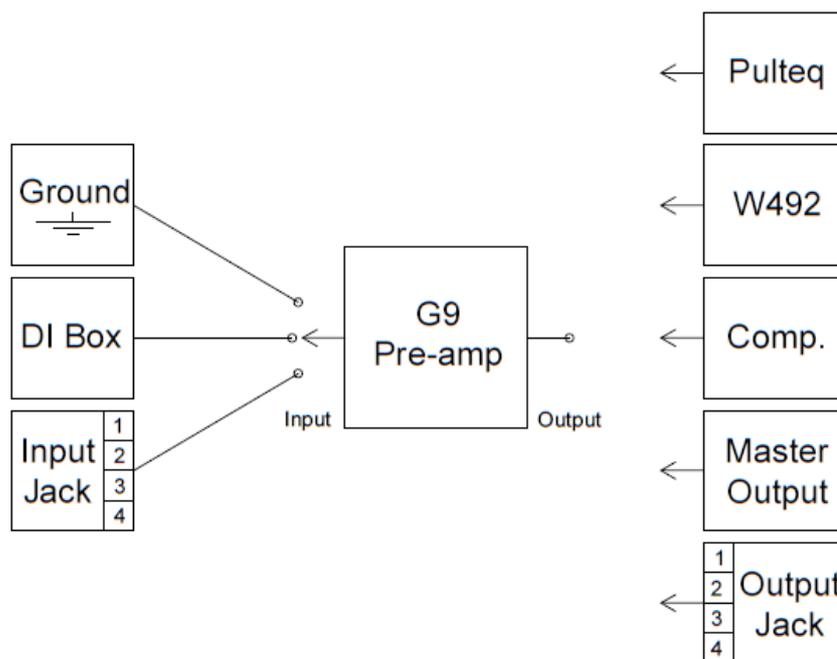


Ilustração 24 – Diagrama de ligação do Pré-amplificador G9

O sinal atravessa apenas as válvulas, transformadores e outros componentes passivos, mantendo a integridade do sinal. O propósito de manter os equipamentos activos fora do circuito de amplificação é para evitar a distorção típica desse tipo de equipamento. Foi dado uso a semicondutores apenas na secção da alimentação do circuito, porque não existe uma relação directa com a amplificação e/ou distorção/saturação.

O utilizador deste pré-amplificador tem ao seu controlo 5 *switches* rotativos. O primeiro a ter em conta define o tipo de sinal de entrada, isto é, se é proveniente de um microfone, microfone com *Phantom Power* e *line* (ou linha, sofrendo atenuação).

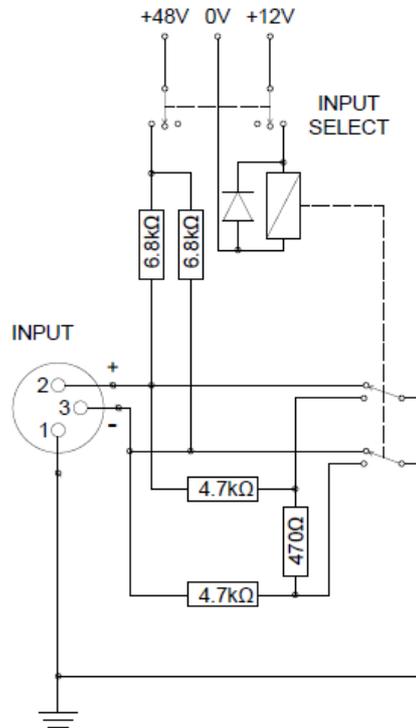


Ilustração 25 - Selecção do tipo de sinal de entrada

Phantom power é o nome que se dá à tensão de alimentação de alguns microfones (e DI box) para o seu correcto funcionamento. É uma tensão contínua aplicada sobre ambos os condutores do sinal balanceado, com destino ao equipamento de origem deste mesmo sinal. O nome de “*phantom*” (fantasma) deve-se a estar “escondido” nos condutores por onde o sinal é transmitido.

Outros *switches* permitem inverter a fase do sinal, controlar o ganho do sinal de entrada assim como o nível do sinal de saída (volume), sendo estes independentes um do outro de modo a criar espaço para resultados mais criativos (possibilita criar distorção usando um ganho elevado e alterar o volume desse sinal de forma independente). O último controlo é um filtro passa-baixo para eliminar altas frequências indesejadas.

O sinal é transformado em sinal não balanceado ao atravessar o transformador de *input* e novamente em balanceado ao atravessar o transformador de *output*.

O circuito inclui duas válvulas de duplo tríodo para amplificação (modelo ECC82). O primeiro circuito de amplificação trata-se de um circuito *standard* de *feedback gain-controlled*, ou seja, um circuito de ganho controlado por um *switch* de 11 posições (11 valores de ganho possíveis) com realimentação

negativa (*negative feedback*). A introdução deste tipo de *feedback* torna o circuito mais estável e diminui a distorção no sinal. Como consequência negativa, este *feedback* diminui o ganho do circuito amplificador, pois o sinal à sua saída (sinal invertido em relação à entrada) é também adicionado à entrada do sinal.

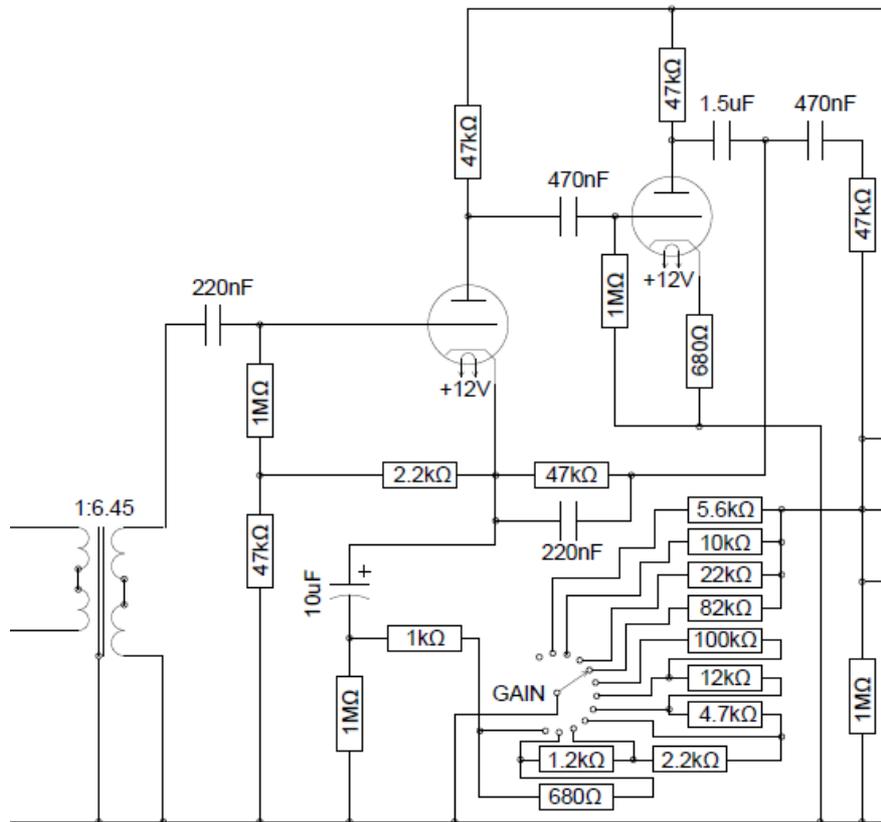


Ilustração 26 – Desbalanceamento do sinal e primeiro estágio de amplificação

O segundo estágio de amplificação recorre a um circuito *push-pull* denominado SRPP, que funciona necessariamente em classe A. O output deste circuito é sempre dado pela saída do cátodo da segunda válvula, normalmente representada em cima da primeira nos esquemáticos.

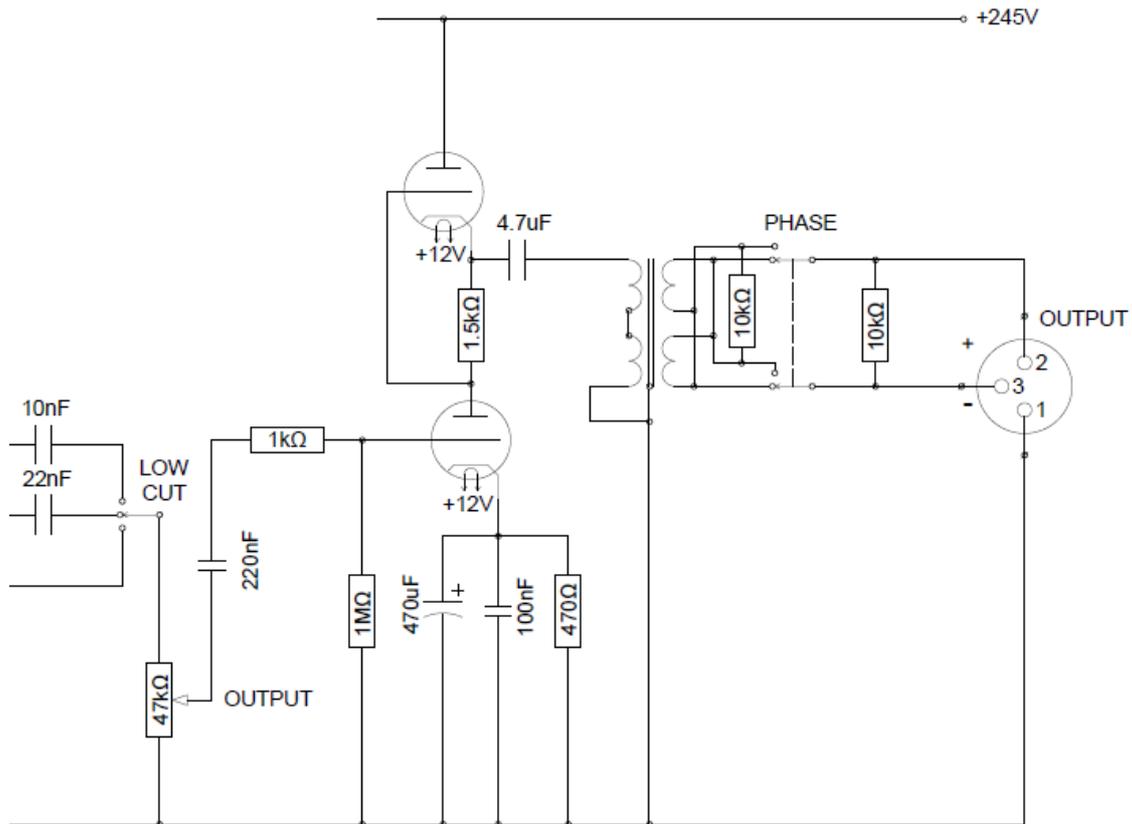


Ilustração 27 – Segundo estágio de amplificação e balanceamento do sinal

À medida que a corrente que atravessa a válvula representada em baixo, a resistência denominada na Ilustração 2.6 de Rak sofre uma variação de tensão. Esta variação de tensão também é sentida na *grid* da válvula de cima, o que gera alterações na condução de corrente do mesmo. Como a resistência de carga (RL) se encontra entre as duas válvulas e o sinal *ground*, proporciona um caminho para a absorção de corrente (Valley & Wallman, 1948; Blencowe, 2010). No nosso circuito de pré amplificação G9, temos à saída deste estágio SRPP um condensador de bloqueio de tensão contínua e o transformador de saída que faz o balanceamento do sinal (esquema eletrónico completo no Anexo II).

3.2 Pré-amplificador “5 dollar”

Este circuito de pré-amplificação com recurso a amplificadores operacionais tem como características principais a simplicidade de circuito, o seu tamanho reduzido (em relação ao outro circuito usado neste projeto) e a sua performance. A seguinte ilustração mostra o diagrama dos *inputs* e *outputs* deste circuito.

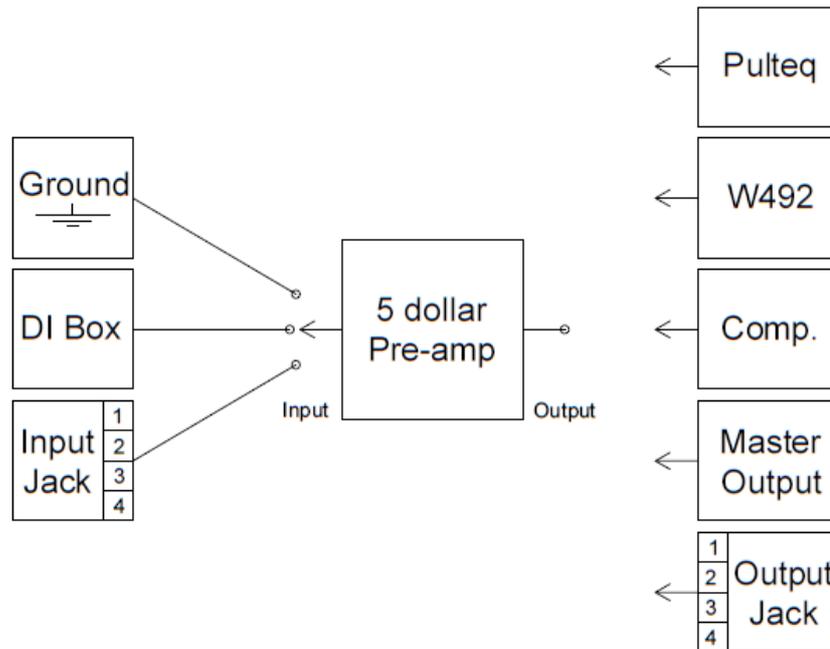


Ilustração 28 - Diagrama de ligação do Pré-amplificador 5 *dollar*

A amplificação do sinal é toda ela feita por um único circuito integrado, o INA217. Este componente foi desenhado para ser usado em aplicações profissionais de amplificação de microfones e apenas usa um potenciômetro em série com uma resistência para controlo de ganho, sendo que a resistência tem como única função definir o ganho máximo do circuito. Internamente este circuito integrado é constituído, de uma forma simplificada, por um típico amplificador com três amplificadores operacionais, desenvolvido a pensar em aplicações áudio. O circuito tem como entrada o sinal balanceado o que lhe permite fazer um cancelamento de ruído praticamente completo.

O INA217 e as resistências associadas ao ganho não tornam o circuito completo. Este circuito complementa-se com a adição da possibilidade da alimentação *Phantom Power*, ligado a uma resistência de proteção para evitar de sons de “click” ao ser ligado. Para além disso temos condensadores nos pinos de entrada para eliminar qualquer tensão contínua indesejada no sinal a ser amplificado, um conjunto de díodos para proteção do INA217 contra tensões altas inesperadas e um circuito integrado (OPA137) para eliminar a tensão contínua de *offset* na saída.

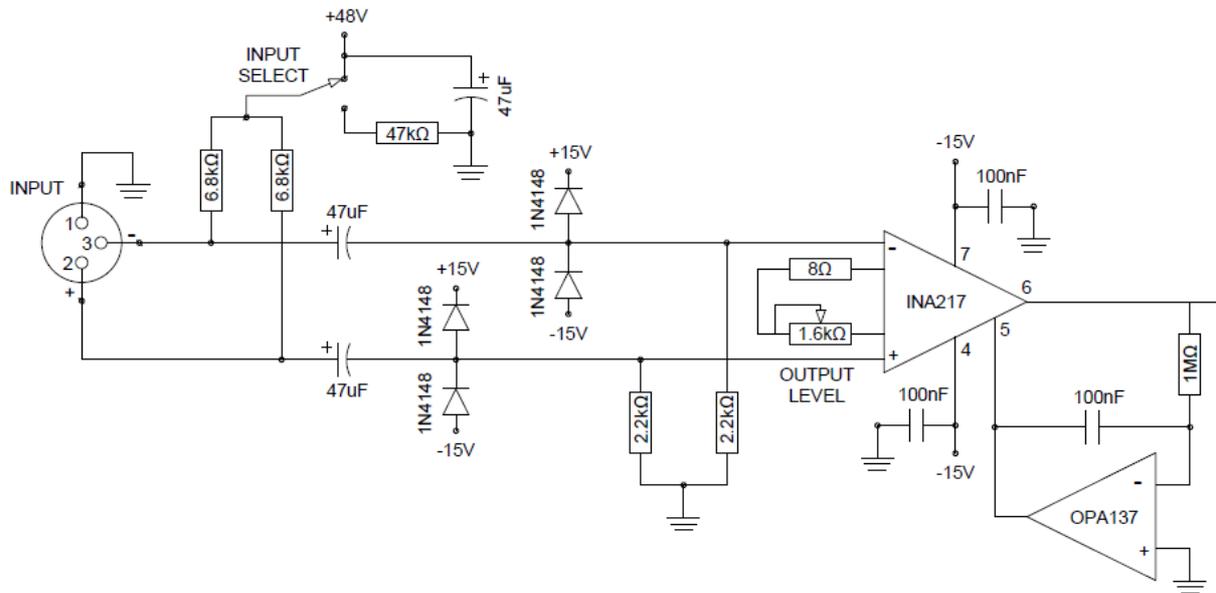


Ilustração 29 – Controlo do tipo de *input* e controlo do ganho

Adicionalmente, para manter as ligações entre equipamentos sempre balanceadas, foi acrescentado ao circuito original um último circuito integrado (NE5532) ligado de modo a transformar o sinal não balanceado de *output* num sinal balanceado (esquema eletrónico completo no Anexo III).

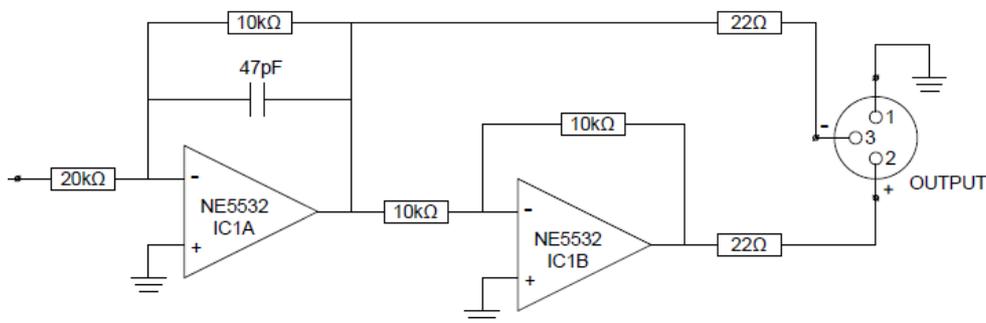


Ilustração 30 - Circuito de balanceamento de sinal

3.3 Equalizador “Pulteq”

O equalizador a válvulas escolhido neste projeto é um equalizador puramente passivo. É composto por dois estágios, sendo o primeiro relativo à parte responsável pela equalização enquanto que o segundo é um estágio de *buffer*. Os seus controlos passam por controlo de frequência a aplicar o filtro e a sua intensidade. A seguinte ilustração mostra o diagrama dos *inputs* e *outputs* deste circuito.

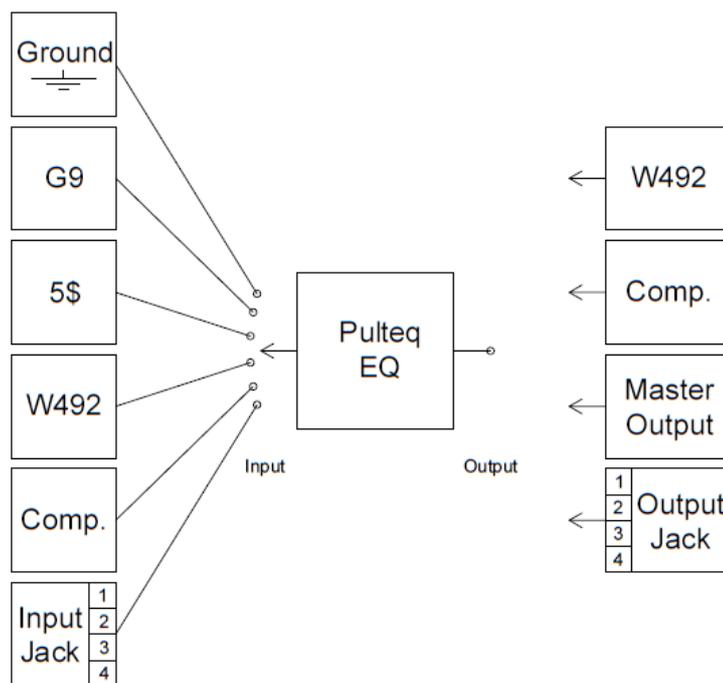


Ilustração 31 - Diagrama de ligação do Equalizador Pulteq

Como foi dito, trata-se de um equalizador puramente passivo, isto é, um equalizador composto exclusivamente por resistências, condensadores e indutâncias. Foi desenhado e é usado para trabalhar principalmente baixas frequências e dar-lhes uma presença de grande qualidade, sem o típico efeito de abafar as restantes frequências. Como seria de esperar os filtros estão pensados para trabalhar até às altas frequências mas com ganhos não tão notáveis como nesta gama de baixas frequências. Os controlos deste equalizador são de seleção da baixa frequência e controlo corte e/ou *boost* (ganho) num filtro *shelving*; seleção de frequência alta e controlo de *boost* e Q (curva de ganho) num filtro *bell*; e seleção de uma frequência alta e o controlo de corte sobre essa frequência num outro filtro *shelving*. Os filtros estão desenhados para funcionarem nas seguintes gamas de frequências:

- Filtro shelving de baixa frequência: +/-15dB entre os 20 e os 100Hz;
- Filtro *bell*: -20dB entre os 2100Hz e 18kHz;
- Filtro de shelving de alta frequência: +20/+14dB (em função do Q) entre os 5k e 21kHz;

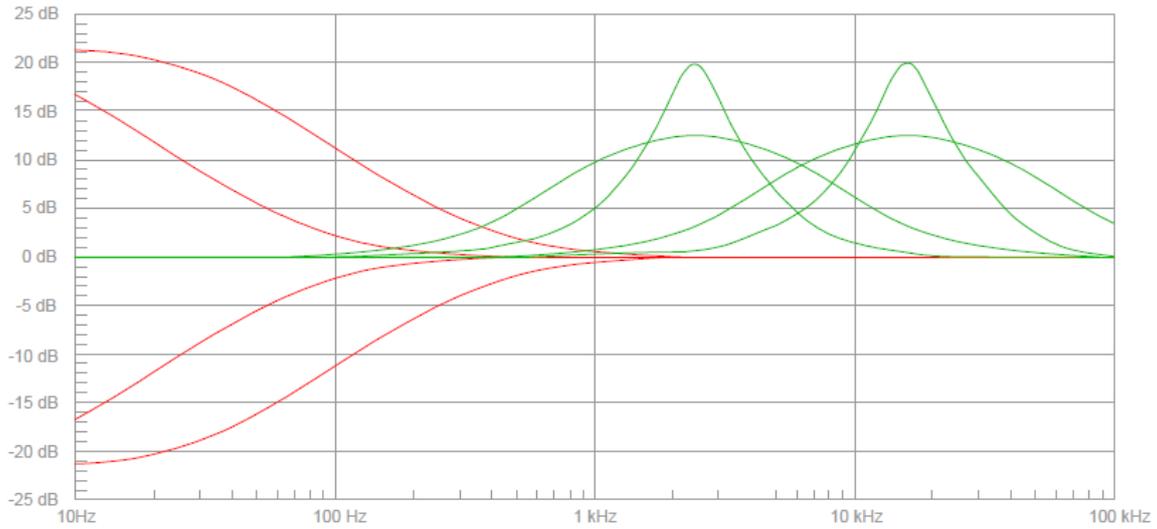


Ilustração 32 - Curvas dos filtros *shelving* implementados no circuito com válvulas

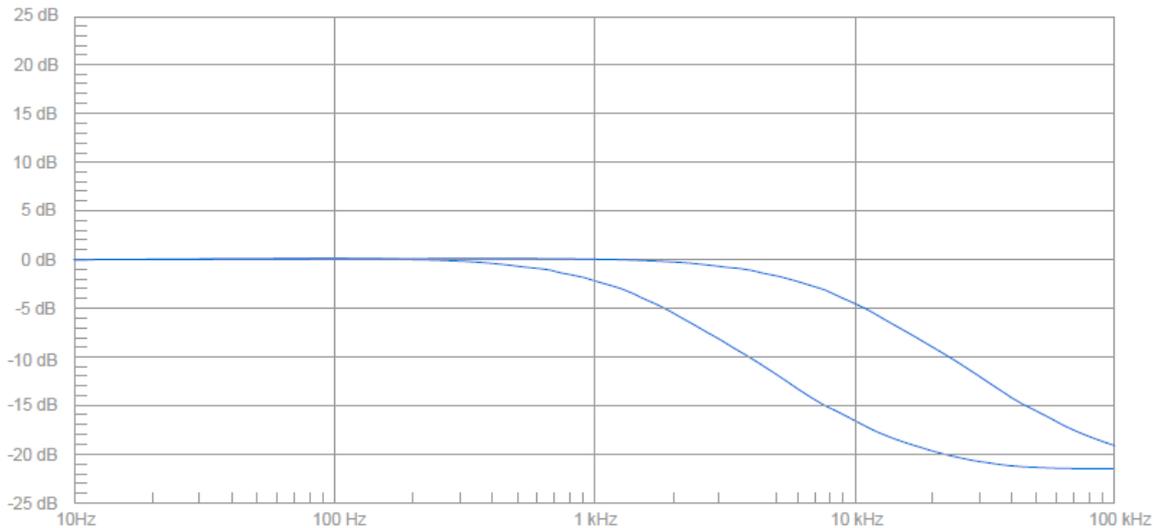


Ilustração 33 - Curvas do filtro *bell* implementado no circuito com válvulas

Como se trata de um circuito puramente passivo, a alteração de um destes controlos pode alterar o resultado noutros. Isto é, como não existe o componente ativo que cria uma referência virtual e elimina a interação de componentes em “percursos” paralelos, estamos sujeitos a “infiltração” de correntes e tensões por parte destes “percursos”. Isto é, ao aplicar ganho e corte com amplitudes iguais, não estamos a anular o seu efeito mas sim criar uma interação interessante sobre os dois devido aos componentes parasitas presentes nos componentes passivos que não estão calculados nos esquemáticos.

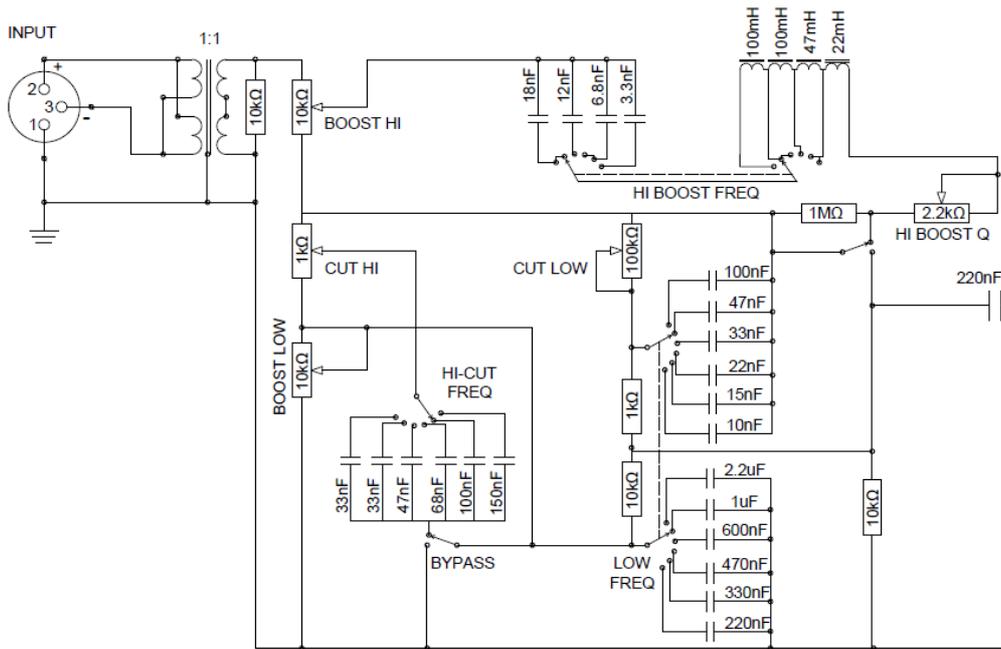


Ilustração 34 - Desbalanceamento e equalizador passivo

A segunda secção é de *buffer*, constituída por uma ligação SRPP com recurso a uma válvula de duplo triodo semelhante à usada no Pré-amplificador G9. Este estágio está desenhado para ter uma ganho unitário ou próximo, tendo como função principal a diminuição da impedância de *output* e adicionar a tonalidade característica das válvulas tão pelos audiófilos. A combinação deste estágio com o transformador de saída (e com o de entrada) permite uma resolução e detalhe de qualidade superior (esquema eletrónico completo no Anexo IV).

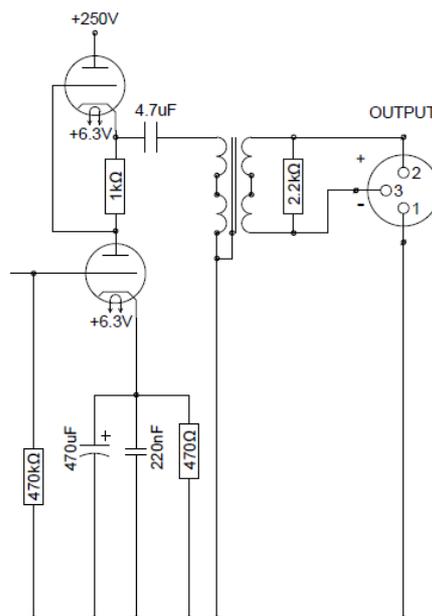


Ilustração 35 - Estágio de *buffer*

3.4 Equalizador “W492”

O equalizador de amplificadores operacionais é constituído por quatro estágios de equalização. Este circuito distingue-se pelas suas qualidades de baixa distorção, pelo seu tamanho compacto e a sua relação com a alta performance. Para além disso, possibilita escolher quais os filtros que desejamos integrar no sinal. A seguinte ilustração mostra o diagrama dos *inputs* e *outputs* deste circuito.

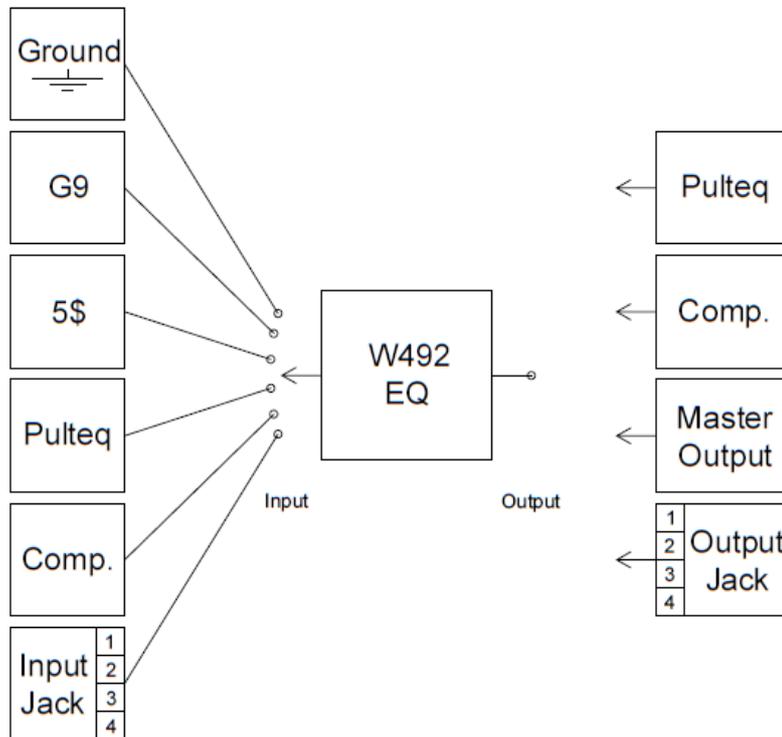


Ilustração 36 - Diagrama de ligação do Equalizador W492

O circuito é constituído por dois tipos de filtro diferentes, o filtro de shelving e o filtro de bell. Para cada um destes dois tipos, temos dois filtros em frequências distintas de atuação. Pela ordem da gama de frequências, temos primeiro um filtro de *shelving*, de seguida dois filtros de *bell* e novamente um filtro *shelving*. Cada um destes filtros tem a controlo de frequência, ganho e também a possibilidade de fazer *bypass*, permitindo ativar apenas os filtros desejados no sinal (esquema eletrónico completo no Anexo V).

Os filtros estão desenhados para funcionarem nas seguintes gamas de frequências:

- Filtro shelving de baixa frequência: +/-15dB entre os 50 e os 400Hz;
- Filtro *bell* de média/baixa frequência: +/-15dB entre os 75Hz e 1kHz;
- Filtro *bell* de média/alta frequência: +/-15dB entre os 1k e 16kHz;
- Filtro de shelving de alta frequência: +/-15dB entre os 3k e 10kHz

Abaixo representados estão os gráficos respectivos, onde é possível ver a forma de onda e a gama afetada pelos filtros. Na ilustração 29 estão representados os filtros de shelving de baixa e alta frequência (a vermelho e azul, respetivamente). Na ilustração 30 os filtros bell de média/baixa e média/alta frequência (a amarelo e verde, respetivamente).

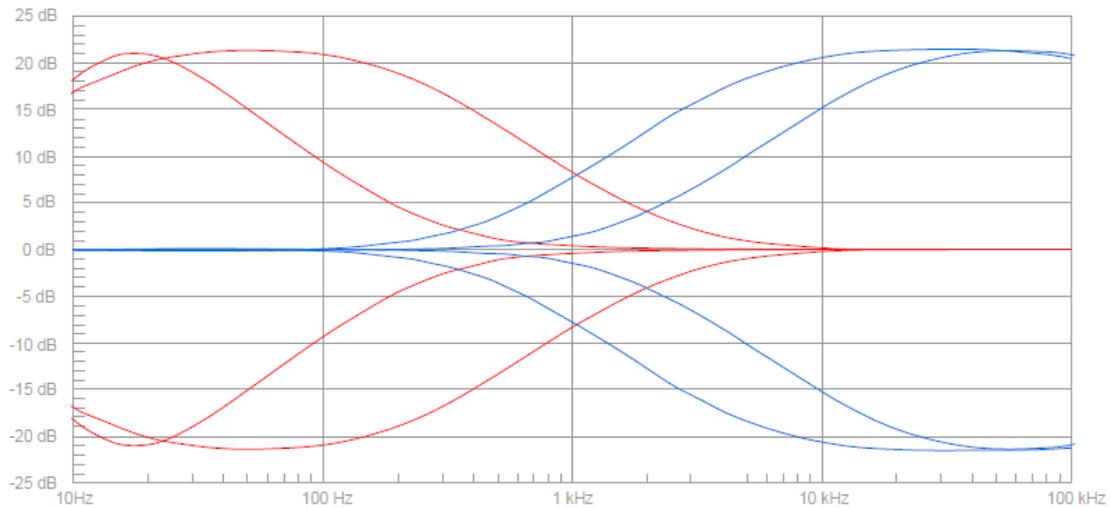


Ilustração 37 – Curvas dos filtros *shelving* implementados no circuito de equalização com IC's

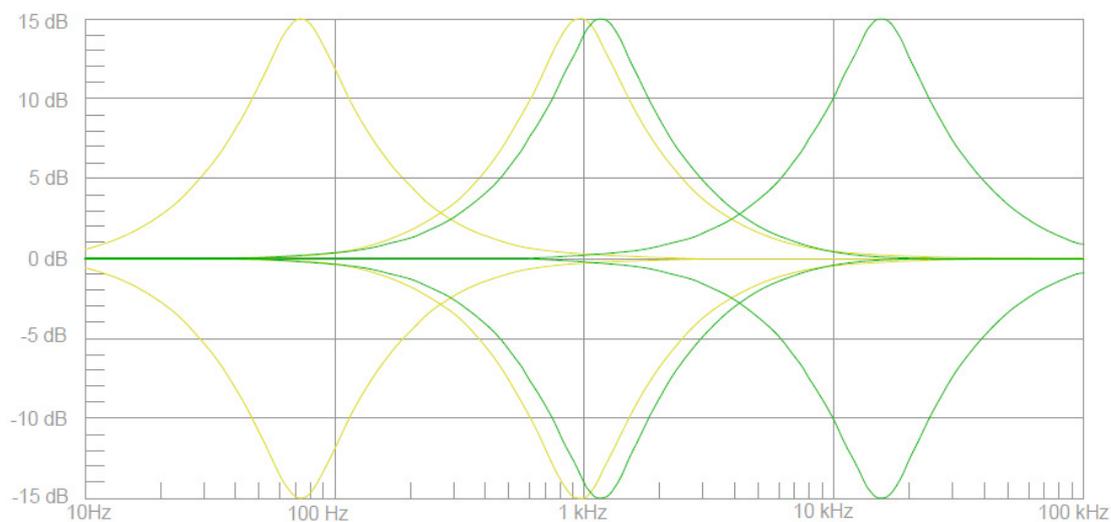


Ilustração 38 – Curvas dos filtros *bell* implementados no circuito de equalização com IC's

3.5 Compressor Stereo “GSSL”

O circuito de compressão escolhido é um compressor do tipo *voltage controlled amplifier* (VCA). Este tipo de compressor é controlado por uma tensão que controla o ganho negativo, ou seja, uma tensão de controlo é aplicada e determina quanto do sinal de entrada do VCA é visto à saída, sendo que a sua

amplitude máxima de saída é igual à de entrada. Este tipo de compressor é normalmente usada em estúdios de gravação, devido à sua precisão sobre os seus controlos e transparência sonora. As seguintes ilustrações mostram o diagrama de *inputs* e *outputs* deste circuito.

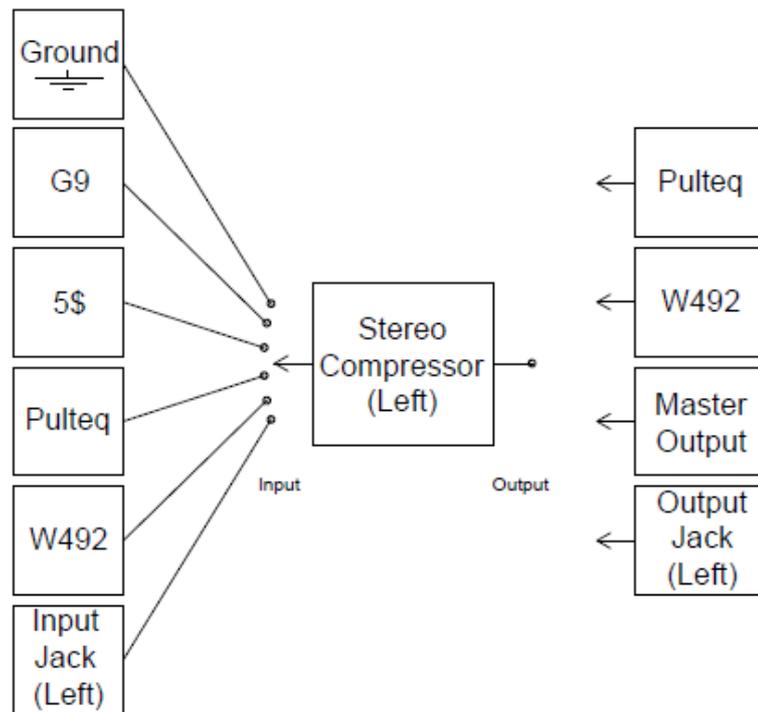


Ilustração 39 - Diagrama de ligação do Compressor SSL (canal esquerdo)

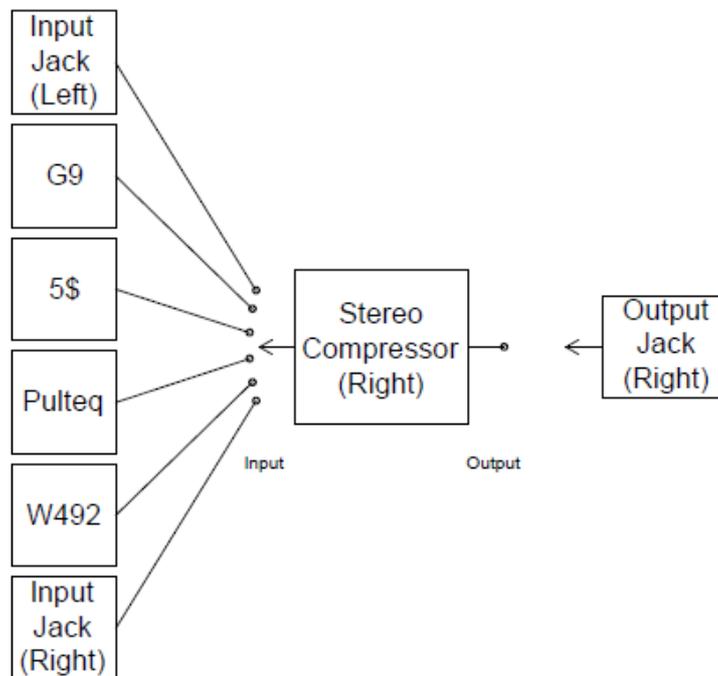


Ilustração 40 - Diagrama de ligação do Compressor SSL (canal direito)

Este compressor é o único circuito com funcionamento *stereo* nesta interface. O *input* deste segundo canal pode ser igual ao do primeiro, funcionando assim em modo *mono*, de um outro outro circuito da interface ou de um *jack* dedicado, trabalhando em modo *stereo*. Exclusivamente, este compressor tem *jacks* dedicados, isto é, na parte de trás do equipamento existem dois *inputs* e *outputs* de uso exclusivo para o canal *left* e *right* do compressor.

O primeiro e último estágio deste circuito são de desbalanceamento e balanceamento de sinal, respetivamente. O estágio de desbalanceamento é feito por um circuito usando um NE5534 (por canal), conduzindo o sinal ao VCA através de uma resistência de 27k. Imediatamente após este VCA, existe o circuito responsável pelo balanceamento, composto por dois NE5532 e restantes componentes associados. Este processo é semelhante ao utilizado no circuito do pré-amplificador “5 dollar”.

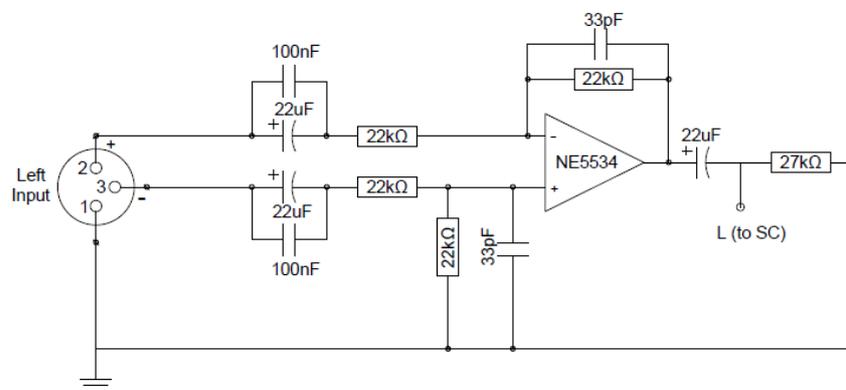


Ilustração 41 - Desbalanceamento do sinal

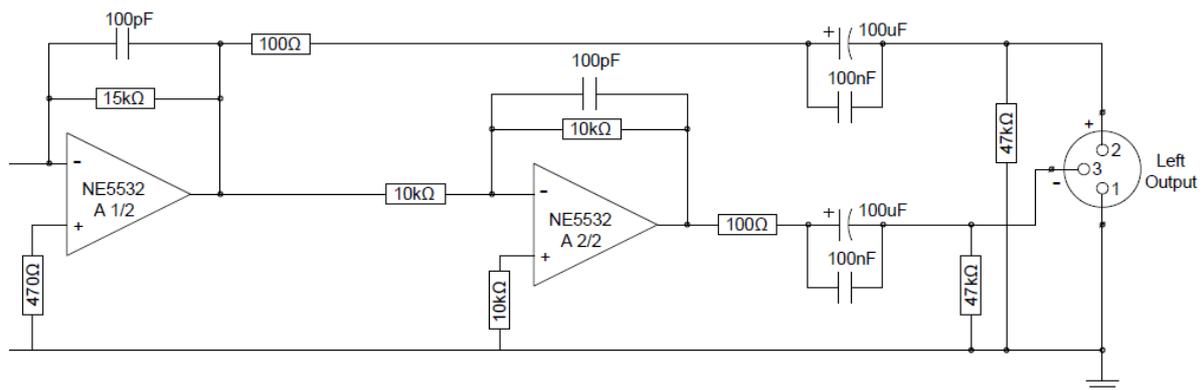


Ilustração 42 - Balanceamento do sinal

O sinais de saída de ambos os NE5534 são também usados num circuito paralelo (*sidechain*). Este circuito paralelo permite controlar componentes como o nível de *threshold*, o rácio de compressão, a velocidade de *attack* e *release*, assim como o ganho de *makeup*. O nível de *threshold* define um nível para aplicar um ganho definido pelo rácio. Isto é, aos componentes do sinal com valor superior ao

definido pelo *threshold*, é aplicado um ganho que reduz o sinal em 2, 4 ou 10 vezes. O controlo de *attack* define a rapidez com que o efeito de compressão afecta o sinal após ultrapassar o nível de *threshold* definido, assim como o de *release* é o tempo que demora a desligar a compressão após descer este mesmo nível. Este último só faz sentido quando se pensa no último controlo, o de ganho de *makeup*. Este ganho é aplicado ao sinal abaixo do nível de *threshold* e faz com que os componentes do sinal abaixo deste nível sofram um ganho positivo. O nome de “compressor” deve-se exactamente por comprimir (ou “aproximar”) os componentes mais presentes com os menos presentes no sinal. Este circuito começa com um VCA que recebe os sinais provenientes dos NE5534, retificando a sua saída através de um par de estágios de TL074. É neste ponto que temos o controlo do ganho (rácio), através de uma seleção de resistências. Num estágio seguinte, com a tensão retificada e ganho definido, fazemos a seleção da resistência que vai definir o nosso tempo de *attack*, assim como a seleção do condensador de tântalo e respectiva resistência de descarga que define o tempo de *release*.

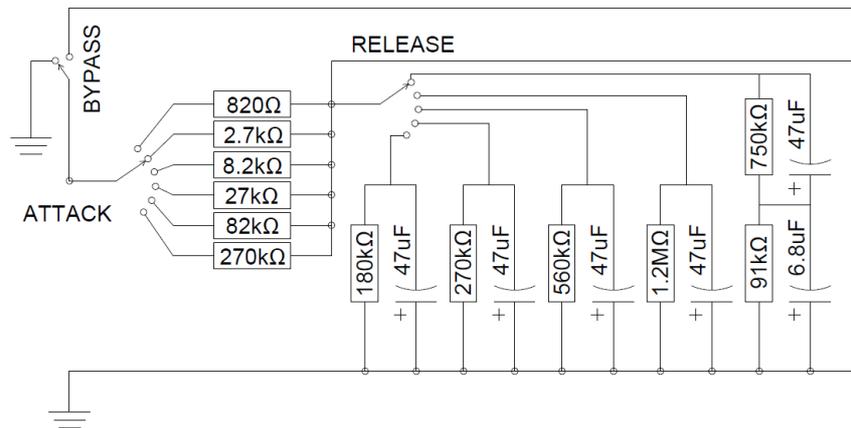


Ilustração 43 - Seleção de *attack* e *release*

Nesta fase, o sinal parte para três secções diferentes. Na primeira secção é somada uma tensão de ganho de *makeup* e enviada para os VCA's principais (fora da *sidechain*). Numa outra secção é também somada uma tensão e enviada para o VCA da *sidechain*, controlando por sua vez o *threshold*. A última secção, afectada pelas anteriores, serve para alimentar o medidor de compressão com uma escala de 0 a 20dB (esquema eletrónico completo no Anexo VI).

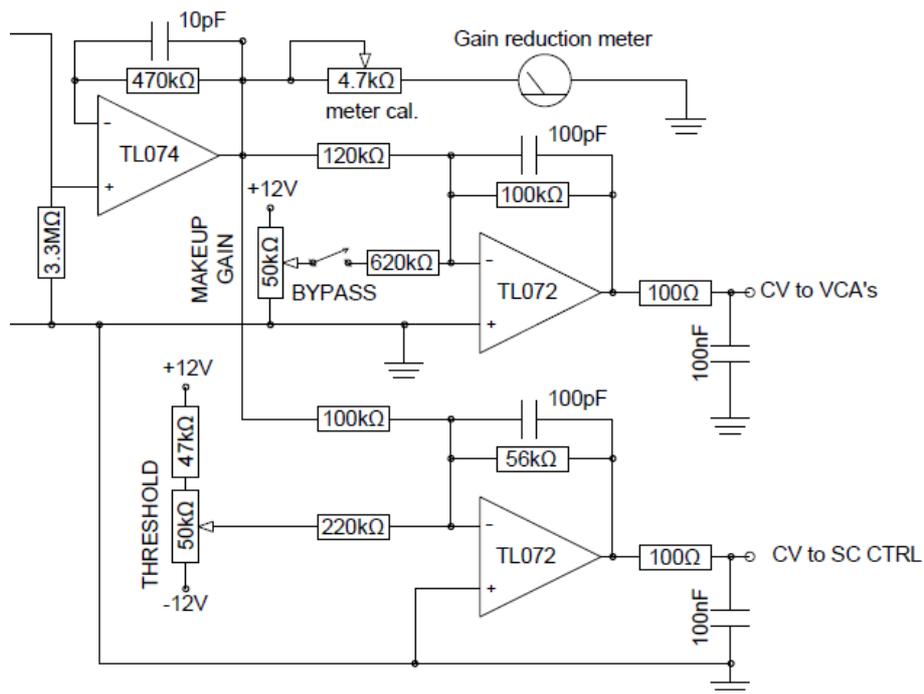


Ilustração 44 - Controle de ganho de *makeup* e *threshold*

3.6 Circuitos de alimentação

3.6.1 Transformadores

Na construção de equipamento áudio de alta fidelidade é comum utilizar transformadores toroidais para a alimentação. Tratam-se de transformadores com características mais adequadas a circuitos sensíveis a interferências eletromagnéticas, como os de áudio. Estes transformadores têm forma de *donut* e, da mesma maneira que os transformadores de alimentação mais comuns, são constituídos por fio enrolado sob um núcleo de lâminas.

Todos os transformadores usados para alimentação de circuitos são do tipo toroidal e foram instalados tantos quantos os circuitos originais necessitavam, seis no total. São usados dois para o circuito pré amplificador G9, outros dois para o equalizador Pulteq, um para o compressor e o último para alimentação dos circuitos integrados relativos ao pré-amplificador 5 *dollar* e ao equalizador W492. Os pares de transformadores deve-se à necessidade de altas tensões (isoladas da rede) para alimentação do sinal amplificado pelas válvulas.

Qualquer transformador, mesmo os toroidais de alta qualidade, produzem um campo eletromagnético que pode interferir no sinal. Como método de prevenção desta interferência foi montada uma “caixa”

em metal que reveste todos os transformadores. Esta caixa encontra-se dentro da interface e está eletricamente ligada ao *ground* da interface.

3.6.2 Tensões de funcionamento

Como já referido, os circuitos que usam válvulas necessitam de altas tensões (aproximadamente 250V em corrente contínua) para se tirar o proveito das suas características. Para além disso necessitam de uma tensão de alimentação dos filamentos (6,3V em corrente contínua).

No circuito de alimentação do pré amplificador a válvulas também é fornecida a tensão de *phantom power*, +48V. Esta tensão é também usada pelo circuito pré-amplificar de circuitos integrados, quando necessário.

Os restantes circuitos funcionam com base em circuitos integrados e, normalmente, a sua alimentação varia entre duas tensões contínuas que definem o máximo e o mínimo valor de tensão de saída nestes componentes. Em todos os circuitos utilizados, a tensão fornecida foi de aproximadamente +/-15V.

O circuito compressor utiliza também tensões de +/-12V como subreguladores (na secção de *sidechain*), de modo a termos ganhos previsíveis no caso da alimentação principal de +/-15V sofrer flutuações.

4. DIAGRAMA DA INTERFACE

A montagem deste conjunto de circuitos foi disposta numa só caixa de alumínio numa disposição similar à mesa de mistura comercial compacta, ao contrário da versão em prateleira como habitualmente eram contruídos. A ideia era criar uma abordagem mais user friendly, isto é, mais prática do ponto de vista do utilizador. Esta abordagem deve-se ao facto de este projeto ter sido desenvolvido, como anteriormente referido, para ser um equipamento *all-in-one* e capaz de inúmeros tipos de resultado na altura da gravação. Deste modo, num pequeno estúdio, não seria necessário mais qualquer tipo de equipamento na fase de gravação. Qualquer equipamento de efeitos de som, mesmo que ligada à interface, seria de fácil ligação pois as conexões estão também de fácil alcance, no entanto é importante mencionar que cada vez mais estes efeitos são aplicados a nível digital em software de produção musical. A seguinte ilustração demonstra, em blocos, a disposição dos equipamentos face ao utilizador.

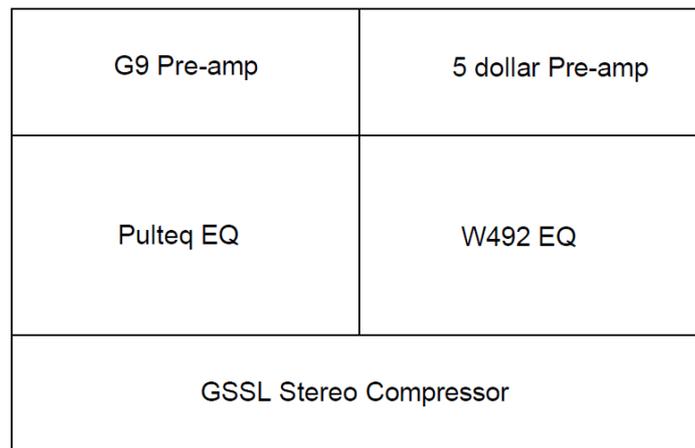


Ilustração 45 – Diagrama de disposição de equipamentos na interface

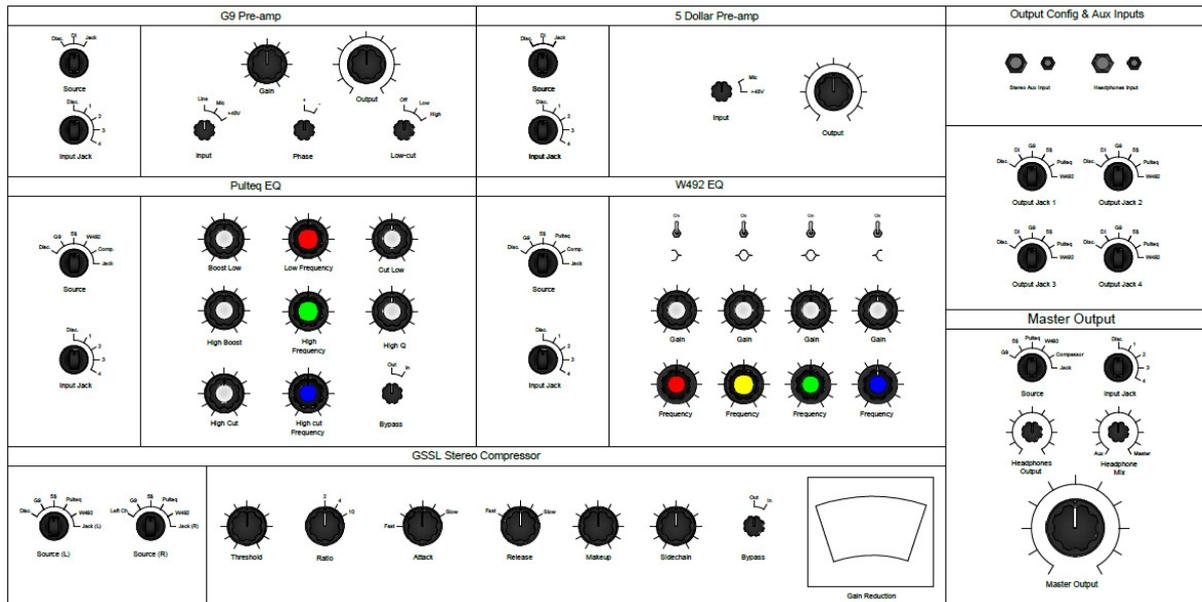


Ilustração 46 – Diagrama geral do *layout* da interface

A ilustração 46 representa o esquema real dos controlos da interface com o utilizador (em maior detalhe no Anexo VII). Do lado direito e não representado nos blocos, temos a secção de ligação aos auscultadores e a uma entrada auxiliar que pode ser adicionada ao sinal para os auscultadores para servir como referência para quem grava, isto é, pode ser aplicada uma batida ou outra faixa previamente gravada para o utilizador, no tempo certo, fazer a nova gravação; assim como o encaminhamento dos sinais para os outputs. Existe também um controlo da quantidade do sinal auxiliar que é misturado com o sinal enviado para os auscultadores, assim como um controlador mestre do volume a ser enviado para o output da mesa.

Em pormenor, com os controlos referidos na secção referente a cada circuito, temos o representado nas seguintes ilustrações.

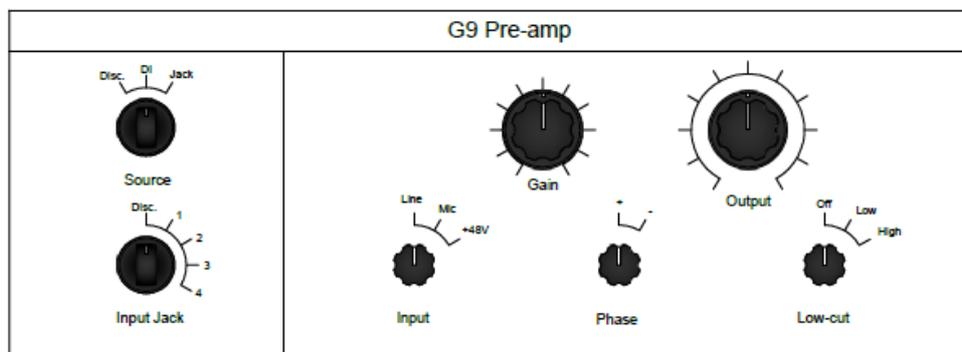


Ilustração 47 – Diagrama do *layout* da interface - Detalhe do circuito pré-amplificador G9

Na ilustração 47, referente ao circuito pré-amplificador G9, podemos observar na secção do lado esquerdo os 2 controlos que permitem escolher a origem do sinal (controlo existente em todos

os circuitos, variando apenas a origem que pode ser utilizada em cada um deles), assim como os controlos do sinal os 5 controlos que temos sobre o circuito. Temos o controlo do ganho aplicado ao sinal e o nível de sinal à saída na parte superior, assim como a selecção do tipo de entrada aplicada, o controlo de inversão de fase e o filtro passa baixo na parte inferior.

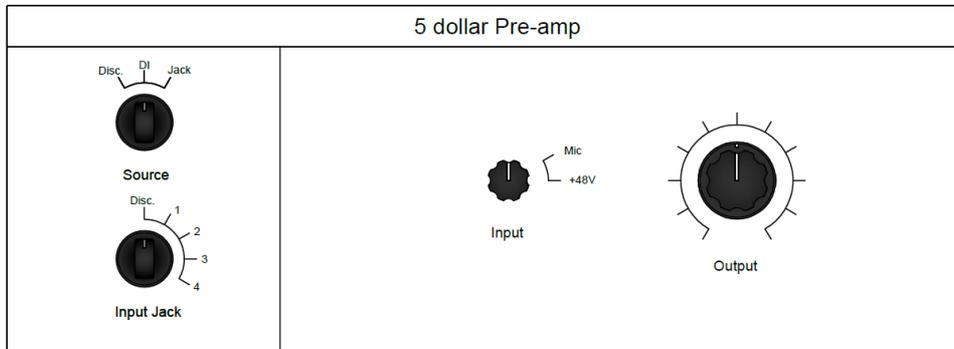


Ilustração 48 - Diagrama do *layout* da interface - Detalhe do circuito pré-amplificador 5 dollar

Na ilustração 48, referente ao circuito pré-amplificador 5 *dollar*, temos à esquerda a escolha da origem do sinal e à direita o controlo de tipo de entrada aplicada e o nível de saída do sinal.

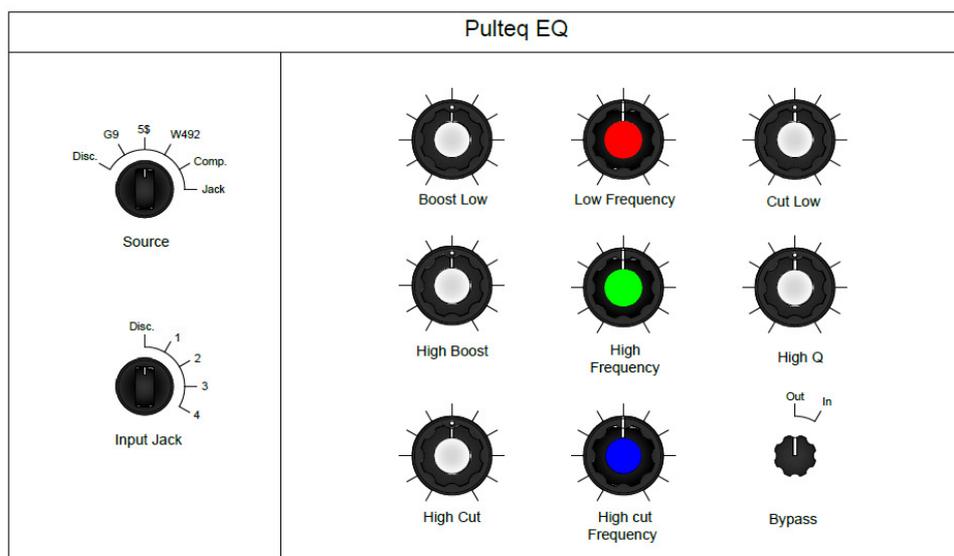


Ilustração 49 - Diagrama do *layout* da interface - Detalhe do circuito equalizador Pulteq

Na ilustração 49, referente ao equalizador Pulteq, temos à esquerda a escolha da origem do sinal e à direita os controlos sobre os filtros. Na parte superior temos o controlo do corte e/ou *boost* das baixas frequências (filtro *shelving*), na parte central temos o controlo do *boost* e da curva de ganho das altas frequências (filtro *bell*) e na parte inferior temos controlo do corte nas altas frequências (filtro *shelving*) e de *bypass*.

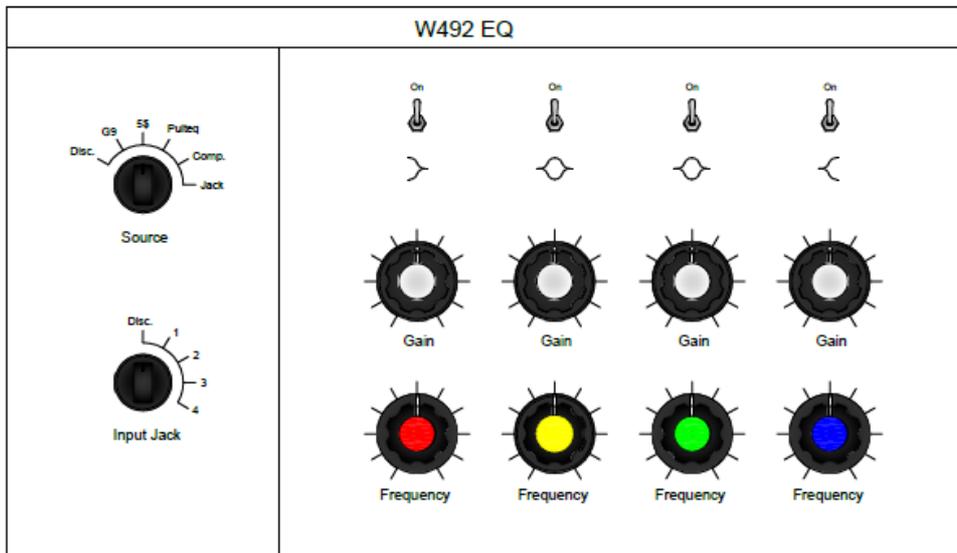


Ilustração 50 - Diagrama do *layout* da interface - Detalhe do circuito equalizador W492

Na ilustração 50, referente ao equalizador W492, temos à esquerda a escolha da origem do sinal e à direita os controlos sobre os filtros. A secção do controlo dos filtros está dividida por colunas e ordenada por frequências (por ordem crescente da esquerda para a direita). Na parte superior temos o controlo de *bypass*, na parte central o ganho a aplicar no filtro e na parte inferior temos a seleção da frequência a ser aplicado o ganho.



Ilustração 51 - Diagrama do *layout* da interface - Detalhe do circuito compressor

Na ilustração 51, referente ao circuito compressor GSSL, temos à esquerda a escolha da origem do sinal para ambos os canais e à direita os controlos relativos à compressão do sinal. Da esquerda para a direita, temos o nível de *threshold*, o rácio de compressão, o controlo de *attack* e *release*, ganho de *makeup* e *bypass*.

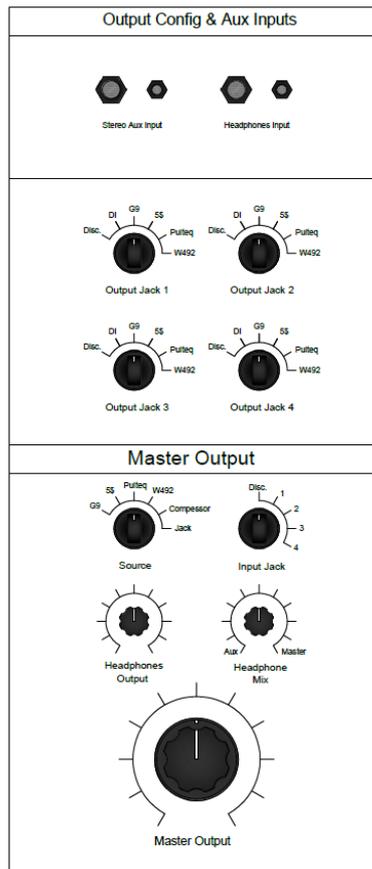


Ilustração 52 - Diagrama do *layout* da interface - Detalhe dos circuitos auxiliares e *Output*

Em cada um dos elementos desta interface controlamos a origem do sinal que nele entra. Por defeito (seletor na posição à esquerda), o sinal está conectado ao ground. A seleção é feita entre qualquer outro equipamento disponível, sendo possível criar qualquer caminho entre equipamentos (à exceção de um pré-amplificador para outro). Um segundo seletor de origem permite-nos injetar o sinal a partir de uma fonte externa. As seguinte ilustração mostra o diagrama de *inputs* do canal *Master* e o que deve ser ligado ao seu *output*. O ADC ligado à sua saída representa um equipamento externo, à escolha do utilizador, para fazer a ligação e gravação digital. O equipamento a ser ligado não tem de ser obrigatoriamente um ADC. No entanto, na era digital em que vivemos, será claramente o tipo de equipamento utilizado.

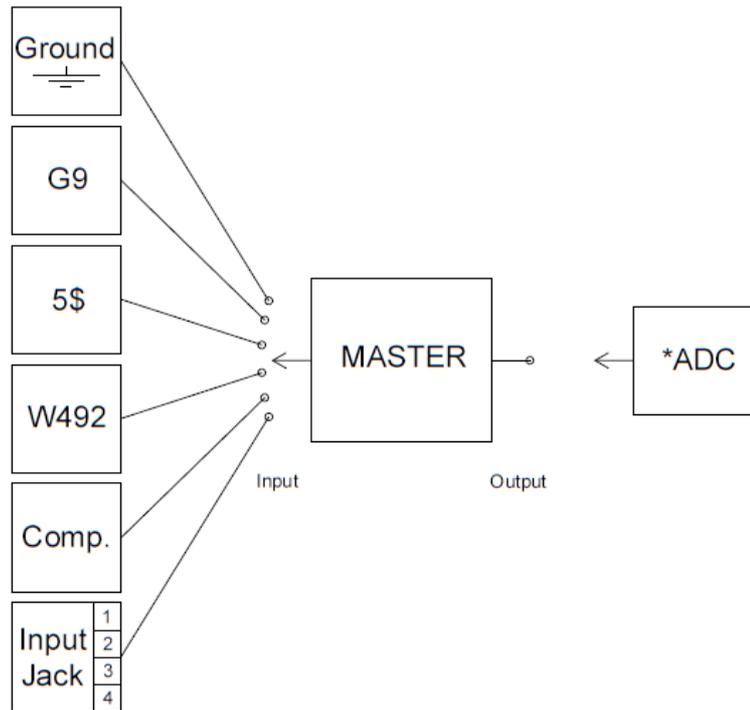


Ilustração 53 – Diagrama de ligação do Master Output

As ligações encontram-se na parte de trás do equipamento. É composto pelas entradas e saídas anteriormente referidas e apresenta a seguinte disposição. Os conectores de entrada do sinal (à exceção do *input* de instrumento e do sinal de *sidechain*) são conectores híbridos, capazes de fazer ligação com cabos XLR ou cabos TRS.

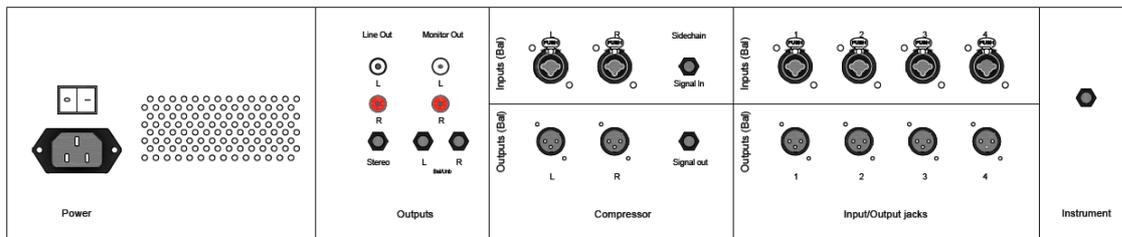


Ilustração 54 - Diagrama do *layout* da interface - Detalhe das ligações na parte de trás

5. TESTE E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para análise de resultados, a captação dos sinais de saída da interface serão gravados em formato digital através de uma interface capaz de fazer essa conversão. Esta interface tem apenas controlo de ganho sobre o sinal de entrada e volume de saída. Serão estipulados valores de ganho equivalente a 1 (sem amplificação) e volume de saída máximo (não altera o sinal). As configurações desta interface digital serão as mesmas para todas as gravações e o objetivo é observar as diferentes componentes que os circuitos adicionam ao sinal. Os testes baseiam-se em alteração de ganhos e volumes, fazendo uma comparação auditiva e visual (gráficos) ao longo das diferentes configurações da interface projetada.

Os controlos de ambos os pré-amplificadores têm por base a amplificação, com a adição de controlo de fase e filtro passa-baixo em um deles. Estes controlos irão ser ignorados nestas gravações.

Os controlos e tipo de filtro aplicados pelos dois equalizadores são diferentes, mas ambos apresentam ganhos positivos e negativos para várias frequências. A comparação destes ganhos sobre o sinal será o ponto de foco nesta fase.

Será também feito um cruzamento de tecnologias para concluir que é de facto uma interface valiosa como equipamento para um pequeno estúdio, mostrando-se ser capaz de obter uma vasta gama de resultados diferentes, aplicáveis em diferentes gravações com diferentes intenções finais.

A visualização do espectro do sinal será feita por um software com o nome de Spectrum Lab. Haverá mais que um sinal de entrada para testar os circuitos. Para testar a amplificação será usado o som pré gravado de uma guitarra, enquanto que para testar os filtros será utilizado um som conhecido como *white noise*. Este sinal (*white noise*) tem ao longo do seu espectro uma energia constante, isto é, a amplitude do sinal é igual entre a gama de frequências audíveis.

A ilustração 53 representa o sinal de entrada com entrada directa no ADC utilizado, sem passar pela interface. A linha amarela representa uma leitura em tempo real, enquanto que a linha vermelha apresenta a média das leituras ao longo do tempo. Como é possível observar, a linha vermelha representa quase uma linha recta ao longo de todo o espectro. A atenuação entre os 20 e os 40Hz deve-se, provavelmente, às características do equipamento pela qual o sinal está a ser transmitido.

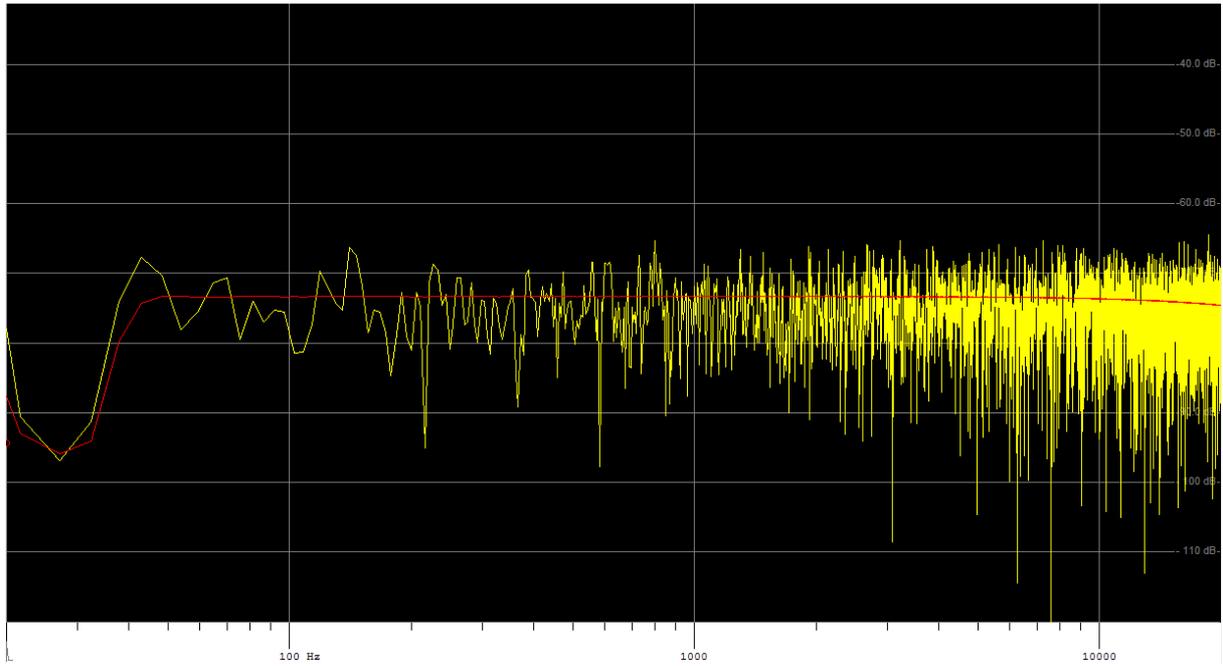


Ilustração 55 - Espectro do sinal *white noise* à entrada

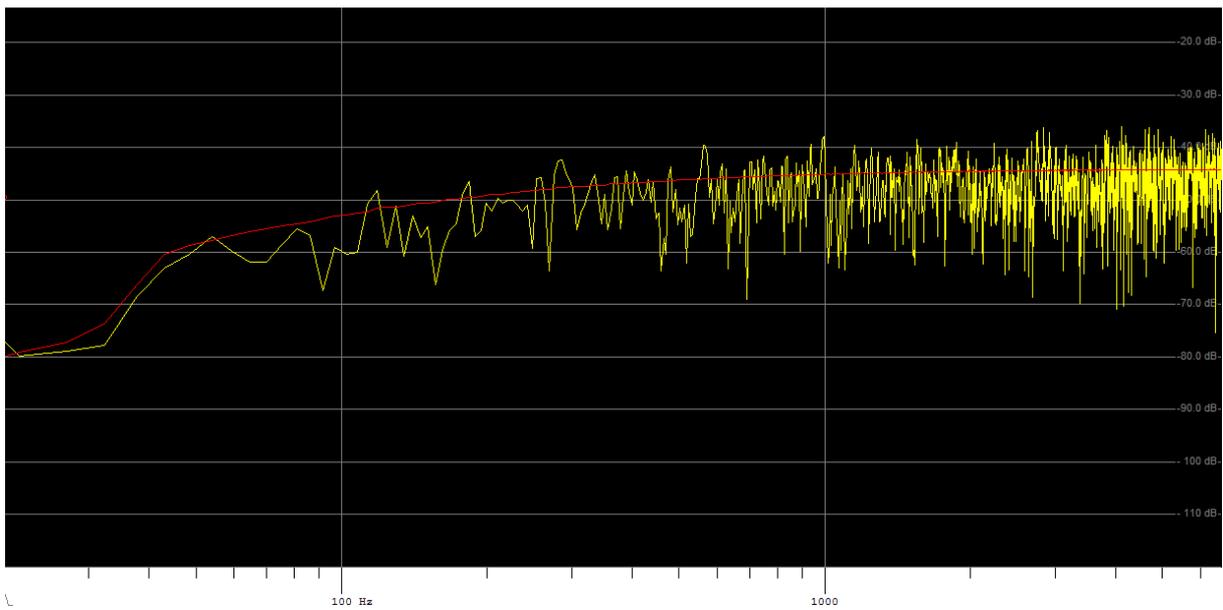


Ilustração 56 - Sinal à saída do pré amplificador "G9" (Ganho no máximo e volume aproximadamente a meio)

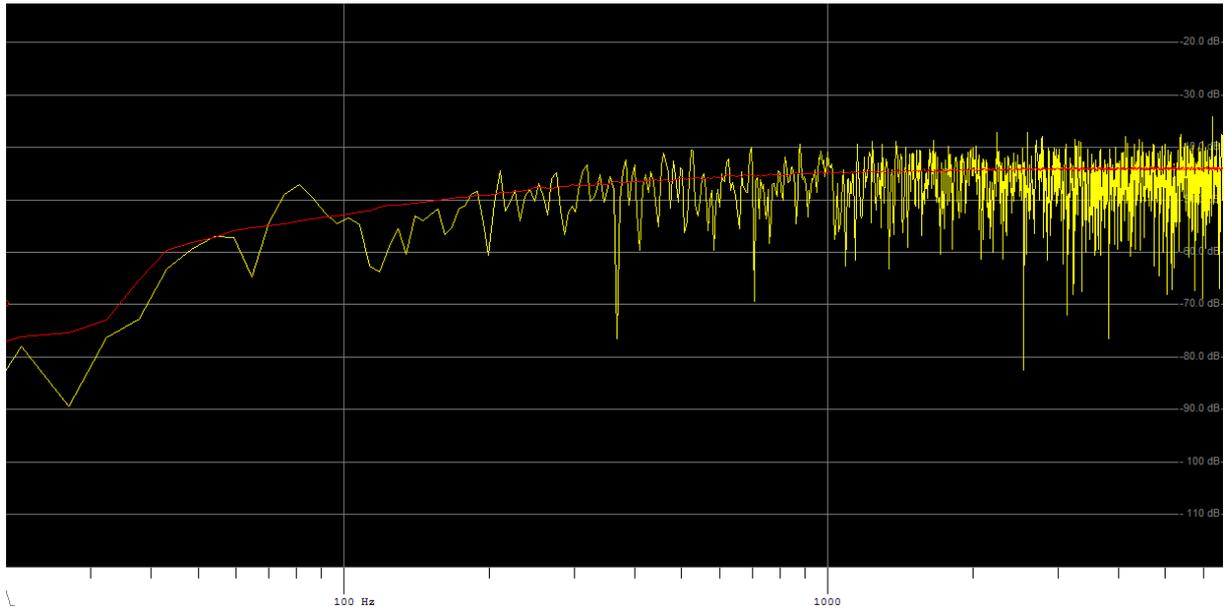


Ilustração 57 - Sinal à saída do pré amplificador “G9” (Ganho a meio e volume próximo do máximo)

Na ilustração 54 e 55 representam duas combinações entre ganho e volume para obter aproximadamente a mesma saída em dB's. A diferença, em teoria, varia com a saturação do sinal, apesar de não ser fácil distinguir as diferenças através do espectro. Foi portanto utilizado um outro software de visualização, com função de osciloscópio, dando como entrada um sinal de guitarra com uma frequência de aproximadamente 82.4Hz (nota Mi, corda 6). É possível observar então uma diferente forma de onda nas ilustrações seguintes.

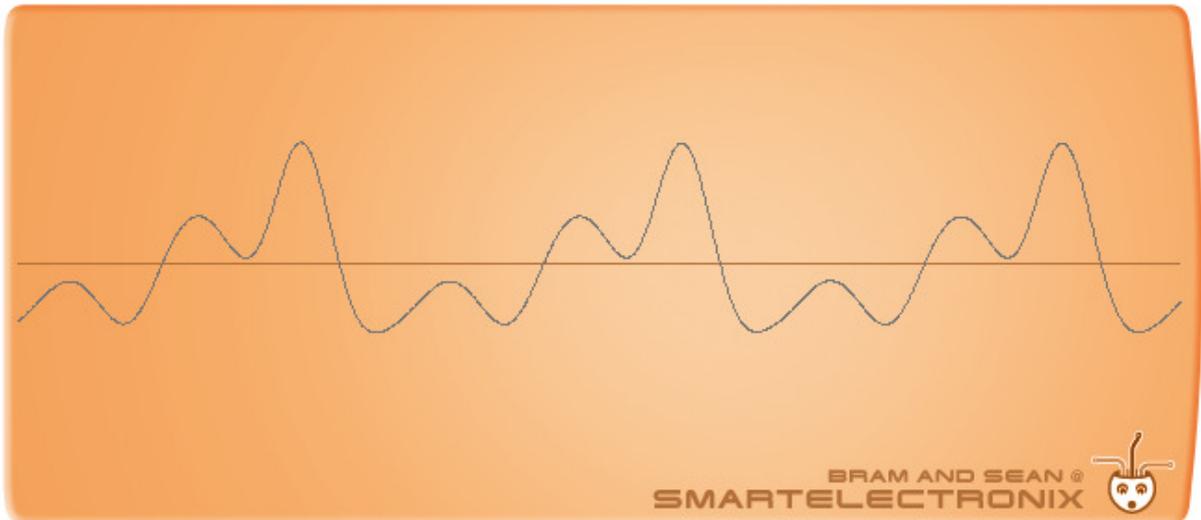


Ilustração 58 - Sinal à saída do pré amplificador “G9” (Ganho no máximo e volume aproximadamente a meio)

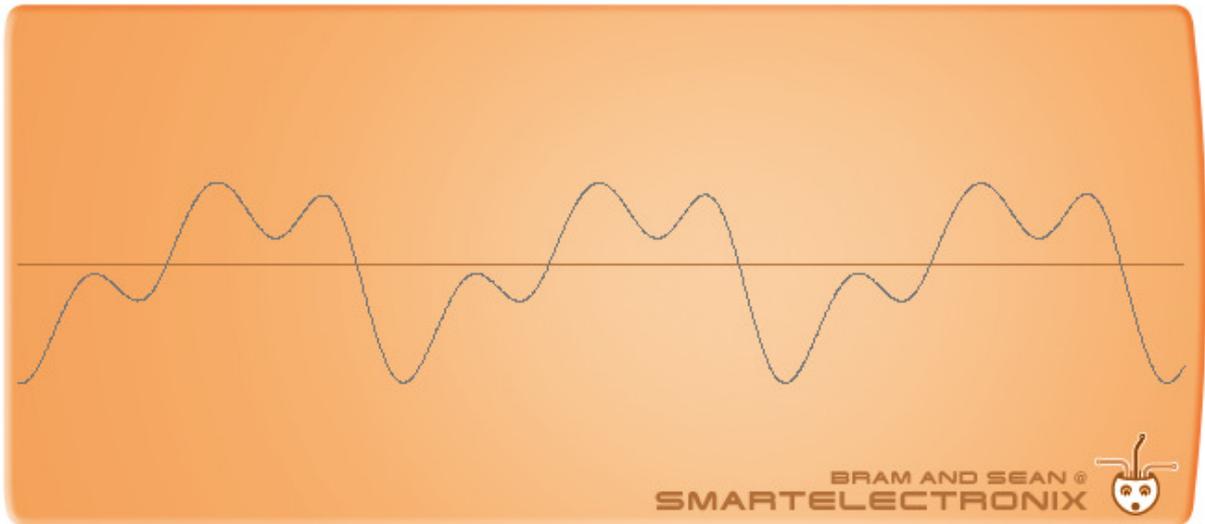


Ilustração 59 - Sinal à saída do pré amplificador "G9" (Ganho a meio e volume próximo do máximo)

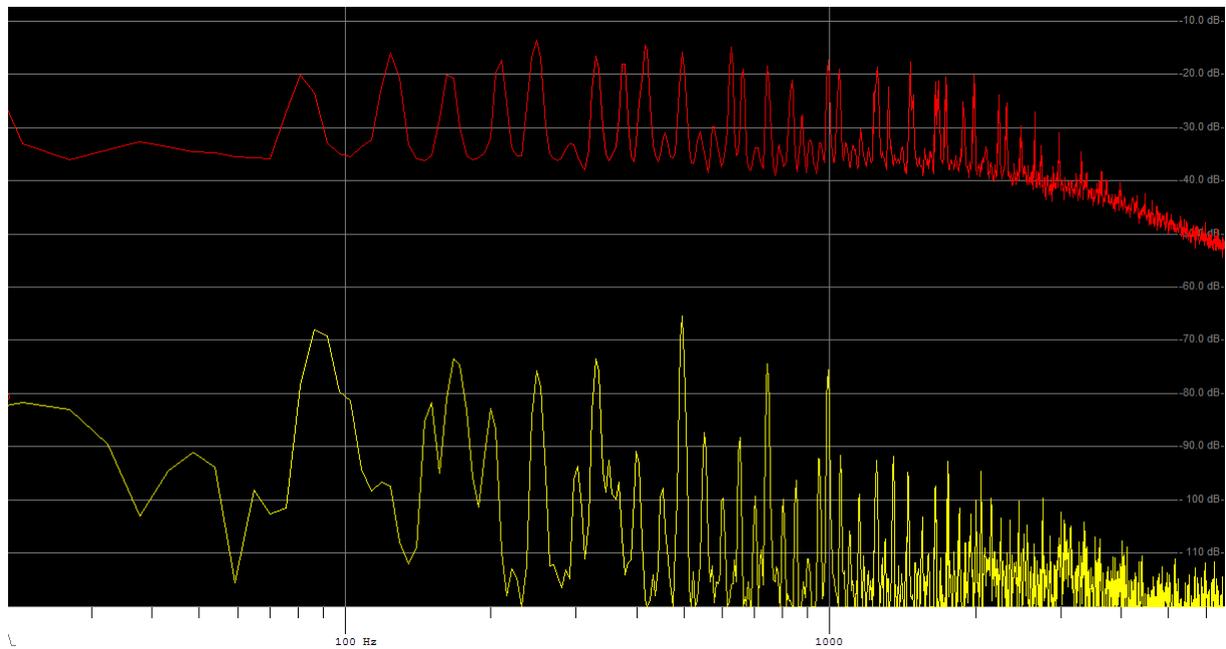


Ilustração 60 - Sinal à saída do pré amplificador "G9" (em saturação, com ganho no máximo)

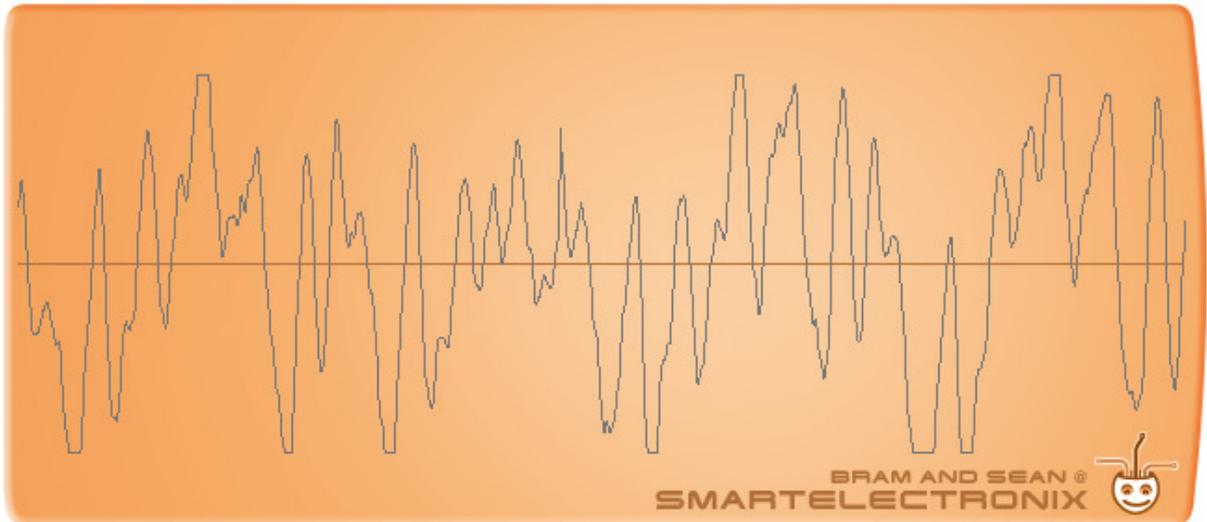


Ilustração 61 - Sinal à saída do pré amplificador "G9" (em saturação, com ganho no máximo)

Para obter saturação foi o acorde Mi ao invés da corda solta, com o objectivo de obter maior amplitude de sinal.

As ilustrações seguintes demonstram a saída para as mesmas entradas para o pré-amplificador "5 dollar".

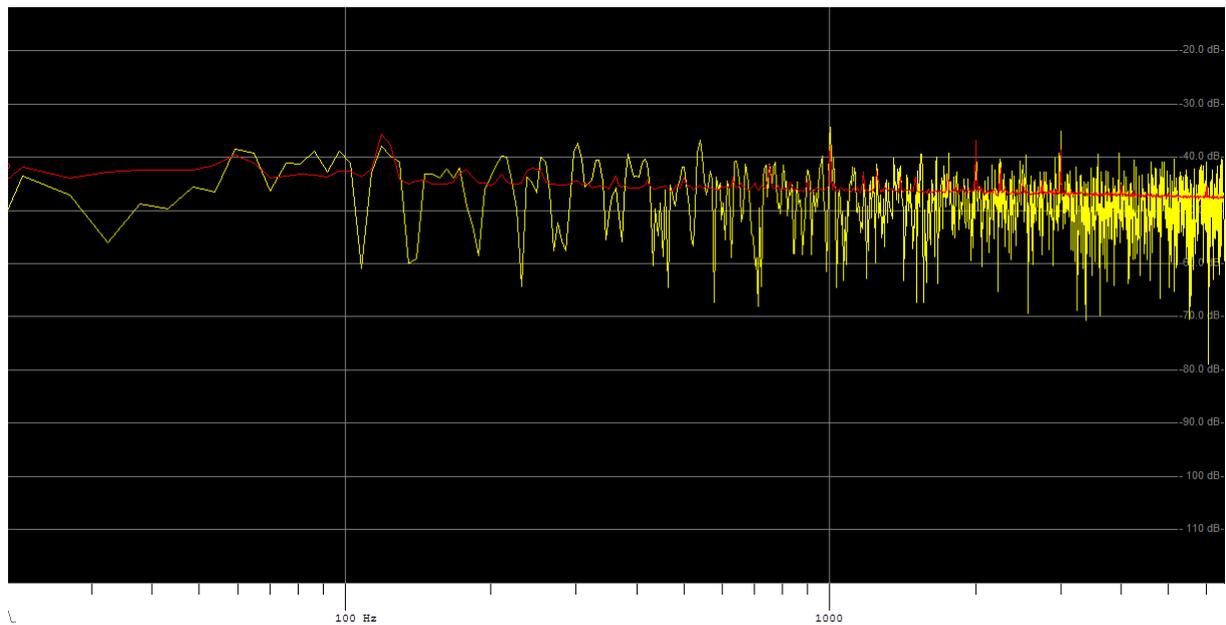


Ilustração 62 – Sinal à saída do pré amplificador "5 dollar"

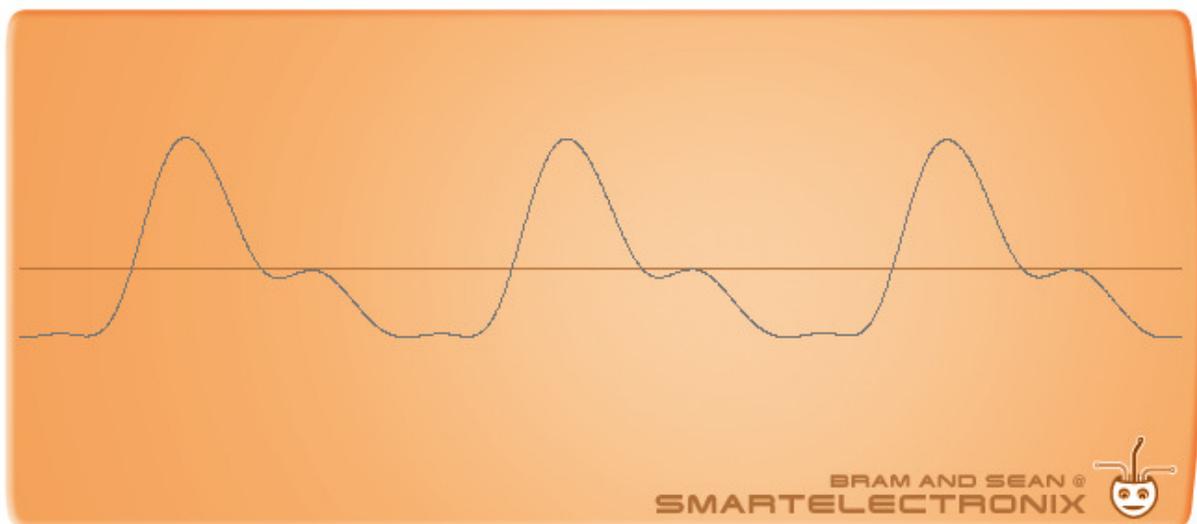


Ilustração 63 – Sinal à saída do pré amplificador "5 dollar"

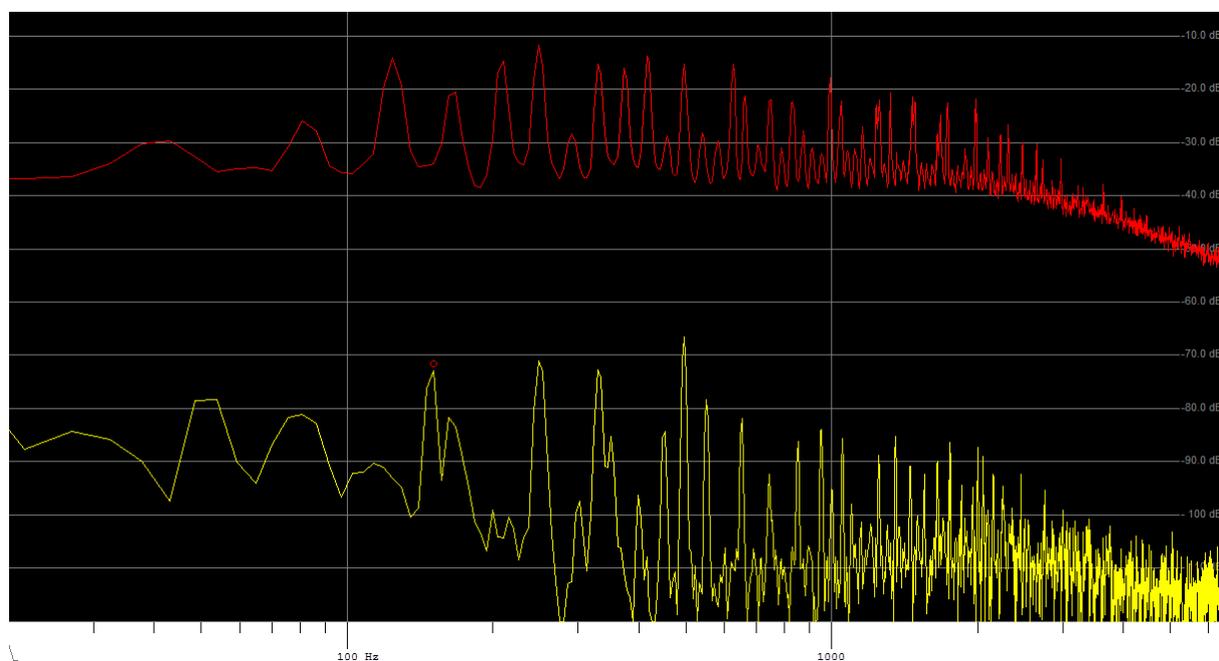


Ilustração 64 – Sinal à saída do pré amplificador "5 dollar" (em saturação)

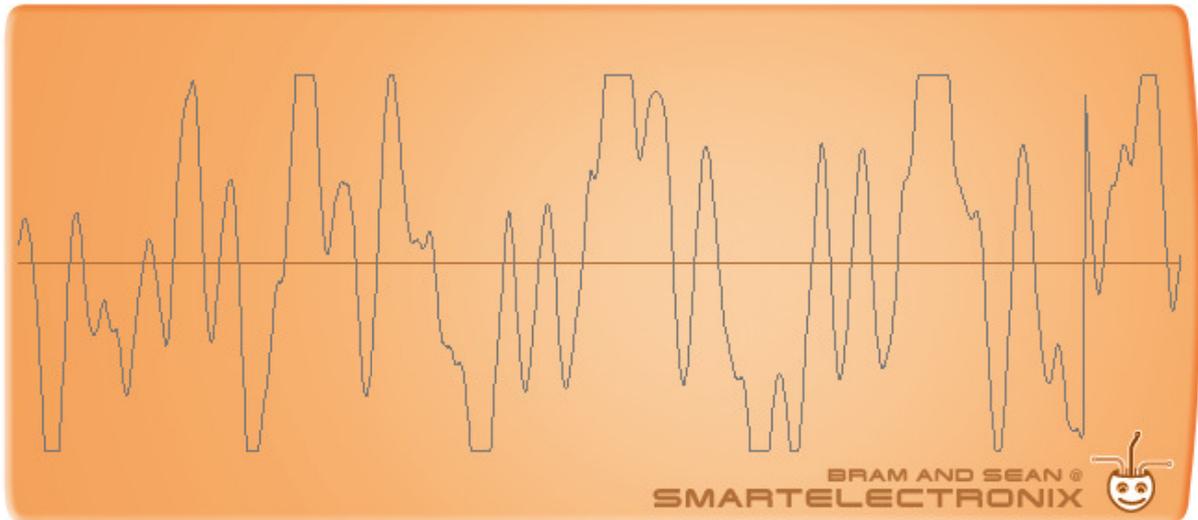


Ilustração 65 – Sinal à saída do pré amplificador “5 dollar” (em saturação)

A diferença na amplificação dos harmónicos pares e ímpares não se observa como esperado. Os sinais provenientes de ambos os circuitos de pré amplificação são bastante semelhantes a nível visual. No entanto, quando usado um instrumento como entrada, o resultado é perceptível tanto a nível gráfico como auditivo.

No circuito equalizador “Pulseq”, é possível observar distorção harmónica em relação ao sinal de entrada (ilustração 64). Trata-se, em teoria, de um efeito indesejado e demonstra a não linearidade do circuito. No software de osciloscópio é possível observar que a onda toma diferente forma em relação ao pré- amplificador anterior. Novamente, um sinal menos linear em comparação.

As seguintes ilustrações mostram as respostas dos filtros do circuito equalizador “Pulseq” com diferentes combinações de controlo de filtros.

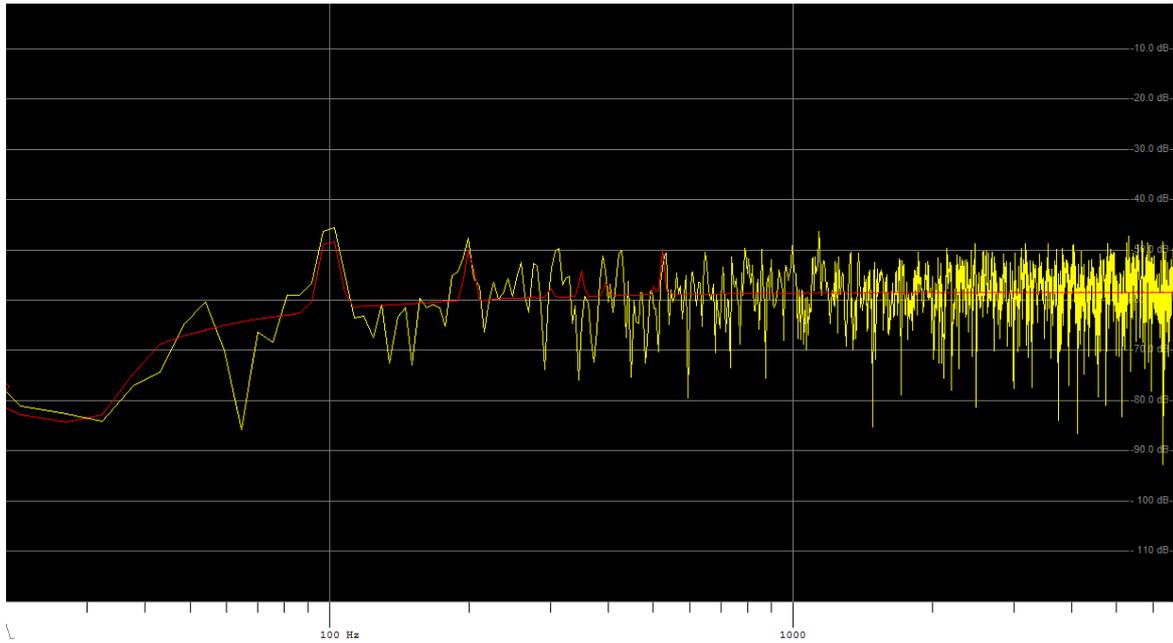


Ilustração 66 - Sinal à saída do equalizador "Pulteq" (*Bypass*)

A ilustração 60 demonstra o sinal à saída quando o *bypass* é aplicado. É possível observar uma distorção harmónica gerada pelo circuito e um ganho em relação ao sinal de entrada. Em teoria o ganho seria 1, no entanto, possivelmente pela tolerância das resistências ou da válvula, tal não se verifica.

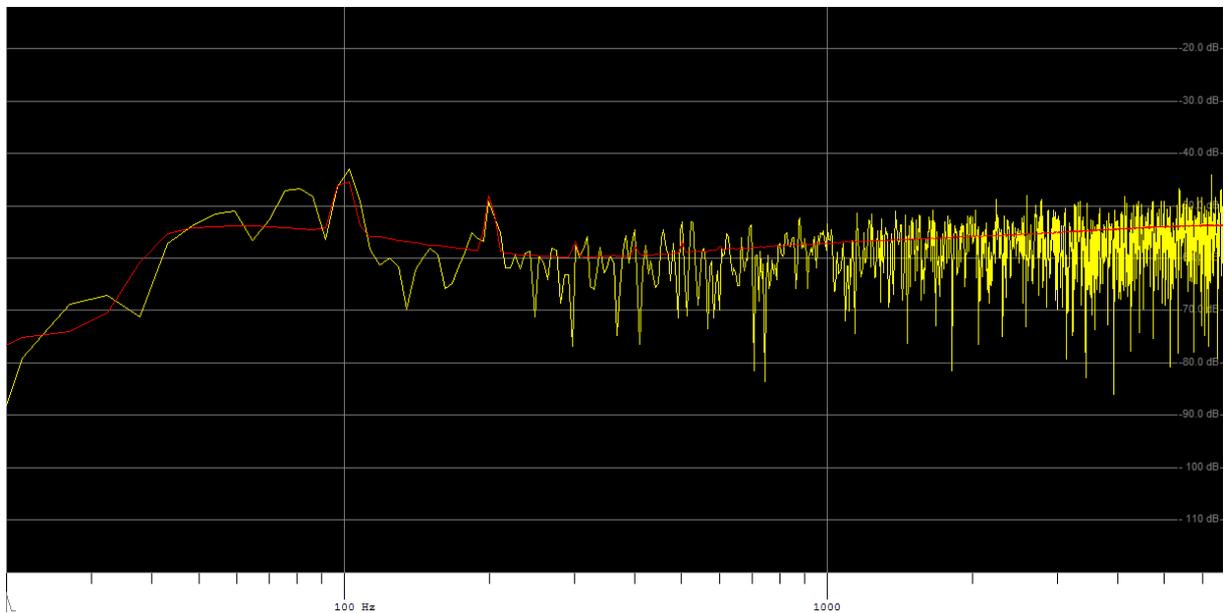


Ilustração 67 – Sinal à saída do equalizador "Pulteq" (*Boost Low* no máximo, *Low frequency* no mínimo)

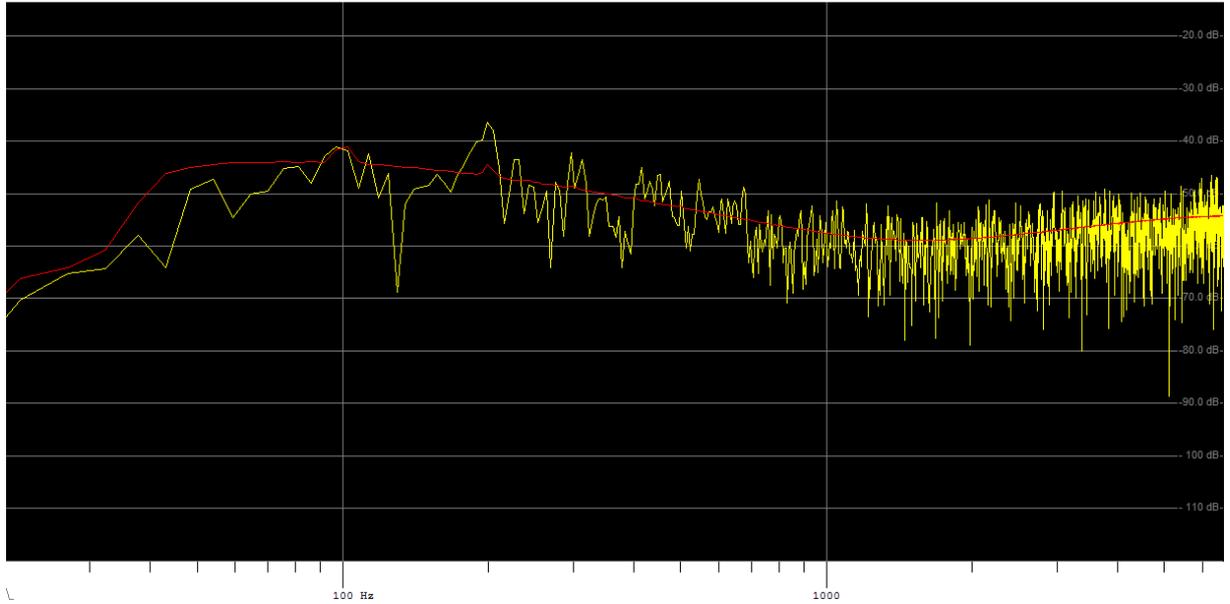


Ilustração 68 – Sinal à saída do equalizador “Pulteq” (*Boost Low* no máximo, *Low frequency* no máximo)

Na ilustração 67 e 68 é possível observar claramente o efeito de ganho nas baixas frequências do filtro shelving. Quando a frequência está configurada para o mínimo, o resultado obtido sofre alterações menos significativas pois o sinal à entrada, por defeito, está atenuado.

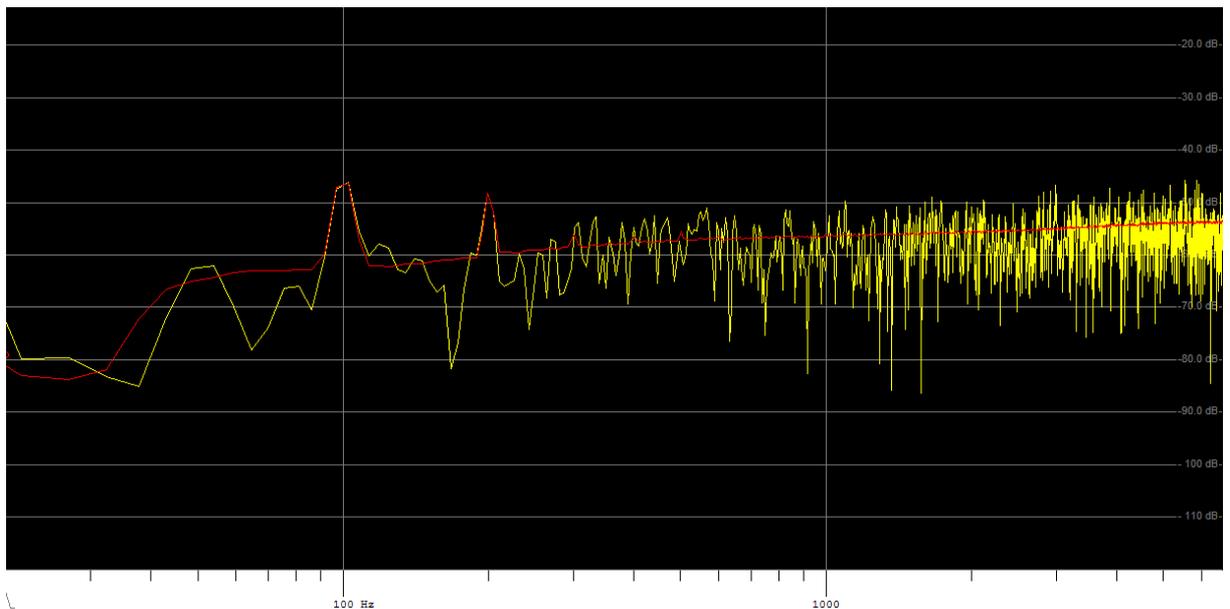


Ilustração 69 – Sinal à saída do equalizador “Pulteq” (*Cut Low* no máximo, *Low frequency* no mínimo).

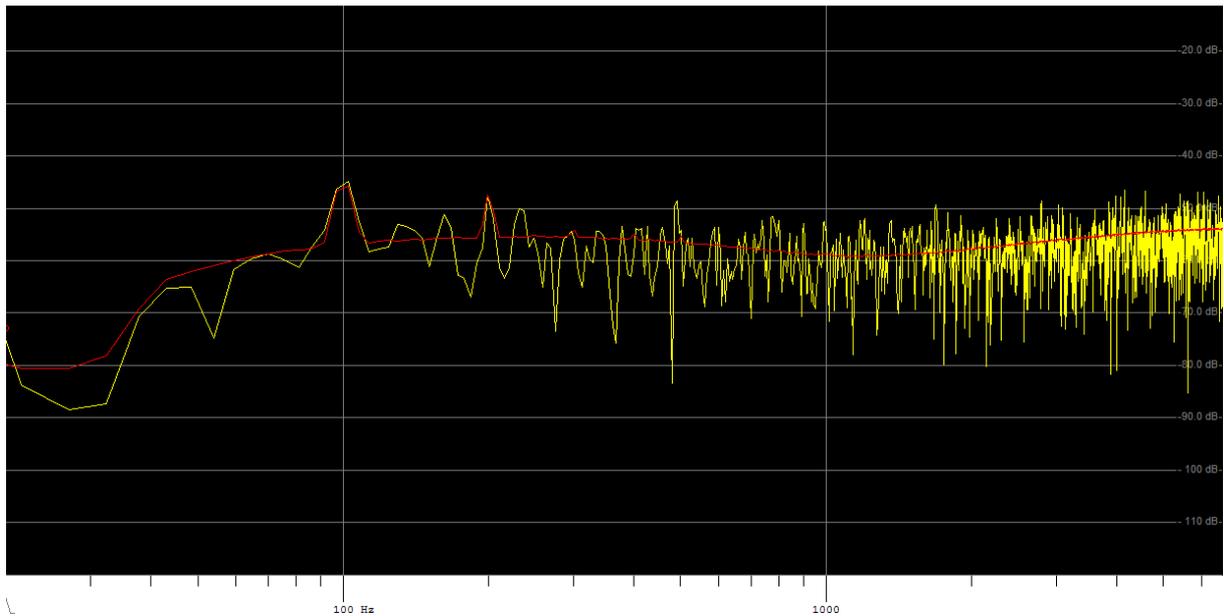


Ilustração 70 – Sinal à saída do equalizador “Pulteq” (*Cut Low* no máximo, *Low frequency* no máximo)

Na ilustração 69 e 70 observa-se o resultado do filtro *shelving* (em corte) aplicado às baixas frequências. Devido à atenuação de sinal à entrada, não se obteve variações significativas na atenuação do sinal nas baixas frequências

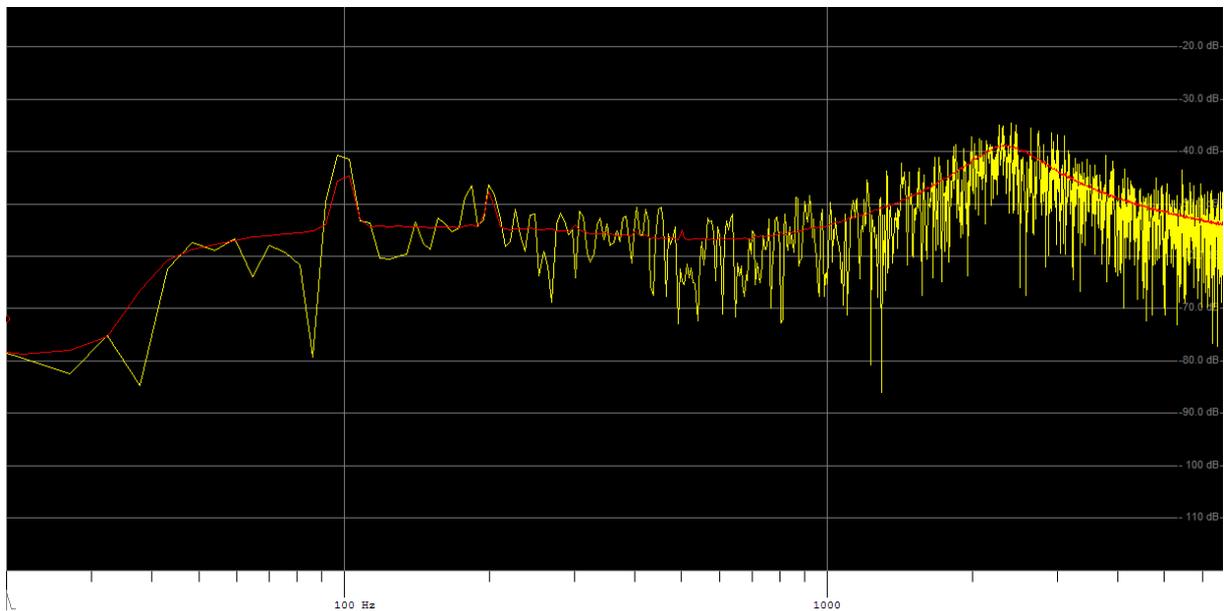


Ilustração 71 - Sinal à saída do equalizador “Pulteq” (*High boost* no máximo, *High frequency* no mínimo, *High Q* no mínimo)

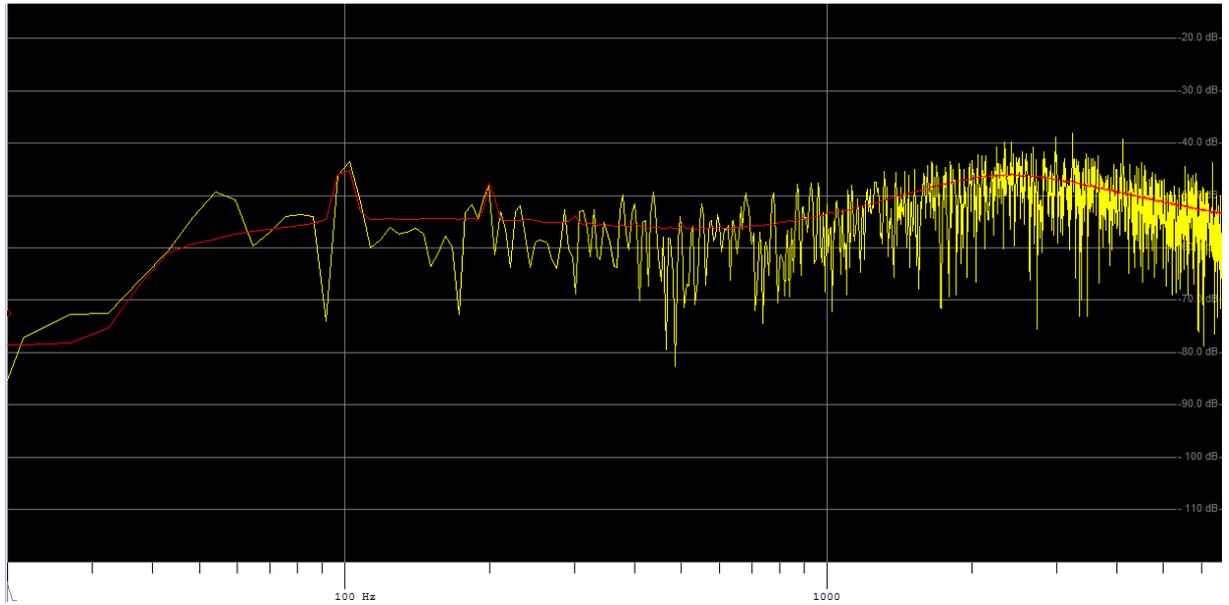


Ilustração 72 - Sinal à saída do equalizador "Pulteq" (*High boost no máximo, High frequency no mínimo, High Q no máximo*)

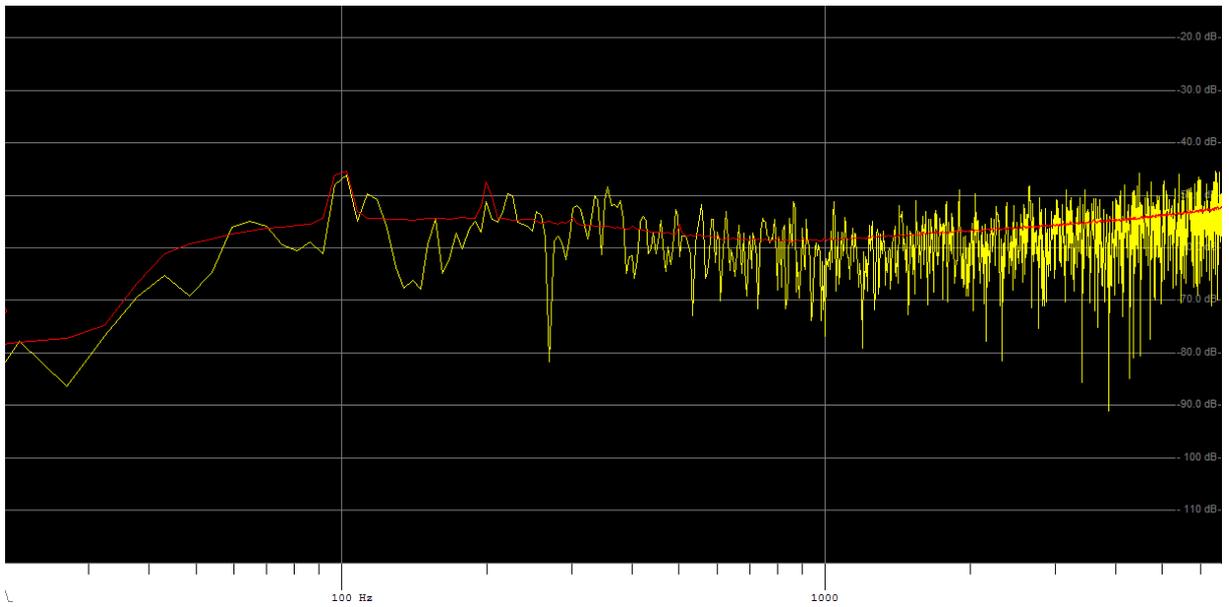


Ilustração 73 - Sinal à saída do equalizador "Pulteq" (*High boost no máximo, High frequency no máximo, High Q no mínimo*)

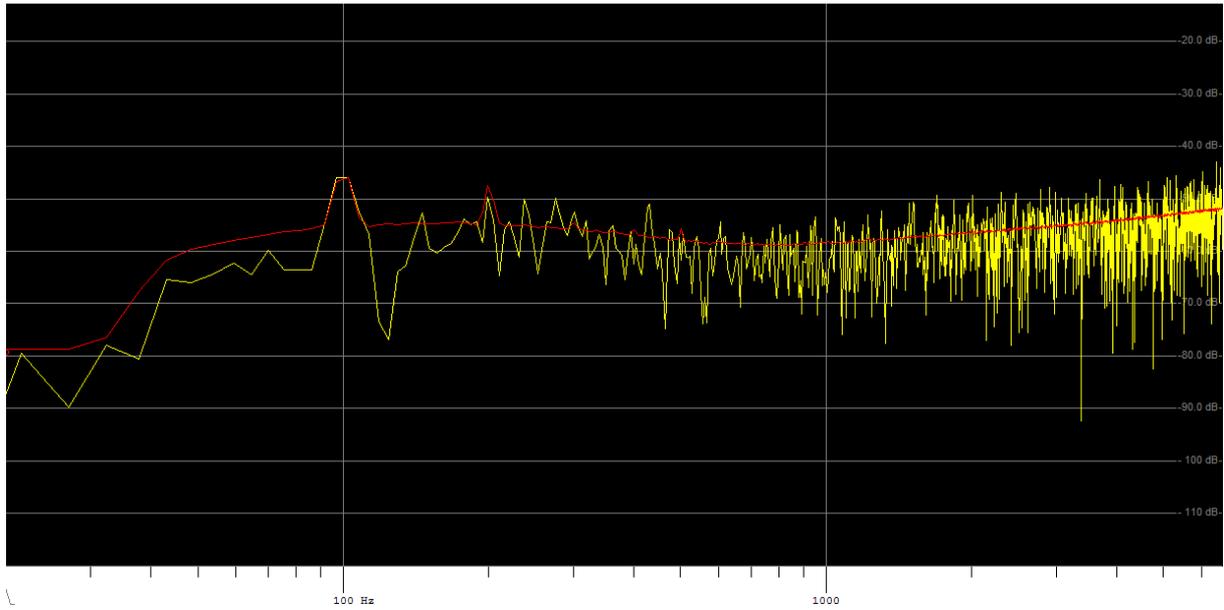


Ilustração 74 - Sinal à saída do equalizador "Pulteq" (*High boost* no máximo, *High frequency* no máximo, *High Q* no máximo)

Na ilustração 71 e 73 observa-se o efeito do efeito de ganho sobre as altas frequências com uma curva de ganho (Q) mínimo. Comparativamente, a ilustração 72 e 74 demonstram o efeito que o mesmo filtro apresenta no sinal quando a curva de ganho é alterada para o máximo.

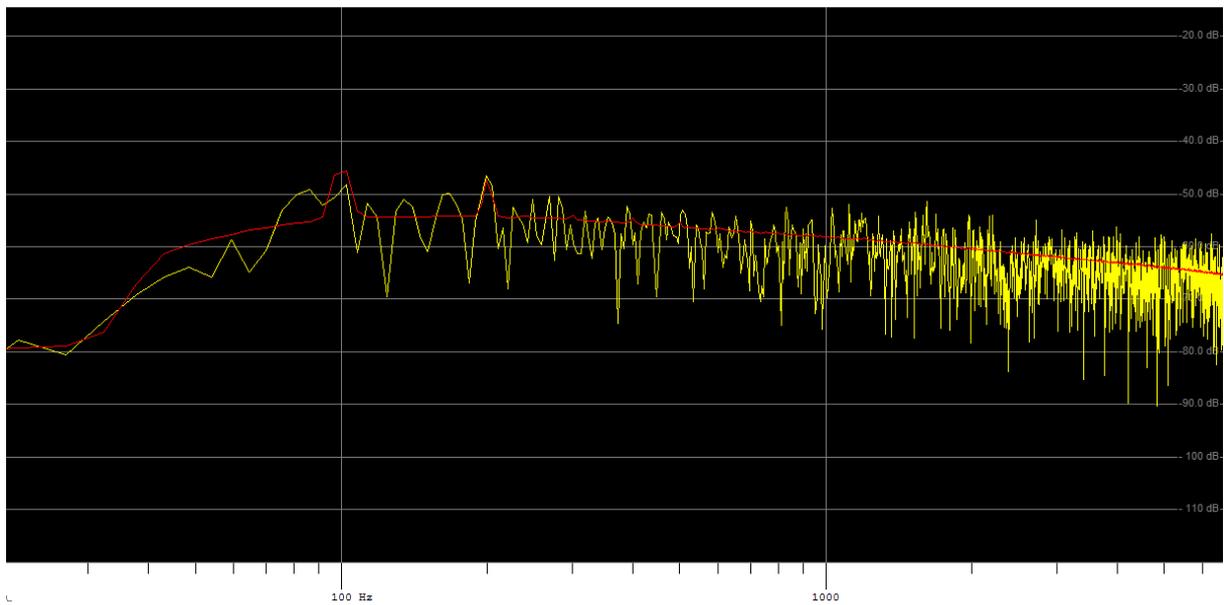


Ilustração 75 - Sinal à saída do equalizador "Pulteq" (*High cut* no máximo, *High cut frequency* no mínimo)

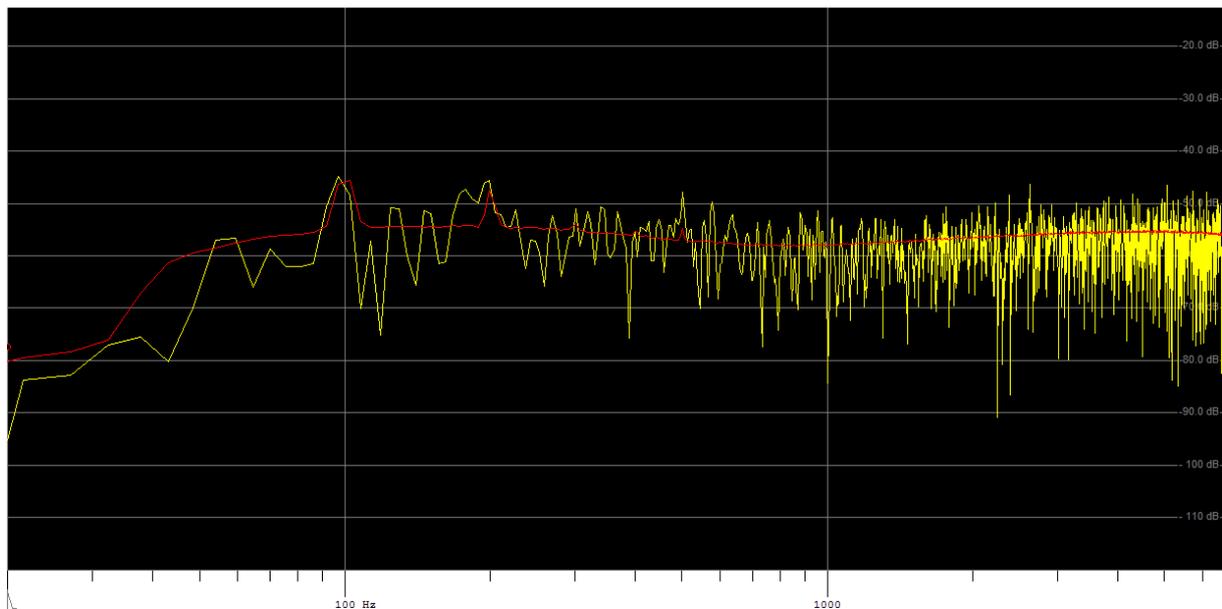


Ilustração 76 - Sinal à saída do equalizador "Pulteq" (*High cut* no máximo, *High cut frequency* no máximo)

A ilustração 75 e 76 apresentam o efeito do filtro bell aplicado às altas frequências. Ao elevar a frequência deste filtro, o seu efeito aparenta ser pouco relevante dentro da gama de frequências em estudo.

De um modo geral, os resultados obtidos são os esperados, à excepção do harmónico introduzido por defeito e do ganho superior ao esperado.

De seguida vamos observar os ganhos do circuito equalizador "W492". A numeração dos filtros é dada pela ordem das frequências que actuam, ou seja, o filtro 1 será correspondente ao primeiro filtro *shelving*, o filtro 2 e 3 serão os filtros *bell* de média-baixa e média-alta frequência, respectivamente, e o filtro 4 o último filtro *shelving*.

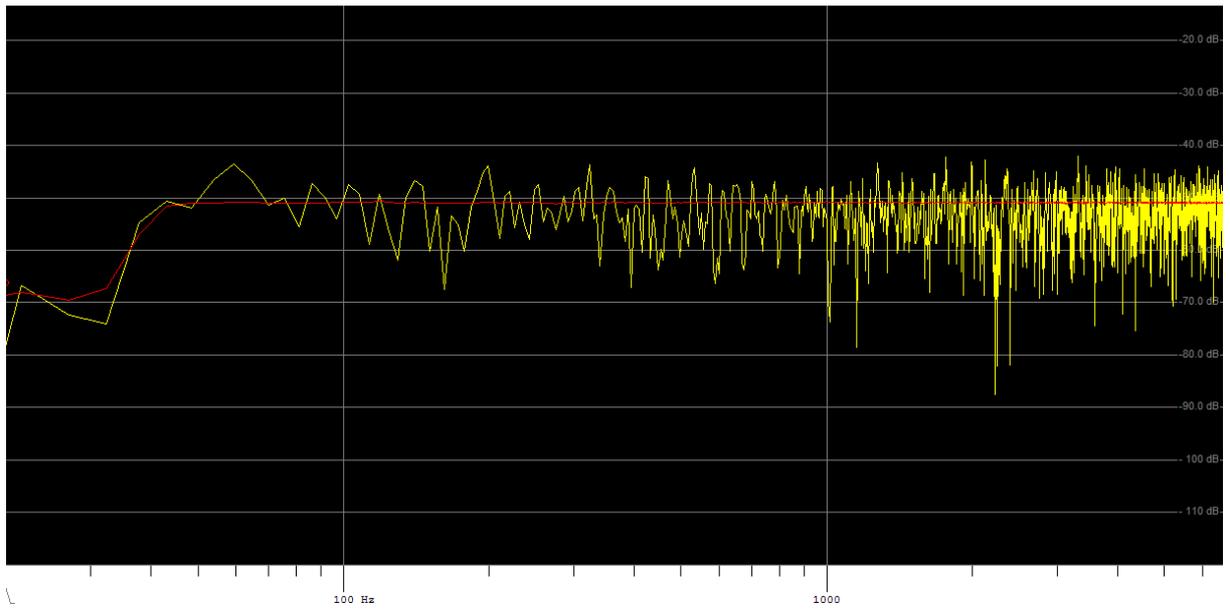


Ilustração 77 - Sinal à saída do equalizador "W492" (*Bypass*)

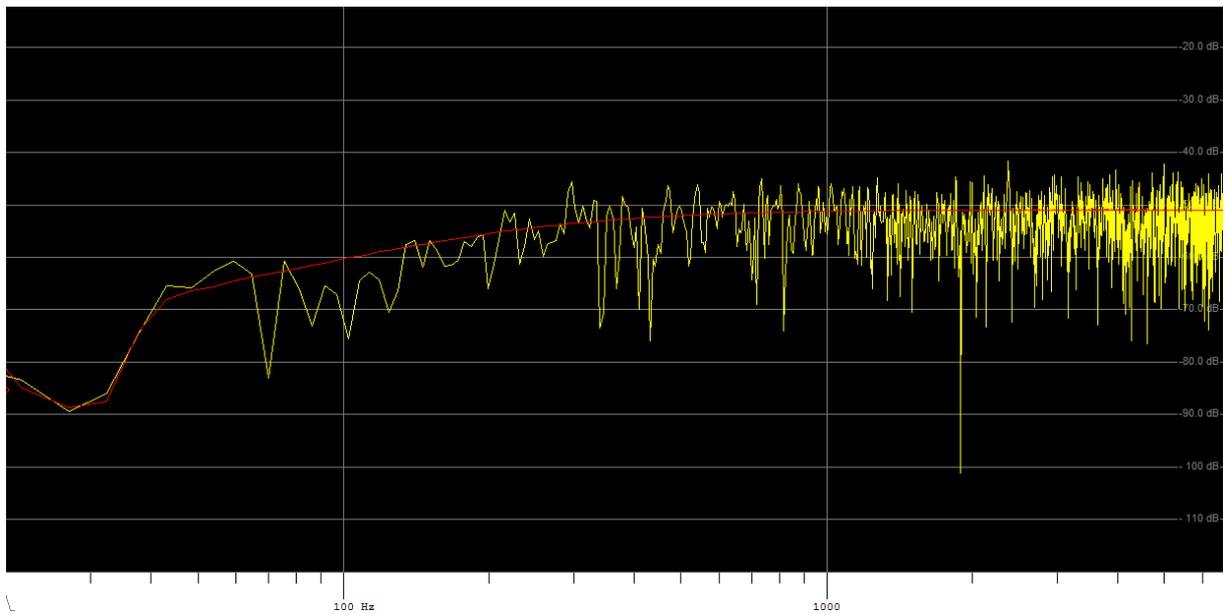


Ilustração 78 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 1 (*Gain no mínimo, Frequency no mínimo*)

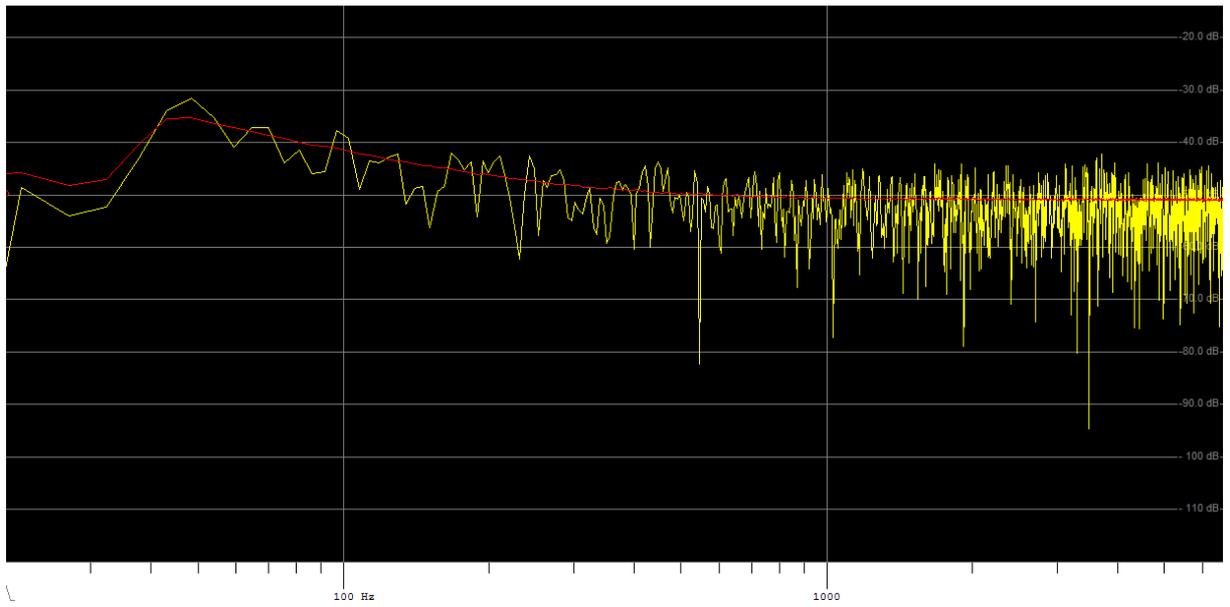


Ilustração 79 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 1 (*Gain no máximo, Frequency no mínimo*)

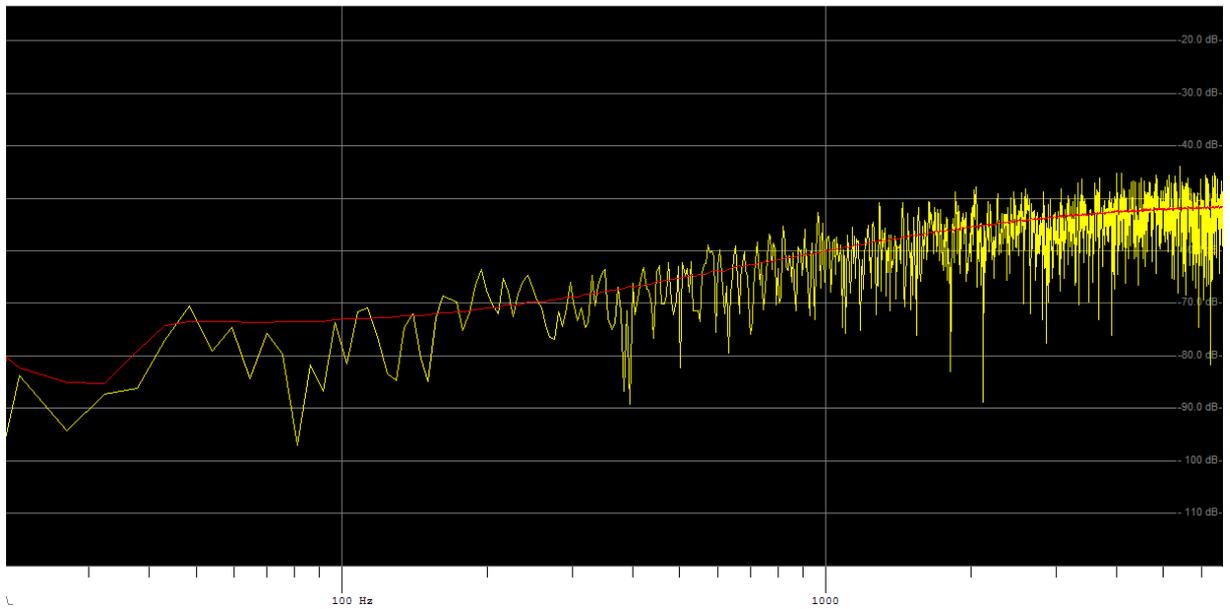


Ilustração 80 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 1 (*Gain no mínimo, Frequency no máximo*)

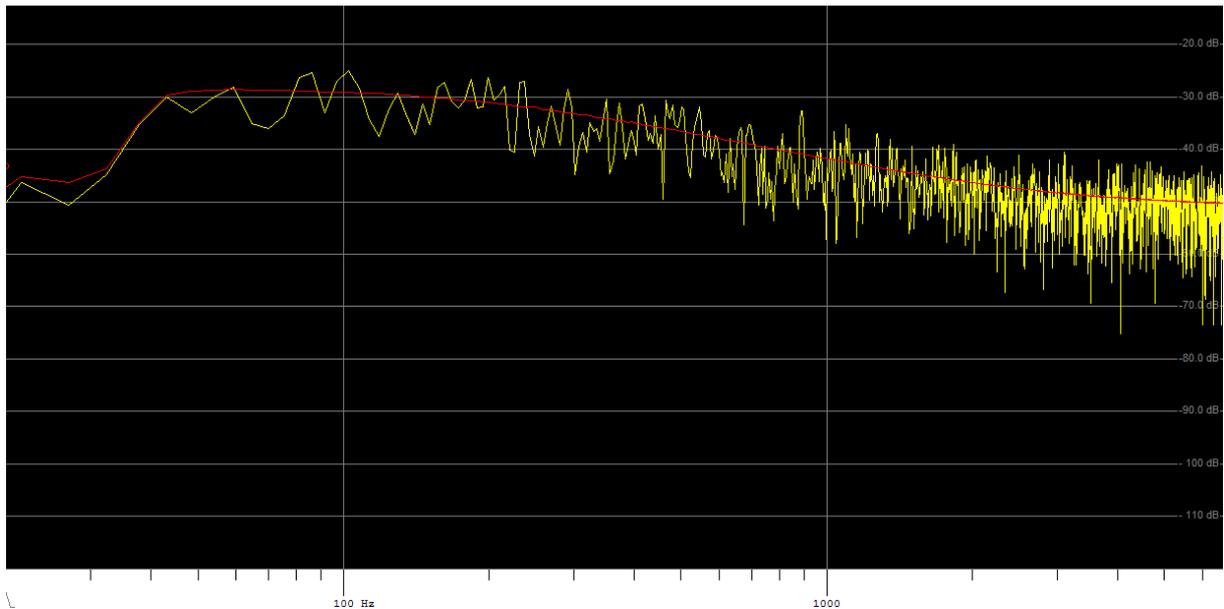


Ilustração 81 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 1 (*Gain* no máximo, *Frequency* no máximo)

Pelas ilustrações 78 à 81 conseguimos observar claramente o efeito que este filtro 1 apresenta sobre o sinal. Comparativamente ao equalizador G9, observa-se um ganho/atenuação mais significativo, sobre uma maior gama de frequências.

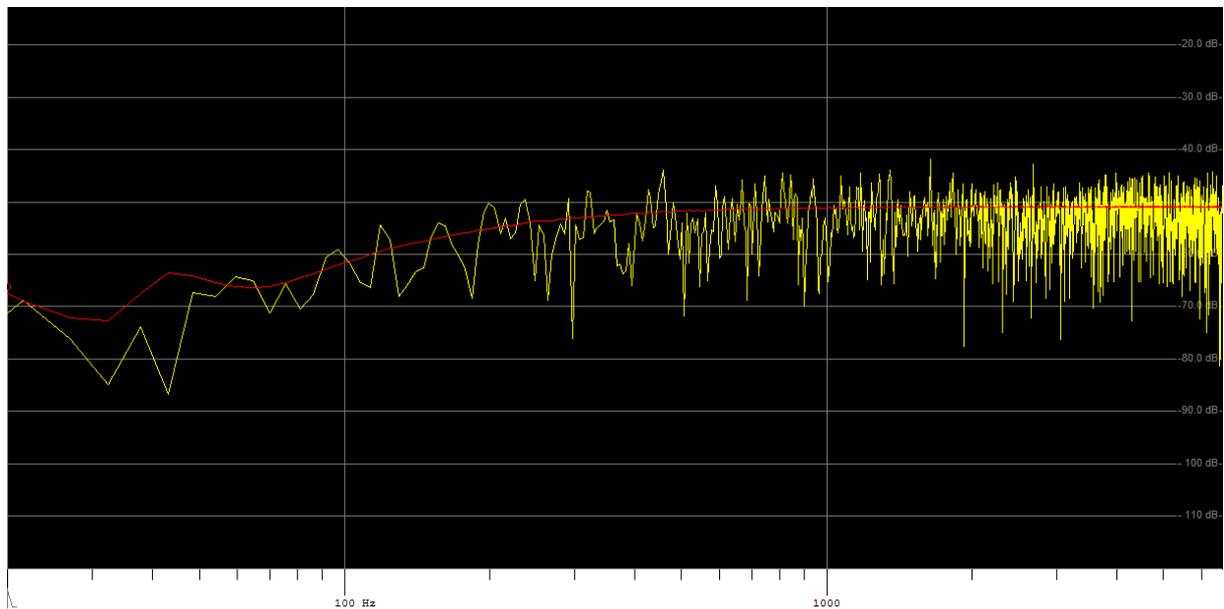


Ilustração 82 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 2 (*Gain* no mínimo, *Frequency* no mínimo)

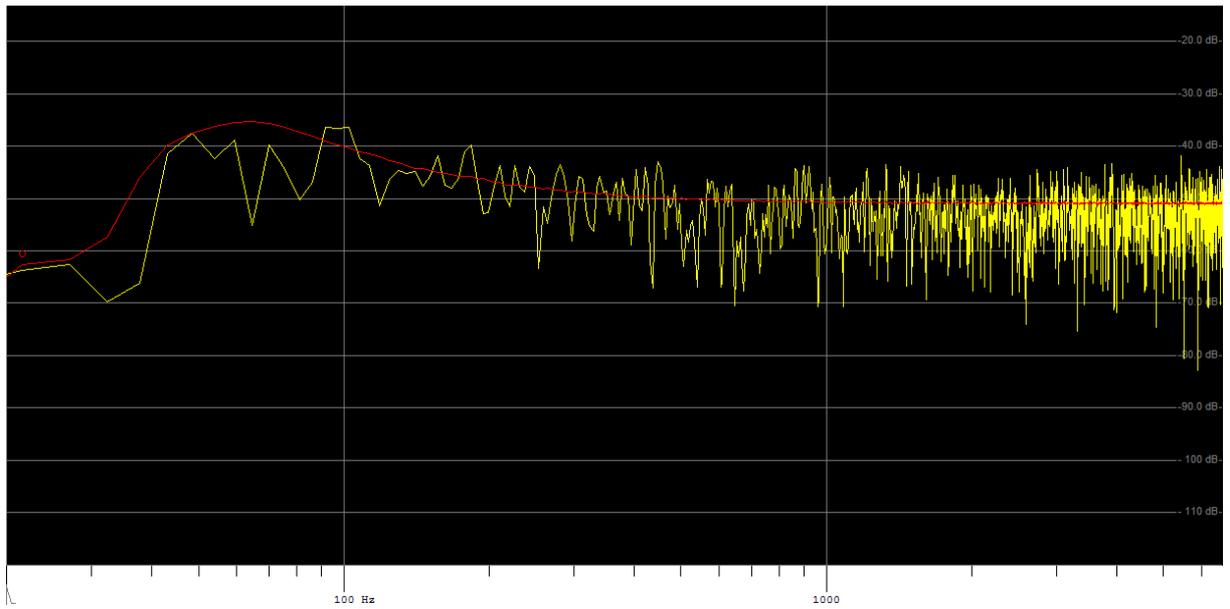


Ilustração 83 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 2 (*Gain* no máximo, *Frequency* no mínimo)

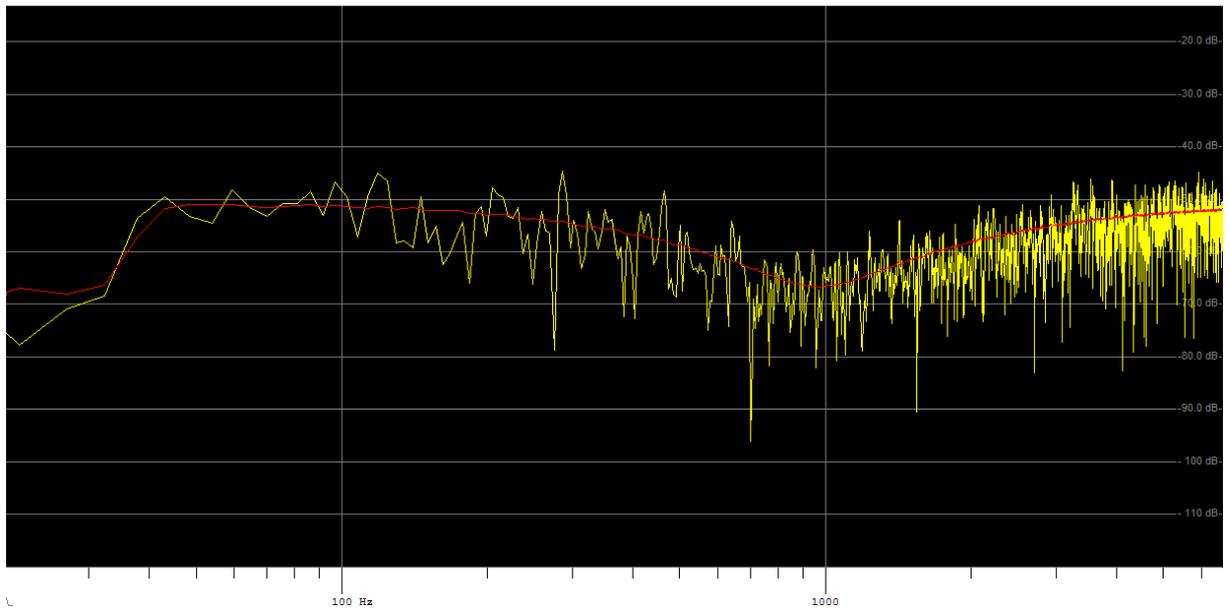


Ilustração 84 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 2 (*Gain* no mínimo, *Frequency* no máximo)

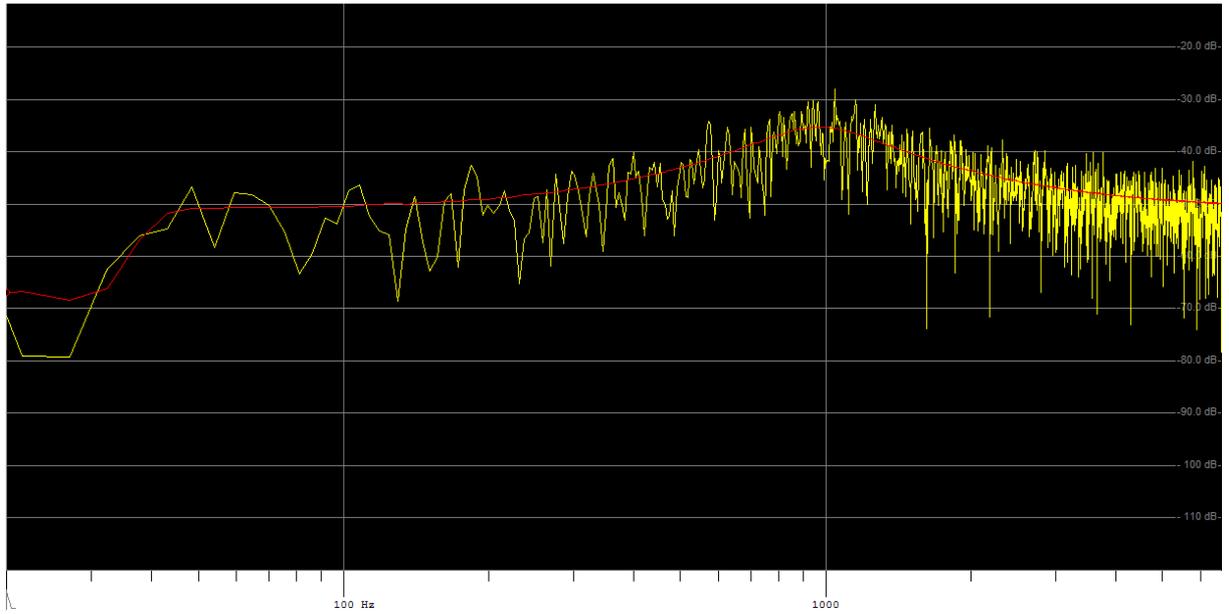


Ilustração 85 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 2 (*Gain* no máximo, *Frequency* no máximo)

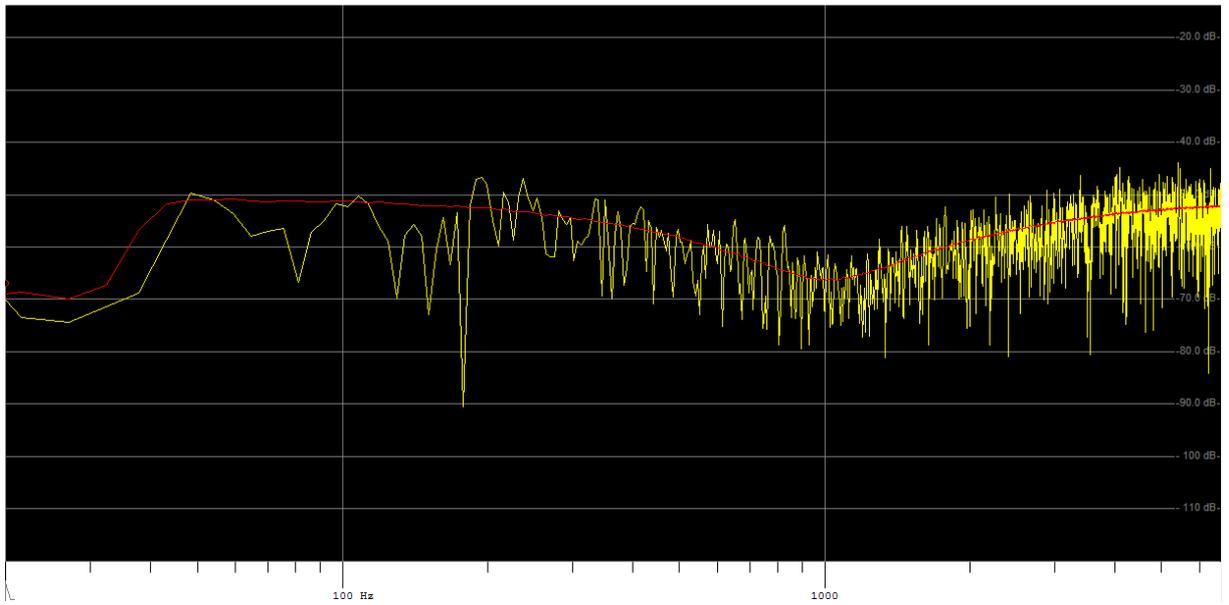


Ilustração 86 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 3 (*Gain* no mínimo, *Frequency* no mínimo)

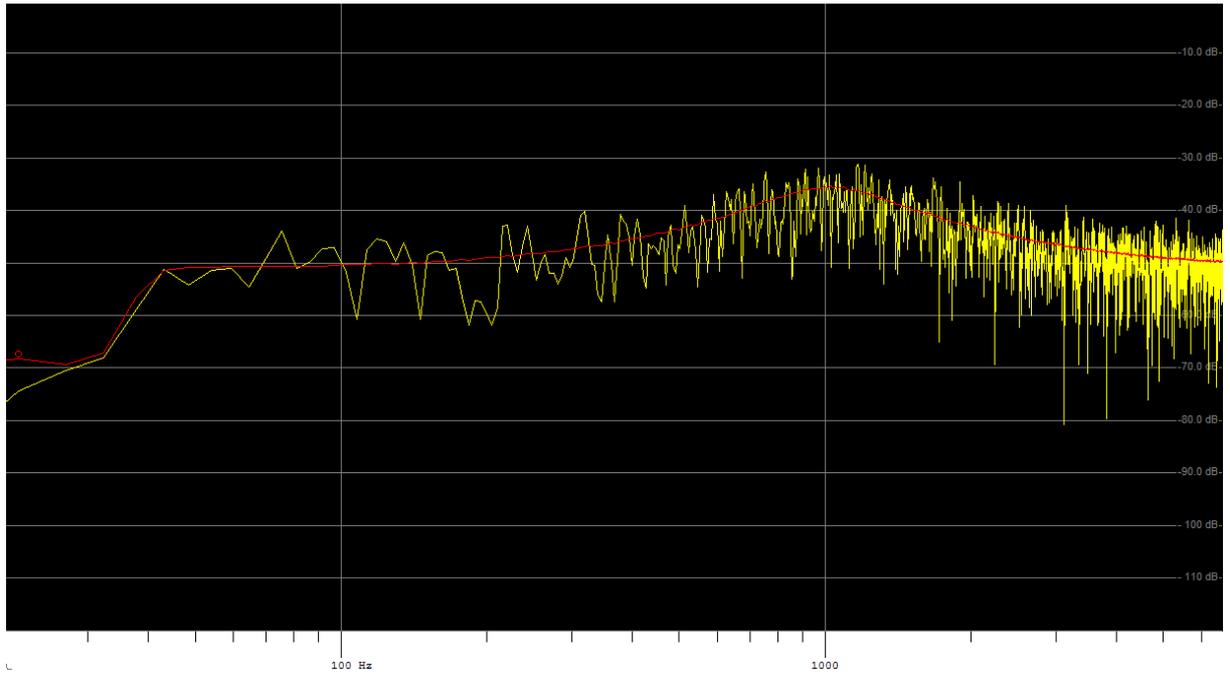


Ilustração 87 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 3 (*Gain* no máximo, *Frequency* no mínimo)

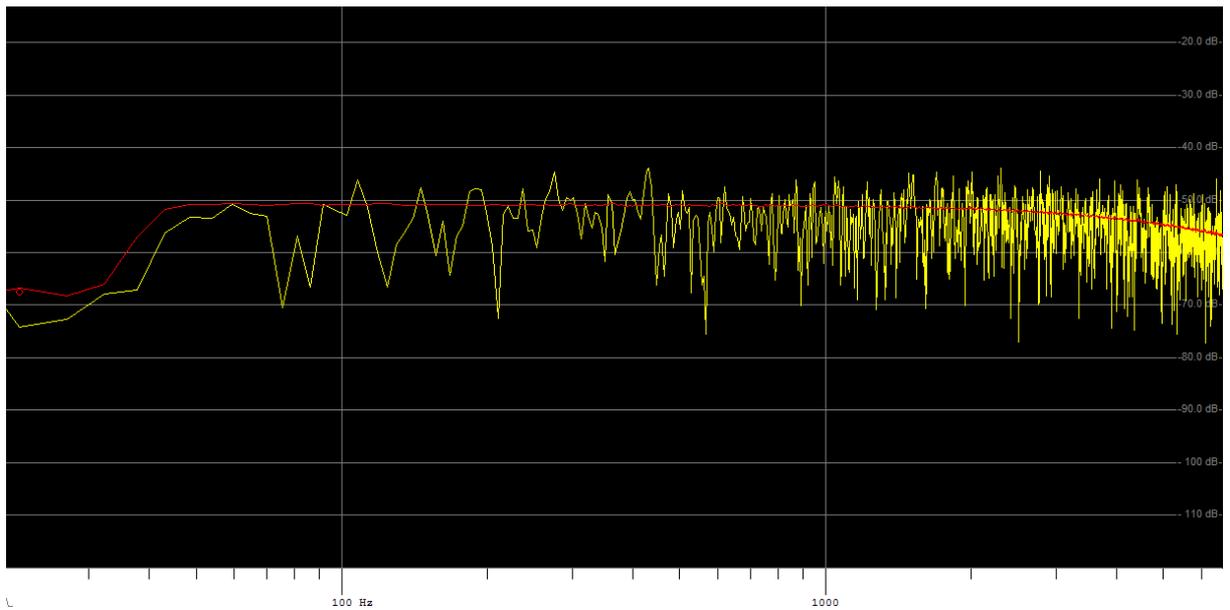


Ilustração 88 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 3 (*Gain* no mínimo, *Frequency* no máximo)

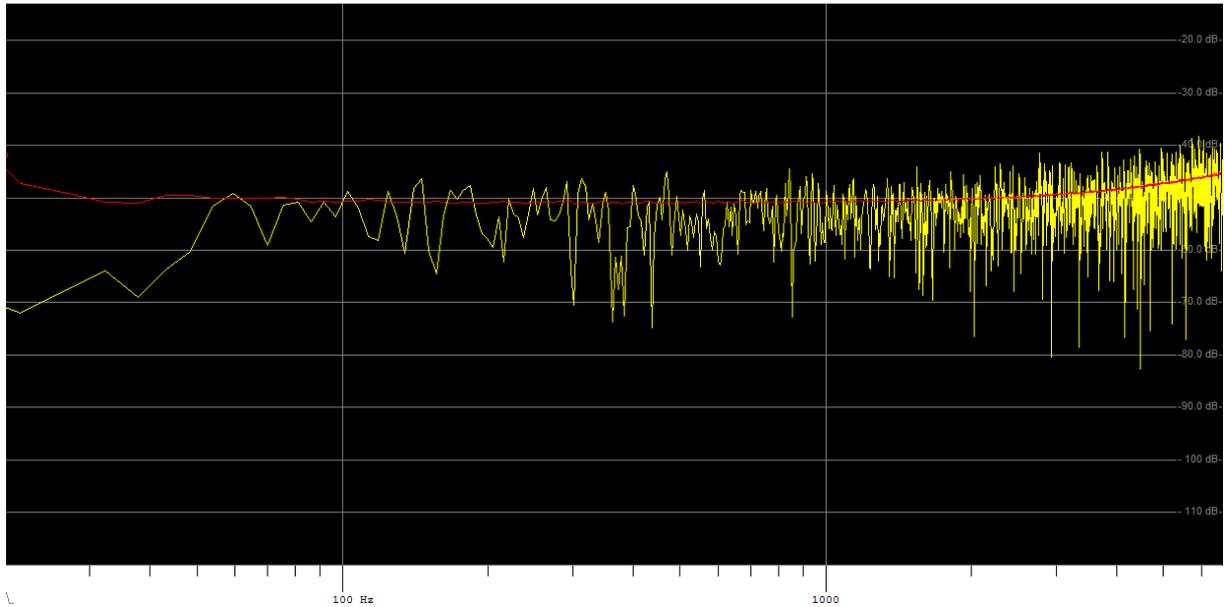


Ilustração 89 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 3 (*Gain* no máximo, *Frequency* no máximo)

As ilustrações relativas aos filtro 2 e 3 também demonstram os resultados esperados. É possível observar que o filtro 2 no limite máximo da frequência e o filtro 3 no limite mínimo da frequência actuam muito próximos um do outro. Mais uma vez obtemos um resultado mais significativo que no circuito G9 dentro desta vasta gama de frequências.

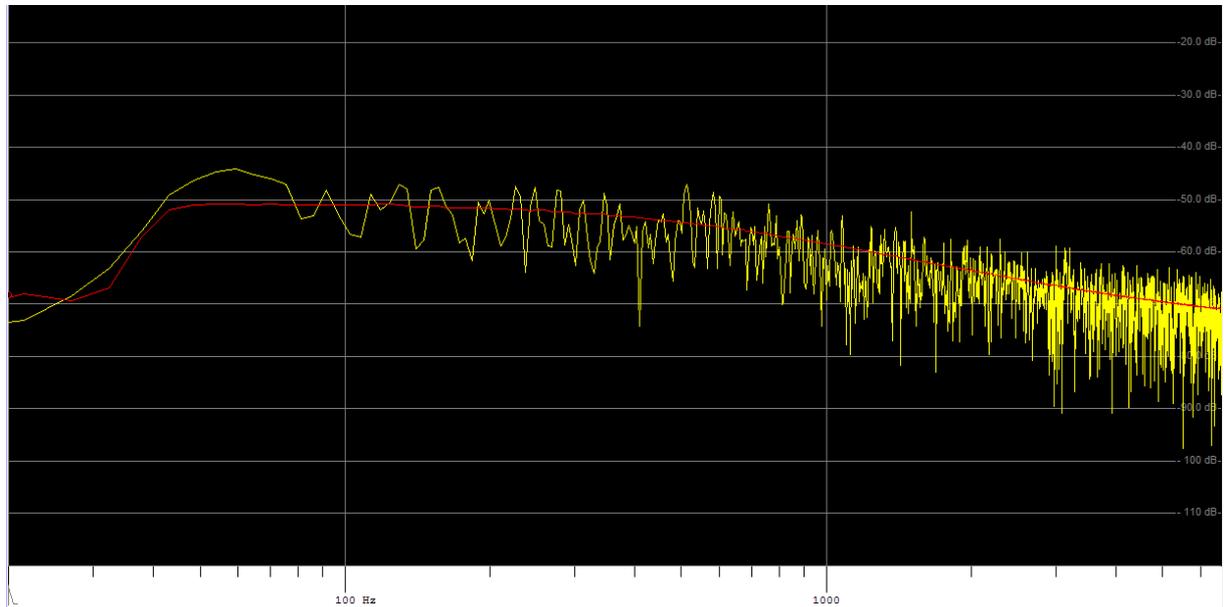


Ilustração 90 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 4 (*Gain* no mínimo, *Frequency* no mínimo)

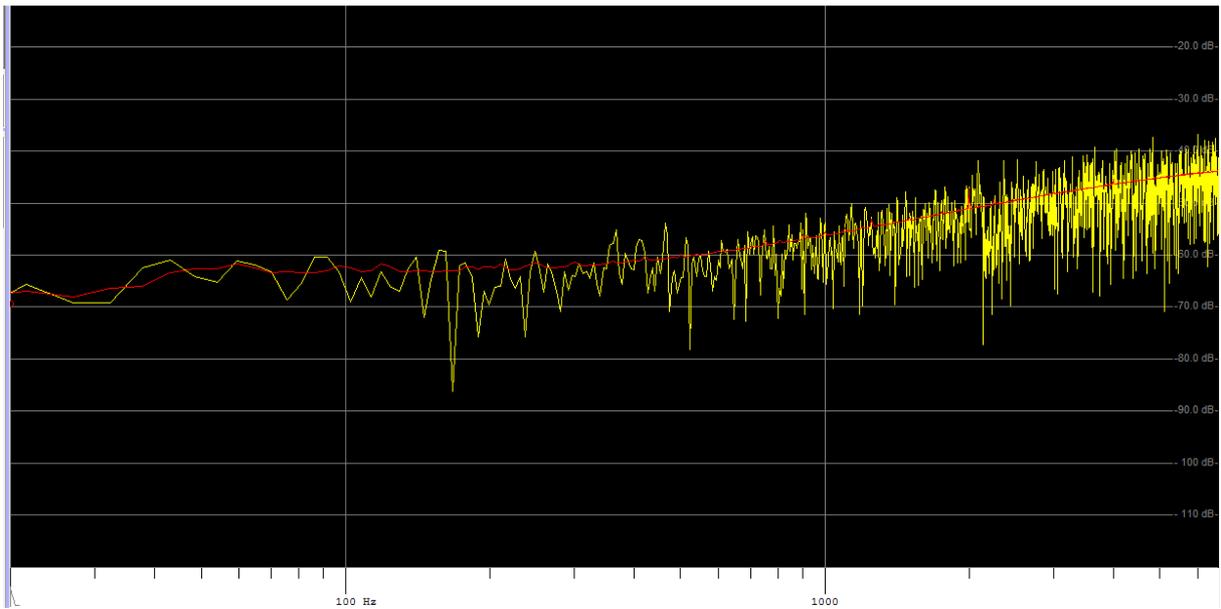


Ilustração 91 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 4 (*Gain no máximo, Frequency no mínimo*)

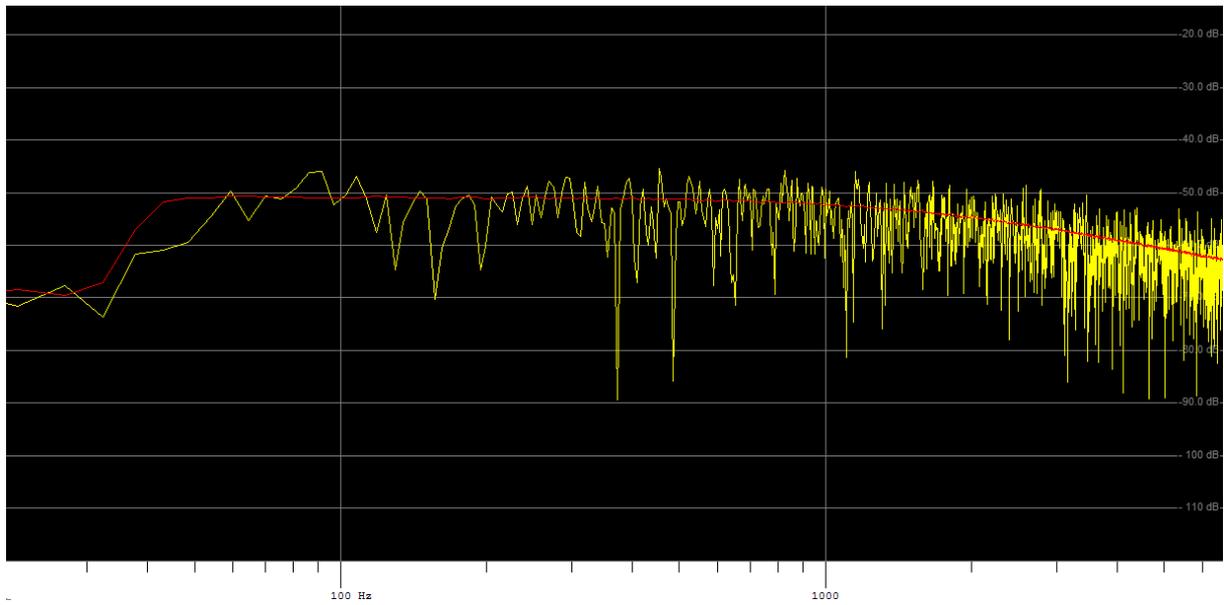


Ilustração 92 - Sinal à saída do equalizador "W492" no filtro 4 (*Gain no mínimo, Frequency no máximo*)

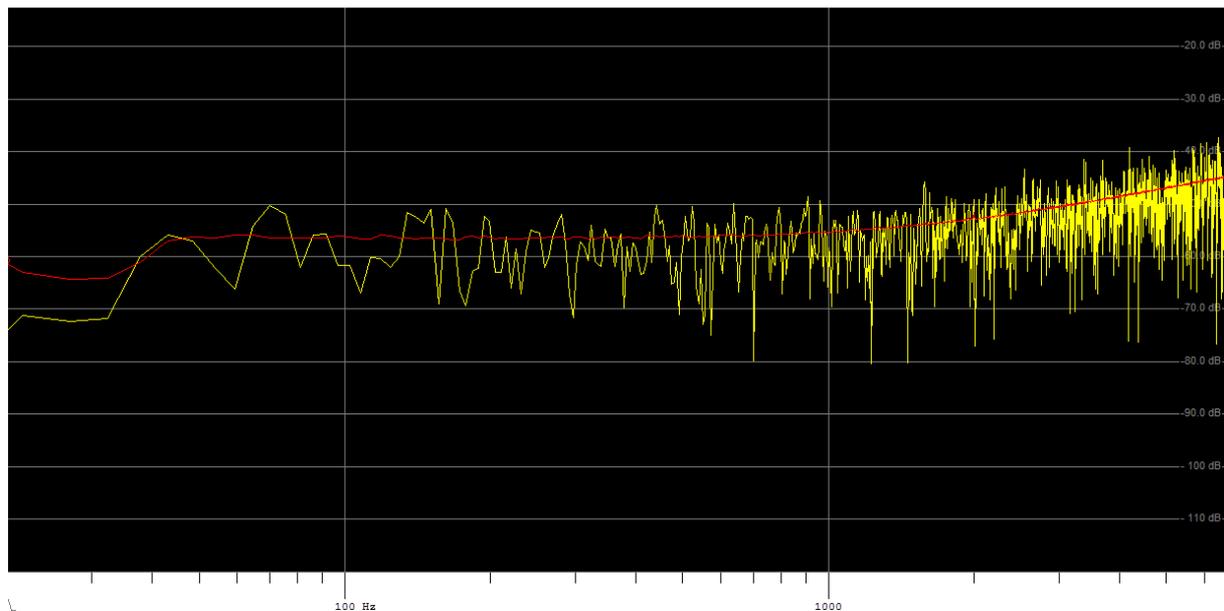


Ilustração 93 - Sinal à saída do equalizador “W492” no filtro 4 (*Gain* no máximo, *Frequency* no máximo)

No filtro 4 também se obtiveram resultados muito satisfatórios. Este filtro trabalha com frequências comuns à do filtro 3 mas a forma de onda resultante é diferente devido ao diferente tipo de filtro utilizado. Uma outra vantagem sobre o G9 foi que o circuito não gerou adição de distorção harmónica inesperada.

Para teste do circuito do compressor “GSSL” é necessário utilizar um sinal com variação ao longo da gama de frequências. Deste modo, foi utilizado o som do acorde Mi à entrada. Neste caso foi tocado um acorde ao invés da nota solta para o sinal ter mais informação ao longo de toda a gama. Os resultados foram obtidos através do sinal, num primeiro estágio, amplificados pelo circuito pré amplificador “G9” e direccionado de seguida para o compressor “GSSL”. O volume no pré amplificador foi ajustado em função do ganho de *makeup* para obter uma amplitude semelhante nos diferentes resultados. Os resultados podem ser vistos nas seguintes ilustrações.

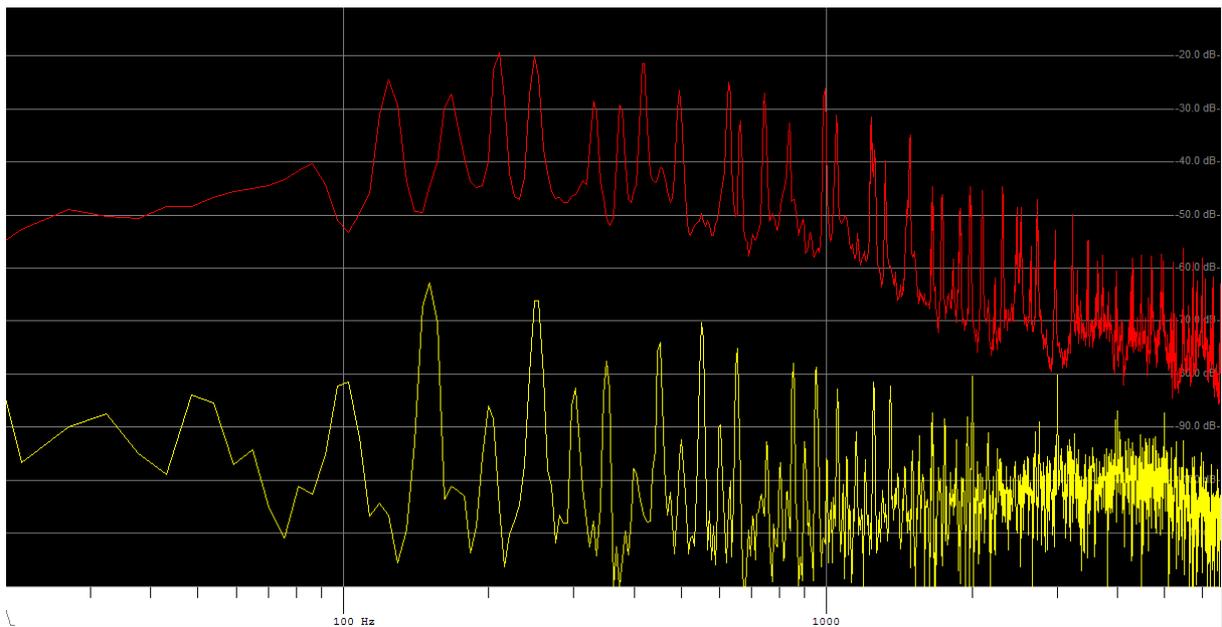


Ilustração 94 – Sinal à saída do compressor “GSSL” (*Makeup gain* perto do mínimo, *Ratio* 10)

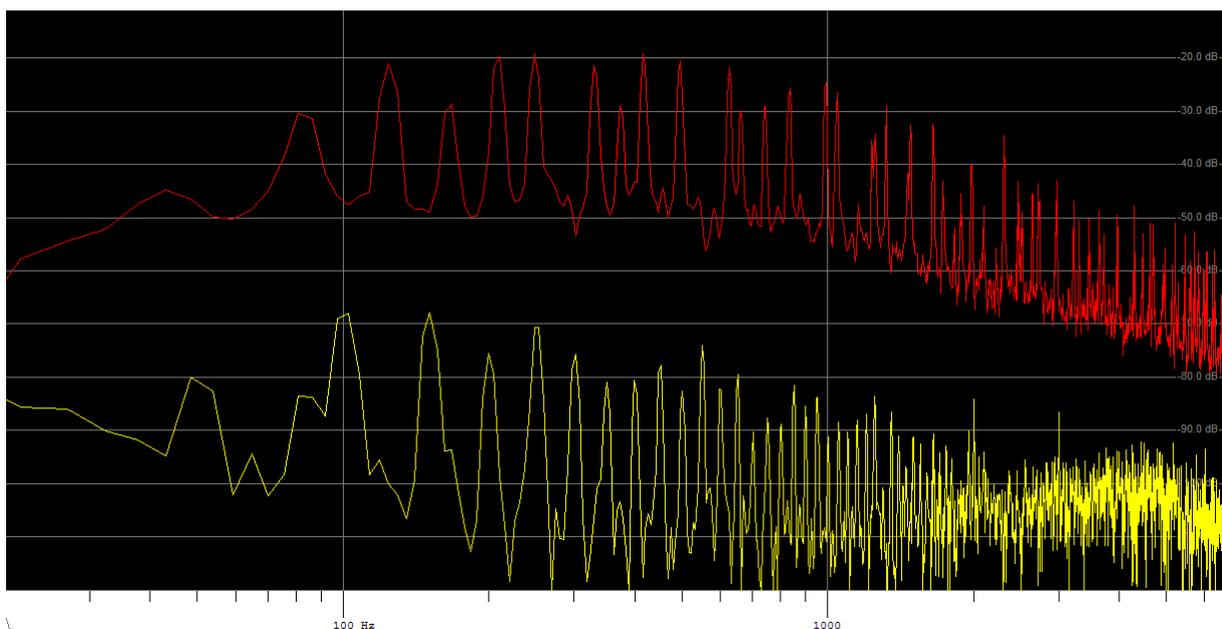


Ilustração 95 - Sinal à saída do compressor “GSSL” (*Makeup gain* no máximo, *Ratio* 10)

É possível observar uma maior amplitude nas altas e baixas frequências ao aplicar o ganho de *makeup*, enquanto que as frequências que já apresentavam maior amplitude antes de aplicar o ganho de *makeup* se mantiveram semelhantes. Foi usado um rácio de 10 de compressão por uma questão de melhor visualização gráfica.

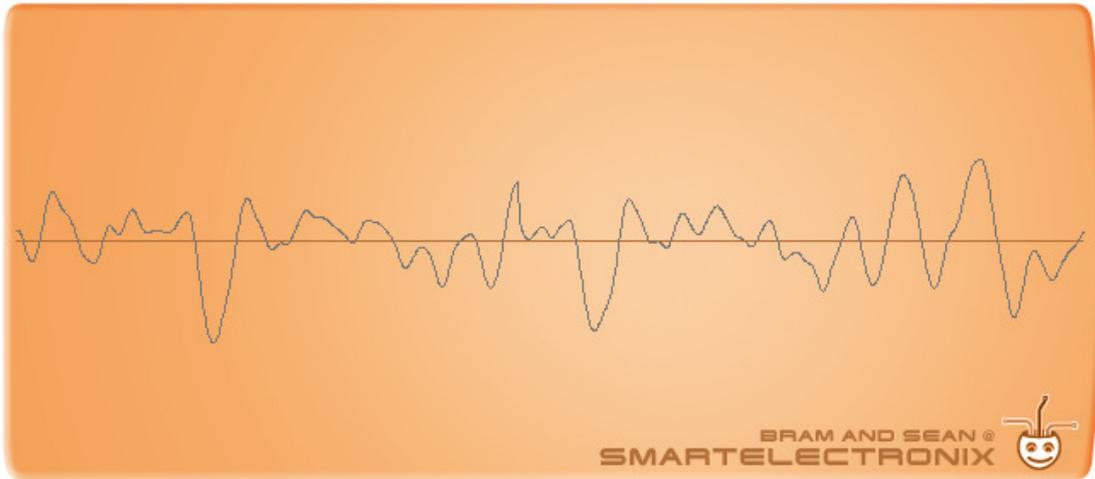


Ilustração 96 – Sinal à saída do compressor “GSSL” (*Makeup gain* perto do mínimo, *Ratio* 10)

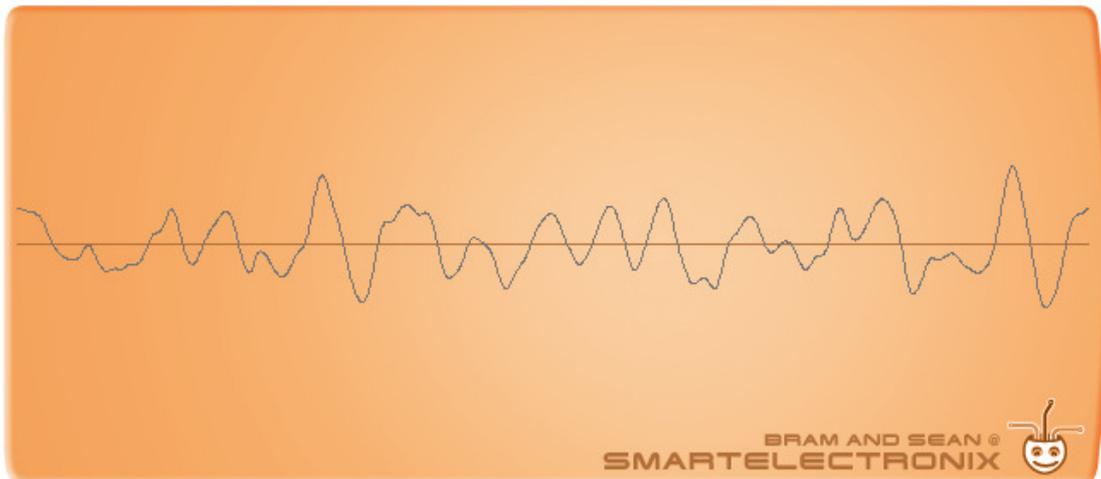


Ilustração 97 – Sinal à saída do compressor “GSSL” (*Makeup gain* perto do mínimo, *Ratio* 10)



Ilustração 98 - Sinal à saída do compressor “GSSL” (*Makeup gain* no máximo, *Ratio* 10)

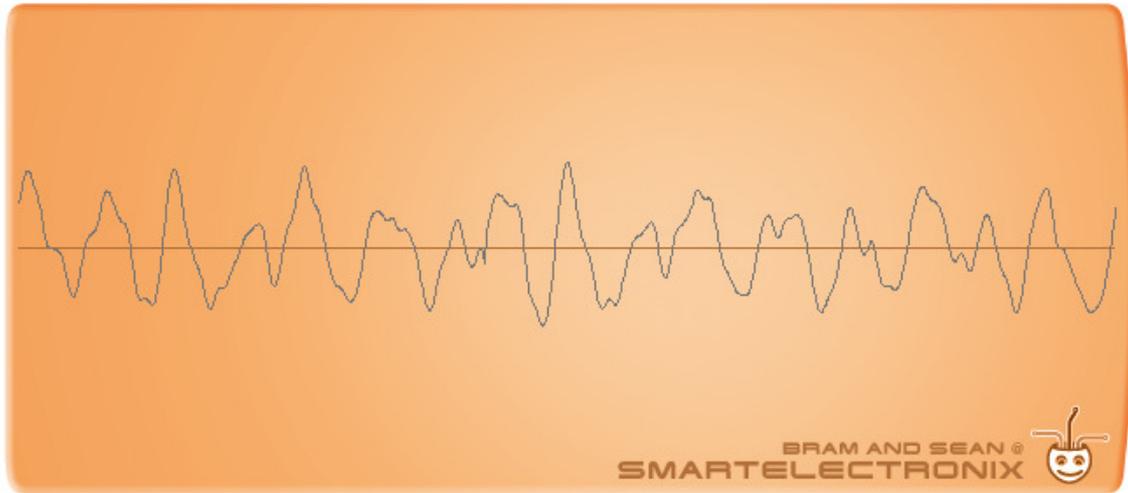


Ilustração 99 - Sinal à saída do compressor "GSSL" (*Makeup gain* no máximo, *Ratio* 10)

A ilustração 96 e 97, em comparação com a ilustração 98 e 99, apresentam também menos componentes de alta frequência porque não foi aplicado o *makeup gain*.

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

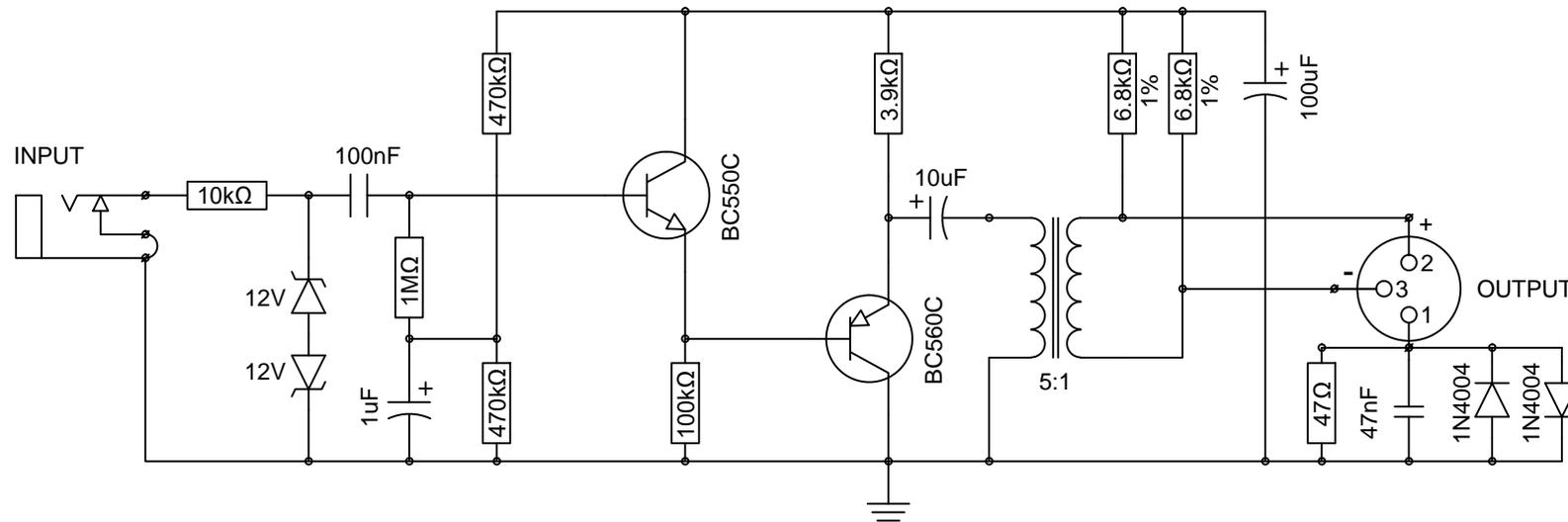
A partir dos resultados é possível aferir que o objectivo principal foi concluído com sucesso. O produto final é uma interface capaz de obter uma grande diversidade de resultados numa produção áudio. Apesar de, em termos auditivos, conseguirmos fazer uma distinção entre os circuitos de pré amplificação das diferentes tecnologias, graficamente não foi possível comprovar a diferente interação sobre os harmónicos que em teoria existia. No entanto, como o objectivo era obter diferentes resultados em termos áudio, podemos dizer que ambos são úteis na interface. Os restantes circuitos, tanto os de equalização (que atuam de maneiras distintas) como o de compressão vão ao encontro do objectivo do projeto.

Como complemento para esta interface, seria pertinente adicionar um ADC interno e passar a funcionar com ligação USB, sem necessidade de componentes externos. Assim passaria a ser uma interface profissional *all-in-one* para um estúdio caseiro.

BIBLIOGRAFIA

- Ballou, G. (2008). Handbook for sound engineers. Taylor & Francis.
- Benade, A. H. (2014). Horns, strings, and harmony. Courier Corporation.
- Blencowe, M. (2010). THE OPTIMIZED SRPP AMP, Pt. 1 Discover how to use this simple circuit in tube audio design. Audio electronics, 41(5), 13.
- Boscorelli, N. (1999). The Stompbox Cookbook: Build Advanced Effects for Electric Guitar & Bass.
- Dittmar, T. (2012). Audio Engineering 101: A Beginner's Guide to Music Production. Taylor & Francis.
- Hamm, R. O. (1973). Tubes versus Transistors-is there an Audible Difference. Journal of the audio engineering society, 21(4), 267-273.
- Hood, J. L. (1997). Valve and transistor audio amplifiers. Elsevier. ´
- Karki, J. L. (2001). Designing for low distortion with high-speed op amps. Analog and Mixed-Signal Products, Analog Applications Journal.
- R. A. Schaefer, "New Techniques for Organ Tone Generation," J. of the Audio Eng. Soc., vol. 19, pp. 570-575 (July/Aug. 1971).
- Self, D. (2013). Audio power amplifier design. Taylor & Francis.
- Self, D., Duncan, B., Sinclair, I., Brice, R., Hood, J. L., Singmin, A., ... & Watkinson, J. (2009). Audio engineering: Know it all (Vol. 1). Newnes.
- Valley, G. E., & Wallman, H. (Eds.). (1948). Vacuum tube amplifiers.

ANEXOS



TÍTULO DO PROJECTO

Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio

TÍTULO DO DESENHO

DI box "Bo Hansen"

REV.

A

ANEXO

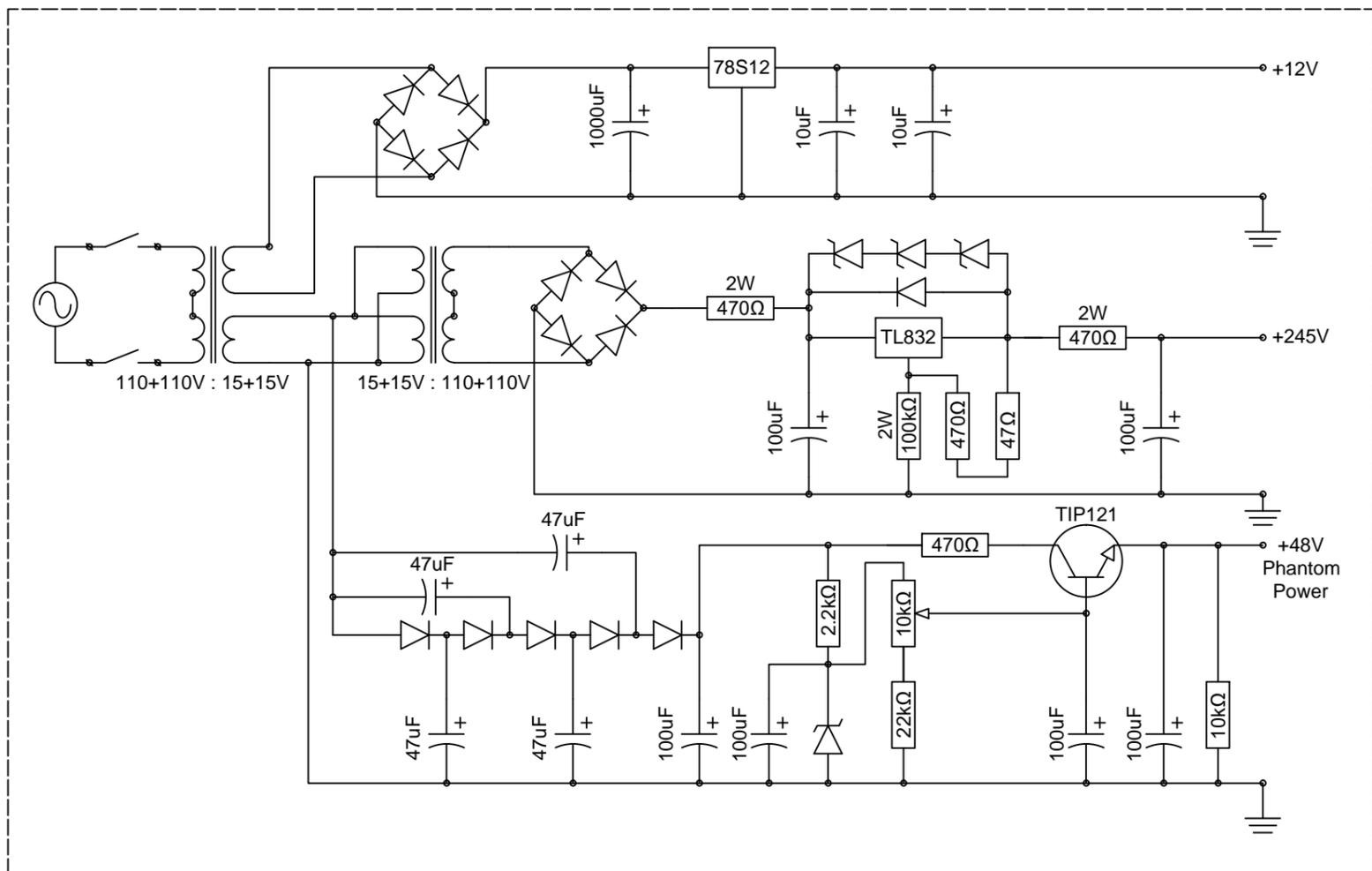
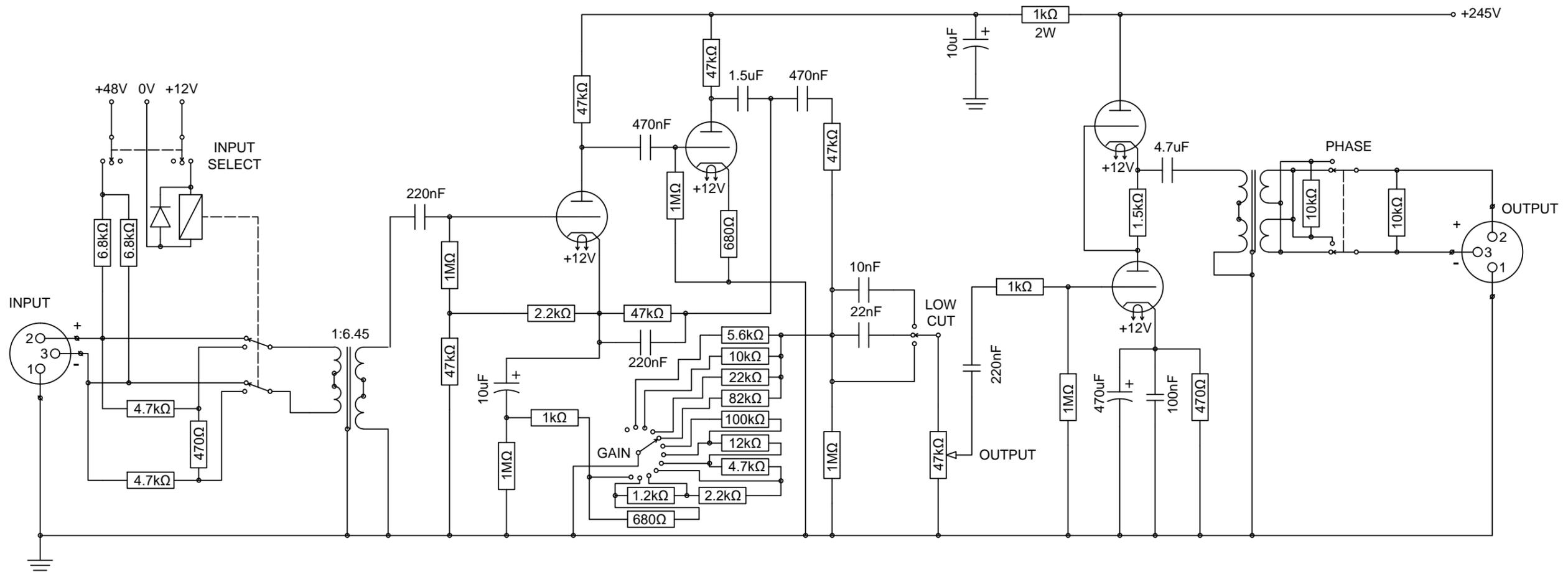
Anexo I

DATA

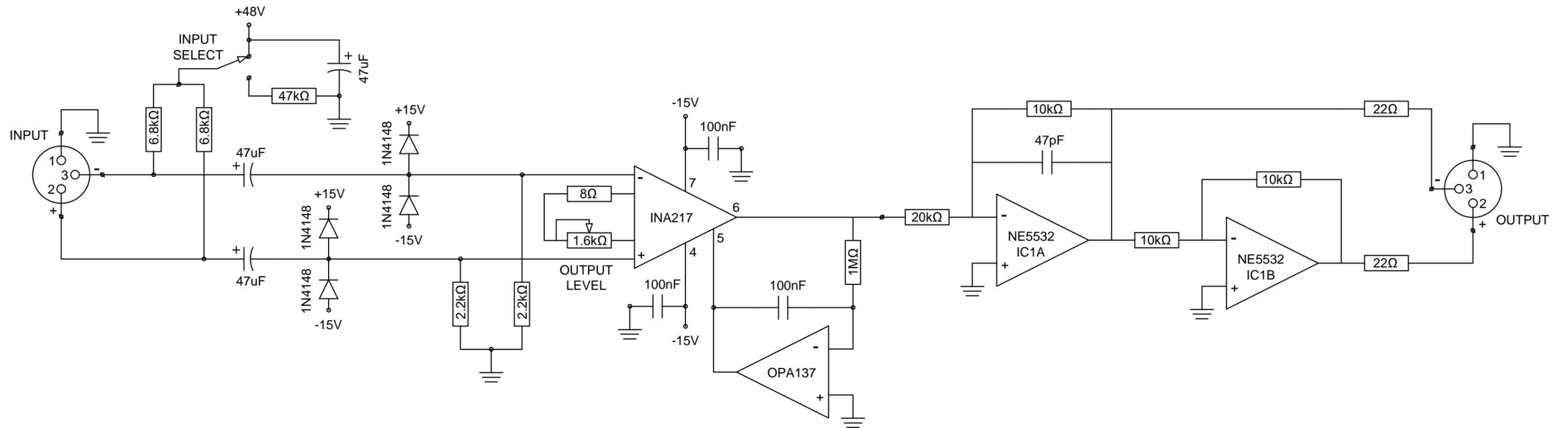
Julho 2017

FOLHA

1/1



TÍTULO DO PROJECTO		
Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio		
TÍTULO DO DESENHO	Pre-amplificador "G9"	REV. A
ANEXO	Anexo II	DATA Julho 2017
		FOLHA 1/1



TÍTULO DO PROJECTO

Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio

TÍTULO DO DESENHO

Pre-amplificador "5 dollar"

REV.

A

ANEXO

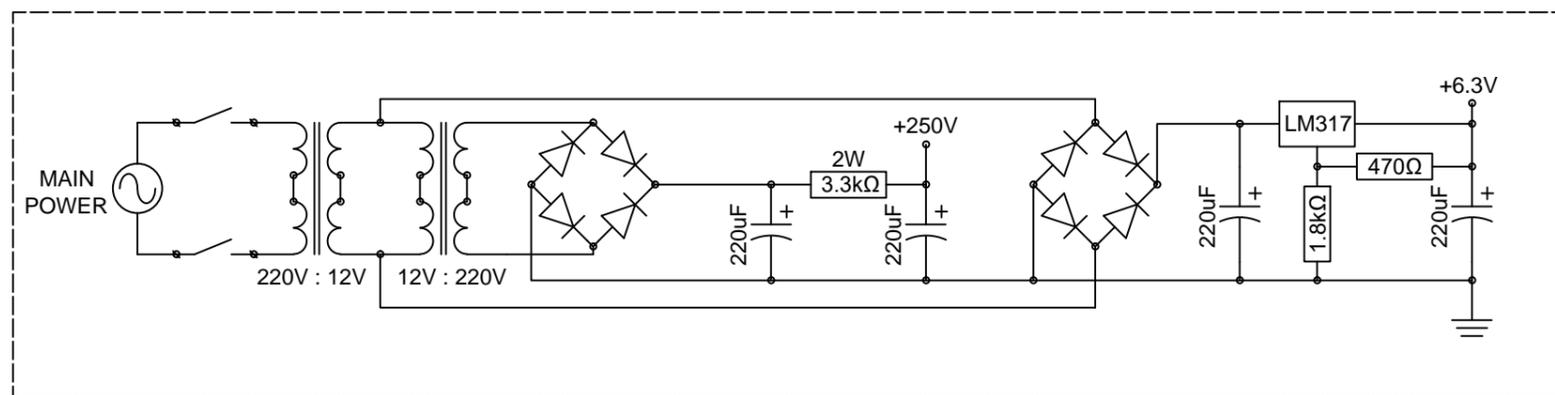
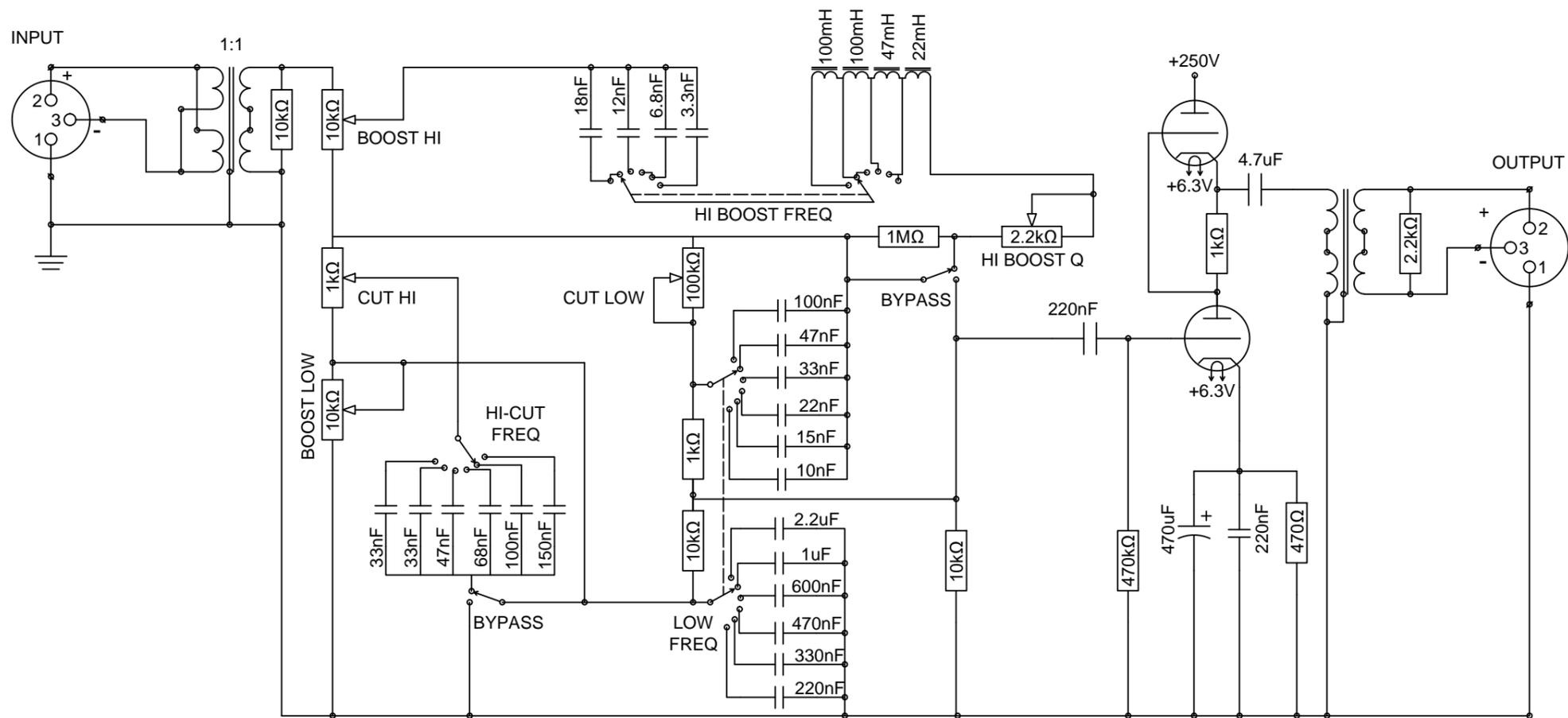
Anexo III

DATA

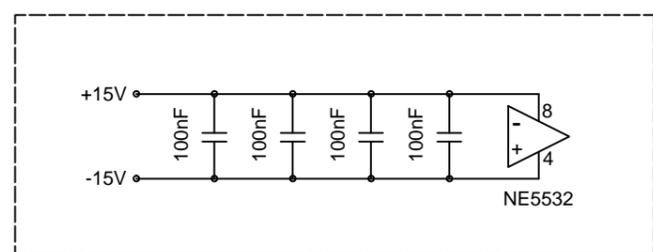
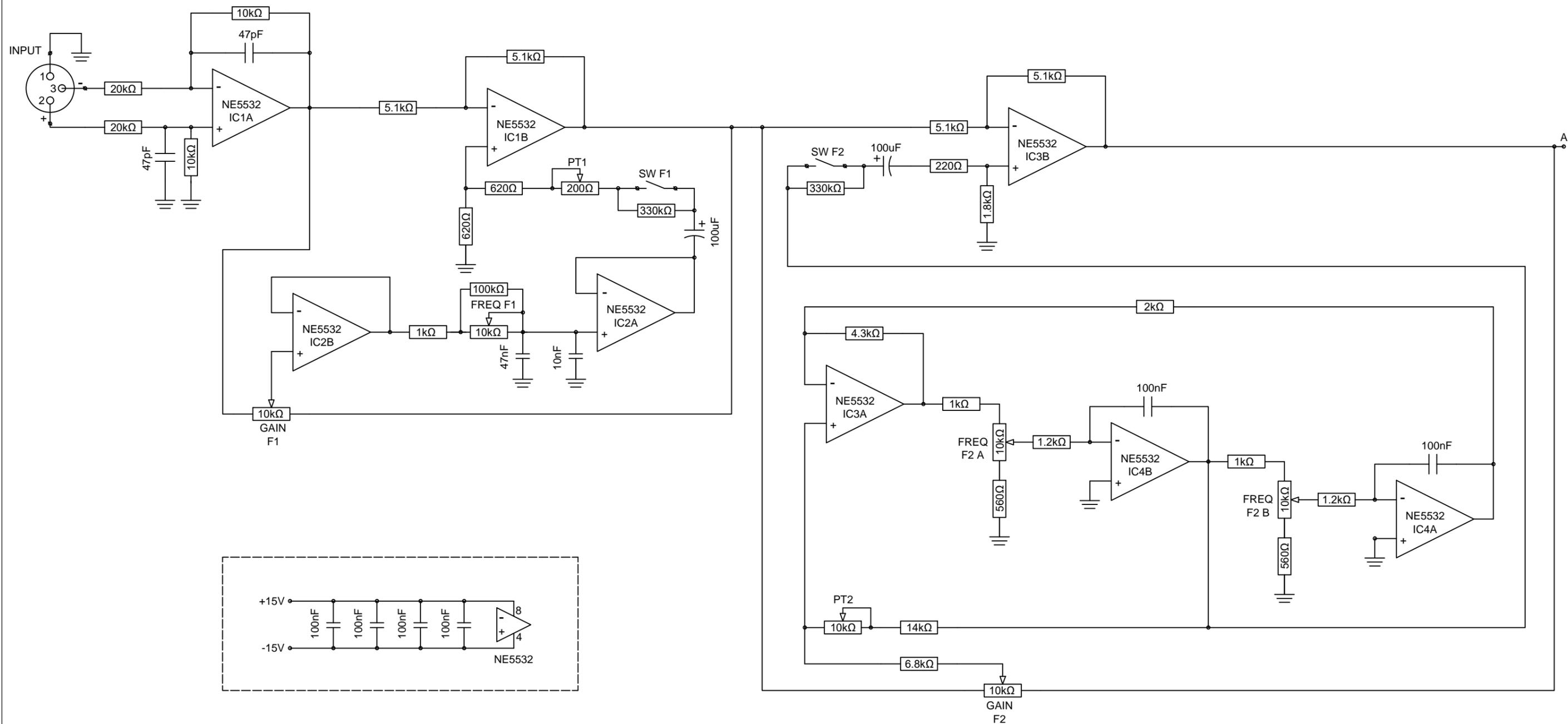
Julho 2017

FOLHA

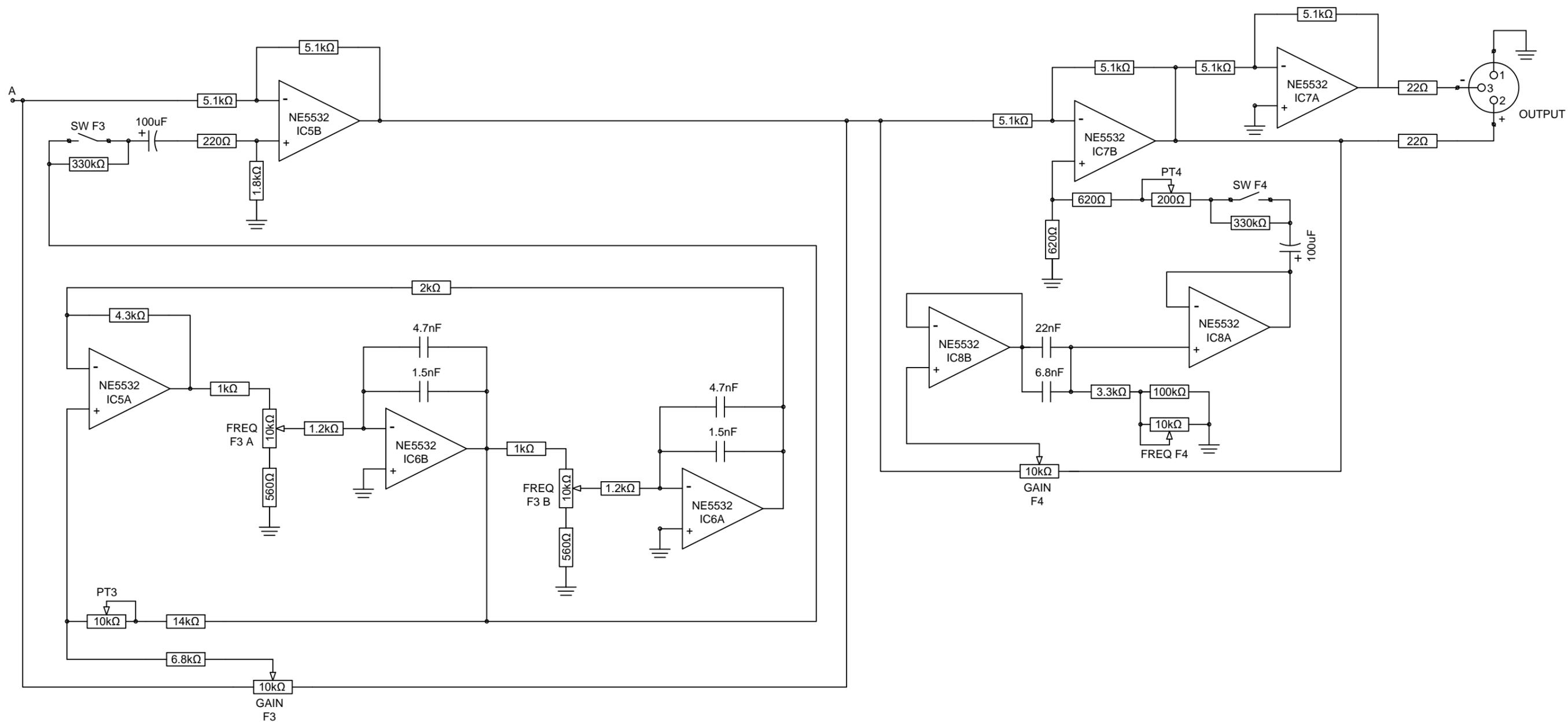
1/1



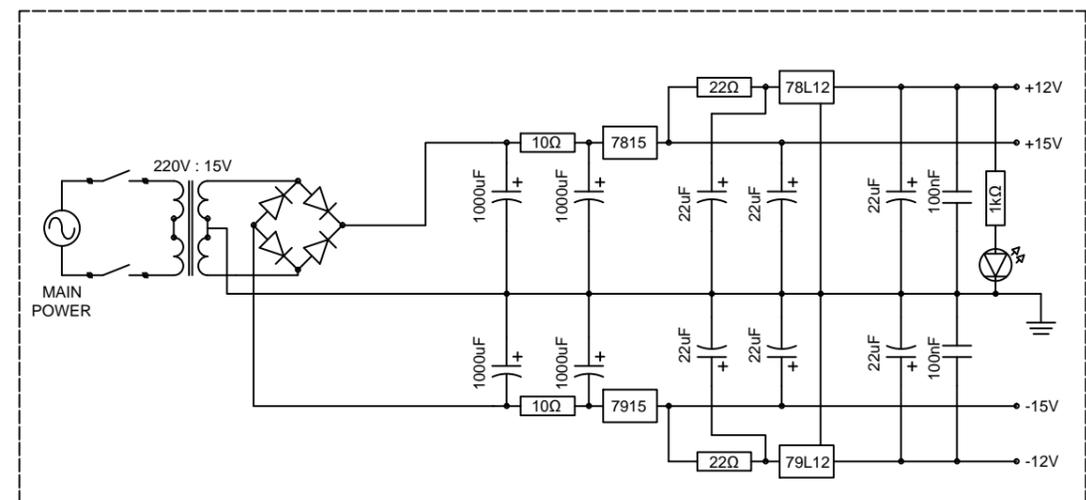
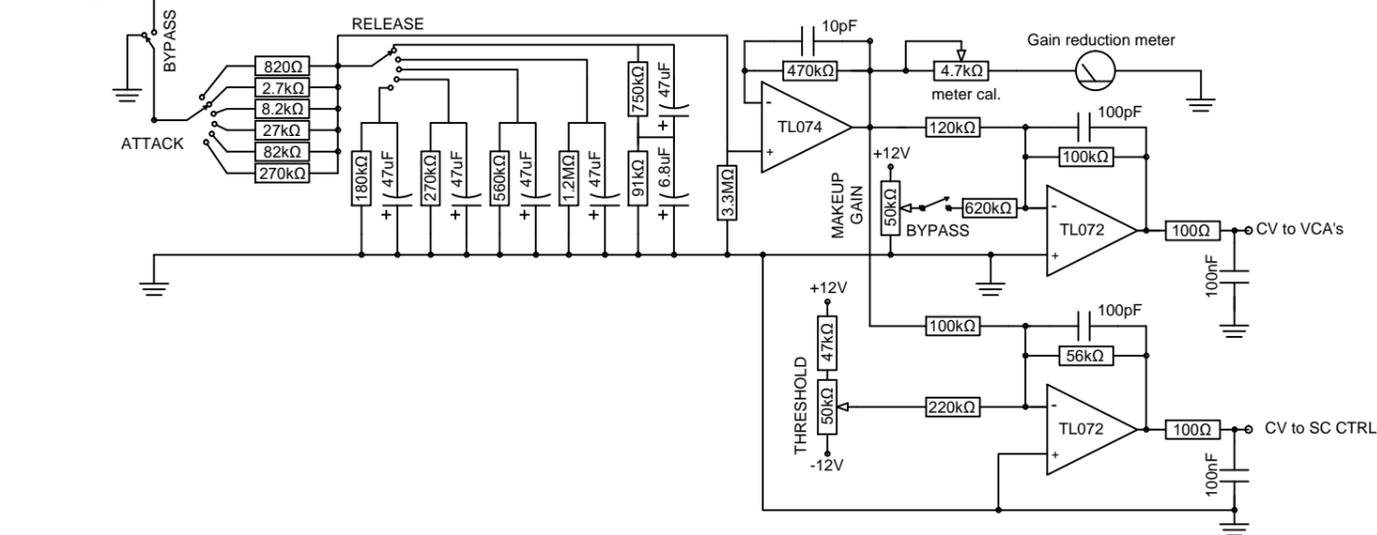
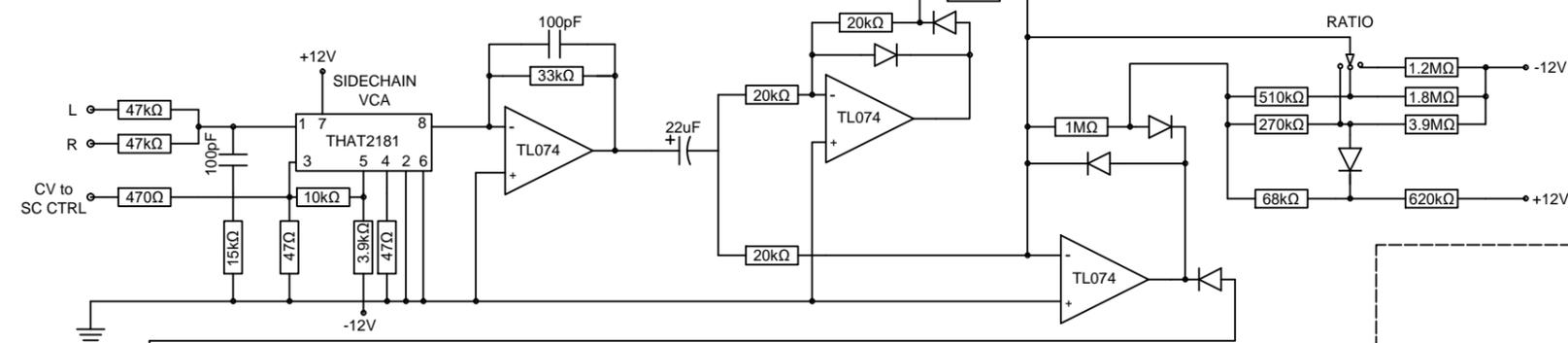
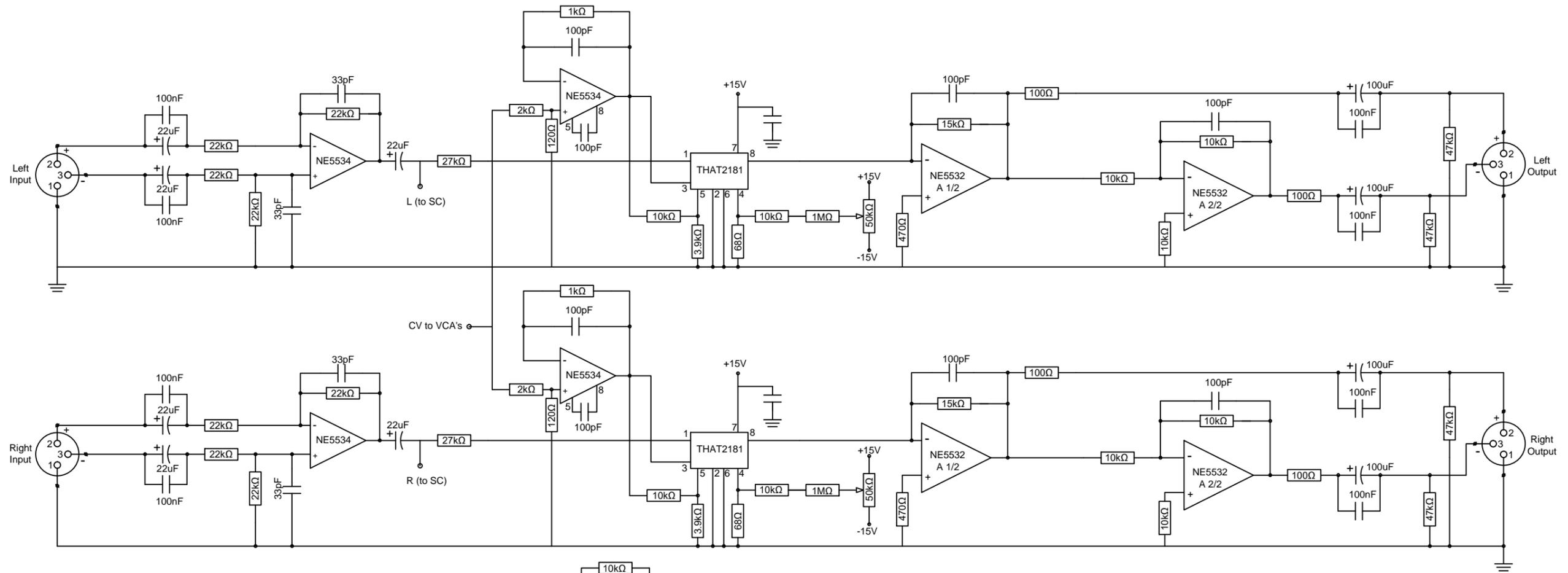
TÍTULO DO PROJECTO		
Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio		
TÍTULO DO DESENHO	Equalizador "Pulseq"	REV. A
ANEXO	Anexo IV	FOLHA 1/1
DATA	Julho 2017	



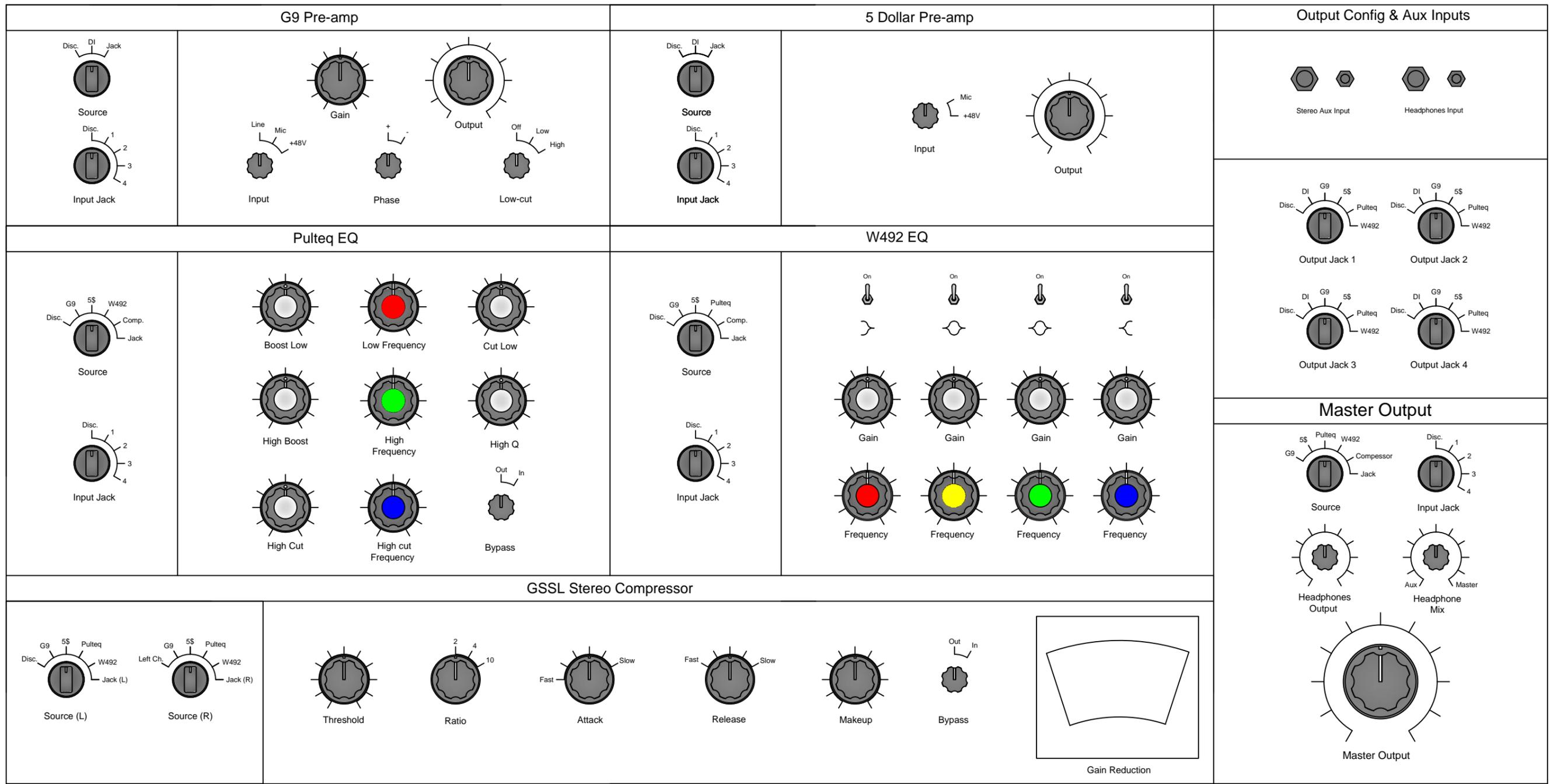
TÍTULO DO PROJECTO		
Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio		
TÍTULO DO DESENHO	Equalizador "W492"	REV. A
ANEXO	Anexo V	DATA Julho 2017
		FOLHA 1/2



TÍTULO DO PROJECTO		
Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio		
TÍTULO DO DESENHO	Equalizador "W492"	REV. A
ANEXO	Anexo V	DATA Julho 2017
		FOLHA 2/2



TÍTULO DO PROJECTO		
Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio		
TÍTULO DO DESENHO	Compressor Stereo "GSSL"	REV. A
ANEXO	Anexo VI	FOLHA 1/1
DATA	Julho 2017	



TÍTULO DO PROJECTO		
Desenvolvimento de uma interface analógica de áudio		
TÍTULO DO DESENHO	Diagrama geral do layout da interface	REV. A
ANEXO	Anexo VII	DATA Julho 2017
		FOLHA 1/1