

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTEVÃO TERMINIELLO PADIM

PRÉ-AMPLIFICADOR DE IMPEDÂNCIA DE ENTRADA VARIÁVEL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2022

ESTEVÃO TERMINIELLO PADIM

PRÉ-AMPLIFICADOR DE IMPEDÂNCIA DE ENTRADA VARIÁVEL

Variable input impedance preamplifier

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção da graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Paulo J. Silva Costa

CORNÉLIO PROCÓPIO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Estevão Terminiello Padim

Pré-Amplificador de Impedância de Entrada Variável

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:40hs do dia 01/12/2022 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Avaliadora composta pelos professores(as) abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Paulo Junior Silva Costa - Presidente (Orientador(a))

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Augusto Modesto - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Ângelo Feracin Neto - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

RESUMO

PADIM, EProstevão Terminiello. **PRÉ-AMPLIFICADOR DE IMPEDÂNCIA DE ENTRADA VARIÁVEL**. 2022. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2022.

Neste trabalho, busca apresentar um pré-amplificador que possibilite a variação da impedância de entrada do circuito, assim pode-se melhorar tanto o ganho de tensão como a distorção do áudio adquirido pelos microfones. O circuito será simulado no *software Proteus®*, validando o circuito para a variação da impedância de entrada.

Palavras-chave: Pré-amplificadores; Impedância de entrada variável.

ABSTRACT

PADIM, Estevão Terminiello. **Variable Input Impedance Preamplifier**. 2022. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2022.

In this work presents a preamplifier that allows the variation of the input impedance of the circuit, so it can improve the voltage gain and the distortion of the audio acquired by the microphones. The circuit will be simulated in OrCAD software, validating the circuit for input impedance variation.

Keywords: Preamplifiers; Project Variable input impedance.

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.
AOP	Amplificador Operacional.
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.</i>
JFET	Junção Transistor de Efeito de Campo.
TBJ	Transistor Bipolar de Junção.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 Justificativa.....	7
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Objetivo Geral	8
1.2.2 Objetivos Específicos.....	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 MICROFONES	9
2.1.1 Microfones Dinâmicos	9
2.2 AMPLIFICADORES OPERACIONAIS.....	10
2.2.1 Ganho de Tensão de Amplificador	10
2.2.2 Resistência de Entrada e Resistência de Saída de um Amplificador	11
2.2.3 Resposta em frequência (BW)	13
2.2.4 Alimentação dos AOPs.....	13
2.2.5 Curva de Resposta em Malha aberta e em Malha Fechada	14
2.2.6 Slew-Rate	15
2.2.7 Saturação.....	17
2.2.8 Ruído	17
2.2.9.1 Cálculos dos Ruídos de um AOP	18
2.2.10 Circuitos Lineares Básicos dos AOPs	19
2.2.10.1 Amplificador Inverso	19
2.2.10.2 Amplificador não-Inverso.....	21
2.2.10.3 Seguidor de Tensão (<i>Buffer</i>).....	22
2.2.10.4 Amplificador Diferencial	22
2.2.10.5 Razão de Rejeição de modo comum (CMRR)	24
2.2.10.6 Amplificador de sinais CA em AOPs	24
3 TRABALHO E CÁLCULOS	25
3.1 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO	25
3.1.1 Projeto e Dimensionamento dos Elementos do Circuito Proposto	27
3.1.1.1 Cálculos e Análises dos AOPs	27
4 SIMULAÇÃO.....	32
4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	32
5 CONFECÇÃO	38

5.1 CONFECÇÃO DA PCB.....	38
5.2 DIAGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	41
5 RESULTADOS.....	42
5.1 Ganho do Pré-amplificador e Resposta em Frequência.....	42
6 CONCLUSÃO	46
7 REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Desde a Grécia Antiga, a mais de dois mil anos atrás, os gregos lançaram as bases da acústica com a construção dos grandes teatros, muitos dos quais existem ainda hoje. Uma característica marcante desses teatros é a maneira com que o vento, comum daquela região, passa por eles, de forma a levar as ondas sonoras geradas dentro do teatro em direção ao público. Além disso, é comum encontrarmos nestes teatros uma parede atrás do palco, e esta tinha por função refletir as ondas sonoras e impulsioná-las de volta ao público (BARROS, 2019).

Desde que surgiu a necessidade de amplificar o som, temos buscado, ao longo de séculos, meios para que isso fosse possível. Com o avanço tecnológico nos últimos cem anos, que proporcionou, por exemplo, a criação de válvulas e dos semicondutores, a amplificação sonora foi se tornando cada vez mais fácil, e se tornou, finalmente, uma realidade em nossos dias (BARROS, 2019).

A partir da fabricação em massa de amplificadores e pré-amplificadores, a indústria, por meio de mecanismos seletivos do próprio mercado, tem considerado a qualidade e a praticidade de um produto como uns dos fatores indispensáveis para a sua comercialização, o que proporciona uma melhor experiência ao consumidor final.

Com o objetivo de melhorar a qualidade do sinal da fonte, sendo ela um microfone ou uma captação de alta impedância de saída, extraindo o máximo deles sem prejudicar os equipamentos captadores, são utilizados pré-amplificadores que disponibilizam e conduzem a adequação destes sinais para uma mesa de som.

No âmbito de aplicação de áudio profissional há uma certa dificuldade em adequar o sinal da fonte, principalmente em microfones, para obter-se um sinal de qualidade e expressar bem todas as faixas de frequência audíveis com baixa distorção. Assim, para a melhor adequação dos sinais de entrada, é utilizado um circuito pré-amplificador de áudio que extrai com fidelidade o áudio dos microfones sem danificá-los e com a menor distorção possível.

Os microfones dinâmicos, que serão comentados ao longo do trabalho, têm características capacitivas, por isso, associa-se a este microfone um circuito amplificador ou mesas de som, para extrair o máximo possível de informação deste microfone, logo, estes circuitos amplificadores ou mesas de som possuem uma impedância média de entrada alta, variando de $5\sim 10k\ \Omega$ de acordo com o site oficial

da BEHINGER. O fato de os microfones dinâmicos apresentarem características capacitivas faz com que a associação dos componentes eletrônicos da saída do microfone capacitivo e a entrada do circuito amplificador formem um filtro passa alta, podendo ocorrer assim a perda de algumas frequências, gerando distorções no som e até mesmo perda de ganho. Os microfones dinâmicos utilizados para vocal têm impedância de saída de $600\ \Omega$ e é recomendado pelo fabricante do microfone que a impedância da carga destes microfones sejam de $2\ k\Omega$ conforme o site oficial da AKG. Dessa forma, para uma mesa comum com entrada de $5\sim 10\ k\ \Omega$ conforme citado anteriormente, o consumidor não conseguirá extrair um áudio fiel ao instrumento, podendo haver atenuações em determinadas frequências e distorções indesejáveis. O técnico de áudio, neste caso, terá problemas com a equalização, pois não será possível ajustar as frequências desejadas sem haver distorções.

Dessa forma, esse trabalho abordará com mais detalhes técnicos uma maneira de atenuar estes fatores ao consumidor que, em busca de qualidade e excelência, estão sujeitos quando na utilização de tais equipamentos.

1.1 Justificativa

Em muitas ocasiões como shows, palestras e eventos, que demandam um sistema de amplificação de som para atender um grande público, há problemas no momento da conexão do captador de som com a mesa de som, e muitas das vezes a necessidade do músico ou apresentador não é atendida.

Cada microfone há uma impedância de entrada ideal para a extração de seu potencial. Logo, como vimos que a impedância de entrada das mesas digitais gira em torno de $10\ k\ \Omega$, temos alguns problemas com distorções em regiões de frequências médias e agudas por causa do aumento de ruído resistivo já na entrada da amplificação do sinal. Assim, quando o técnico de som tenta extrair volume do microfone, percebe que essa distorção não está sendo ocasionada pelo ganho de tensão, e sim pela impedância de entrada da mesa digital. Neste contexto, o técnico, com o intuito de contornar esta limitação, obrigasse a utilizar algum outro dispositivo que forneça um adequado casamento de impedância entre o microfone e a mesa de

som. Desta forma, o técnico de som poderá adicionar ganho a este microfone sem que haja grandes problemas com distorções da real fonte sonora.

Na intenção de melhorar esta conexão e apresentar um áudio fiel ao instrumento, o presente trabalho busca elaborar um pré-amplificador de impedância ajustável, sendo este o responsável por adequar os sinais de entrada na mesa de som e melhorar a qualidade destes sinais. Ao mesmo tempo em que este trabalho se propõe a apresentar uma solução a um problema técnico, ele oferece praticidade ao músico ou apresentador em relação ao seu próprio equipamento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho concerne da elaboração de um pré-amplificador de áudio com impedância de entrada ajustável, almejando-se que o mesmo seja de fácil utilização e compacto o suficiente para ser portátil.

1.2.2 Objetivos Específicos

A proposta deste trabalho tem como finalidade atender os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e compreender o funcionamento de microfones dinâmicos;
- Estudar e realizar uma revisão bibliográfica dos amplificadores classe A;
- Projetar e compreender casamentos de impedância entre microfones dinâmicos e circuitos amplificadores;
- Projetar circuitos pré-amplificadores para implementação em microfones dinâmicos;
- Analisar e compreender os estágios de amplificação de um amplificador;
- Analisar e comparar os resultados obtidos;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MICROFONES

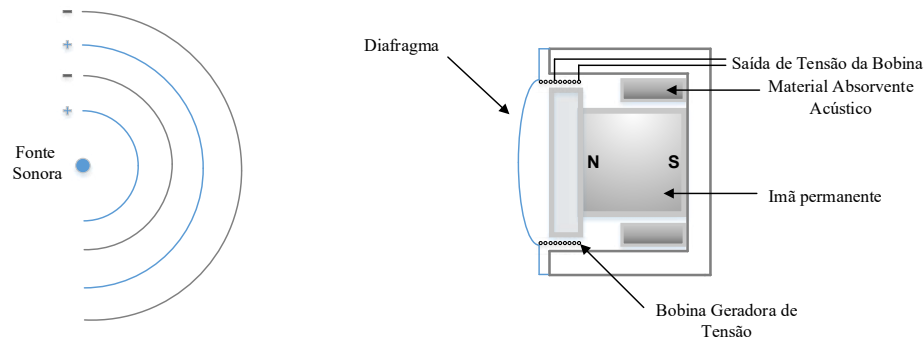
Inventado por David Hughes (1831-1900), o microfone é basicamente constituído por um transdutor que tem por finalidade transformar a energia acústica em energia elétrica. (SPADA, 2017). Há diversos tipos de microfones no mercado, sendo os mais conhecidos os microfones dinâmicos e condensadores. Os microfones dinâmicos são os mais utilizados em ambientes ao vivo, como shows e palestras, pois comumente ocasionam menos problemas com feedback nos palcos, sendo este o que será utilizado para este trabalho em questão.

2.1.1 Microfones Dinâmicos

Os microfones dinâmicos são os mais comuns do mercado, sendo estes de fabricação fácil e uma grande variedade de características eletroacústicas. Estes microfones expressos pela Figura 1, apresentam um diafragma, uma bobina móvel e um ímã permanente, formando um gerador elétrico de ondas sonoras em seus terminais da bobina (SPADA,2017).

O diafragma utiliza-se de uma membrana fina, resistente e elástica afim de suportar a pressão sonora e evitar deformidades no material e também evitar fadiga. Como este microfone é geralmente utilizado em sistemas ao vivo, é colocado um filtro de baixas frequências internamente chamado de “bass roll off” ou corte de baixas frequências. Este diafragma tem o propósito de vibrar na frequência da onda sonora incidente e assim variar o campo magnético gerando tensões alternadas na saída da bobina de acordo com a onda incidente na bobina (SPADA, 2017).

Figura 1 – Modelo de funcionamento de um microfone dinâmico.



Fonte: Adaptado de SPADA.

2.2 AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

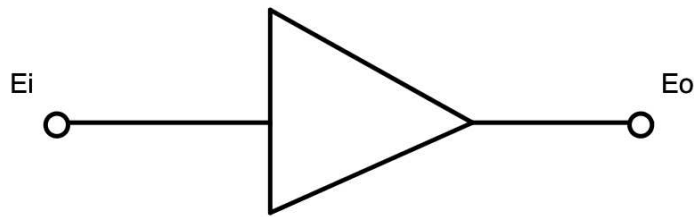
O OAP, amplificador operacional, é um amplificador CC multistágio com entrada diferencial, no qual as características se assemelham as das de um amplificador ideal. O OAP ideal tem características como: resistência de entrada infinita, resistência de saída nula, ganho de tensão infinito, resposta de frequência infinita e insensibilidade a temperatura (JUNIOR, 2003, p.17).

Os AOPs foram desenvolvidos na década de 40 e eram construídos com válvulas. Claramente eram bastante precárias as características desses primitivos AOPs. Contudo em meados de 1963, surgiu o primeiro AOP monolítico (CIRCUITO INTEGRADO) com o auxílio da entrada dos transistores no mercado. O primeiro AOP apresentava características bem diferentes das que são encontrados hoje, como: baixa impedância de entrada, baixo ganho, alta sensibilidade a ruídos, necessidade de alimentação positiva e negativa de valores diferentes, etc. Ao longo do tempo foram sendo criados novos AOPs com características mais próximas dos dispositivos atuais e, portanto, mais fáceis de trabalhar no ambiente do áudio (JUNIOR, 2013, p.18).

2.2.1 Ganho de Tensão de Amplificador

O ganho de tensão de amplificador resume-se em uma divisão entre a tensão de saída e a tensão de entrada do amplificador, representado pela figura a seguir.

Figura 2 – Modelo de um amplificador.



Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

Definiremos os seguintes parâmetros como:

E_i : sinal de entrada

E_o : sinal de saída

A_v : ganho de tensão

Assim, temos a equação 1:

$$A_v = \frac{E_o}{E_i} \quad (1)$$

Para encontrarmos a relação de ganho de tensão em decibéis entende-se que temos uma relação de potencia de saída e entrada:

$$A_v(dB) = 10 \log \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (2)$$

Substituindo as potencias de saída e entrada, tem-se:

$$A_v(dB) = 10 \log \frac{\frac{(V_{saída})^2}{R_{saída}}}{\frac{(V_{entrada})^2}{R_{entrada}}} \quad (3)$$

Reduzindo a equação 2, entendemos que o ganho de tensão é também expresso por:

$$A_v(\text{em decibéis}) = 20 \log \frac{E_o}{E_i} \quad (4)$$

Ou simplesmente:

$$A_v(\text{dB}) = 20 \log \frac{E_o}{E_i} \quad (5)$$

Justifica-se a utilização em decibéis (dB) quando são utilizados grandes valores para A_v . Amplificando representações gráficas de muitas grandezas que têm uma ampla faixa de variação.

2.2.2 Resistência de Entrada e Resistência de Saída de um Amplificador

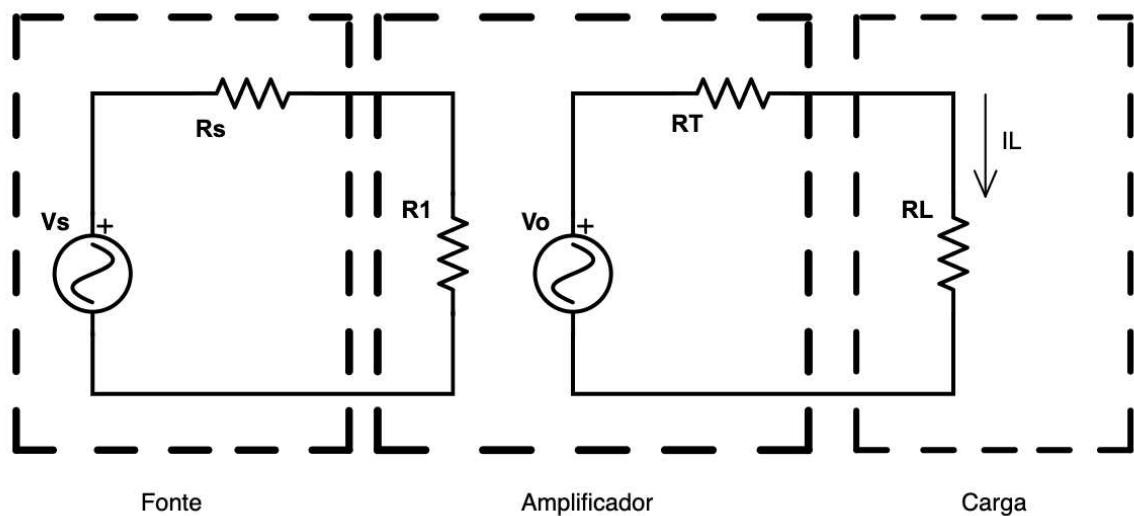
A Resistência elétrica de entrada e saída de um amplificador utilizando AOPs são muito importantes, pois as mesmas impactam, por exemplo, no ganho efetivo que um AOP pode oferecer. Assim sendo, tomemos o circuito apresentado por intermédio da figura 3, o qual é constituído por uma fonte de entrada V_s , pelo circuito equivalente de um amplificador operacional elementar e por uma carga R_L .

A partir do uso da lei de Kirchhoff das tensões chegasse a equação (4), a qual define o valor efetivo da tensão da fonte de entrada que realmente será amplificada pelo OAP. A partir da referida equação é possível deduzir que quanto maior for o valor da resistência de entrada (R_1) maior será a tensão aplicada à entrada do amplificador. Ao se considerar R_1 igual a infinito chegaremos à equação (5).

$$V_{R1} = \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_s} \quad (6)$$

$$V_{R1} = V_s \quad (7)$$

Figura 3 – Modelo de um amplificador em estágios.



Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

Por outro lado, considerando a saída do amplificador, pode-se deduzir que quanto menor for o valor de R_T maior será a amplitude do sinal aplicado à carga R_L . Logo, no cenário ideal, onde R_T possui resistência nula, a tensão de saída aplicada sobre a carga é definida por (6).

$$V_{R_L} = V_o \quad (8)$$

2.2.3 Resposta em frequência (BW)

A resposta em frequência de um amplificador operacional é muito importante para que o amplificador represente com fidelidade o sinal a ser amplificado. Quando estamos tratando de áudio e queremos amplificar sinais de sensores, como microfones que têm, comumente, um sinal elétrico muito baixo, por volta dos mili Volts, sabemos que a faixa de frequência atuante que utilizaremos estará entre 20Hz e 20kHz. Sendo assim, a resposta em frequência para este amplificador operacional deverá cumprir com o dever de amplificar sinais de pelo menos 20Hz a 20kHz sem grandes atenuações a longo desta faixa de frequência.

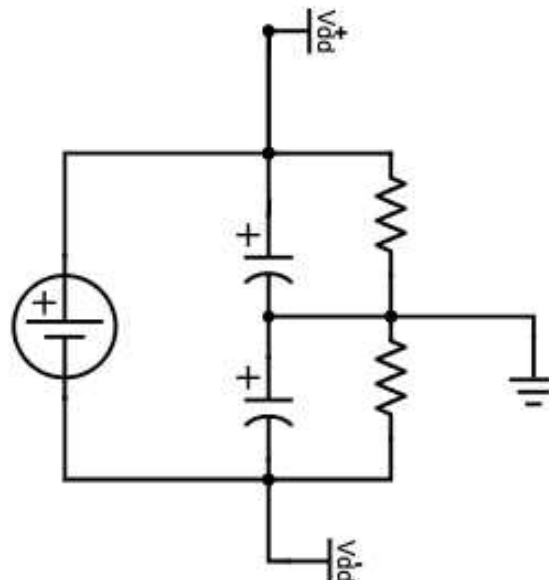
2.2.4 Alimentação dos AOPs

A alimentação de tensão dos amplificadores operacionais é crucial para atingir uma boa qualidade de amplificação. Caso a tensão de alimentação do amplificador seja ruidosa, isso irá automaticamente atingir a qualidade da saída amplificada do AOP.

Usualmente os amplificadores operacionais são projetados para conterem alimentação simétrica. Alguns AOPs possuem monoalimentação, a qual utiliza apenas uma tensão positiva ou negativa.

Quando não disposto de alimentação simétrica é possível aplicar fontes simples utilizando apenas uma fonte e transformando-a em simétrica, como é possível constatar por intermédio da figura 4. Com est fonte, cria-se um terra virtual e duas fontes, uma positiva e outra negativa, assim, podendo-se utilizá-la para a alimentação do amplificador operacional.

Figura 4 – Modelo de fonte comumente utilizado.



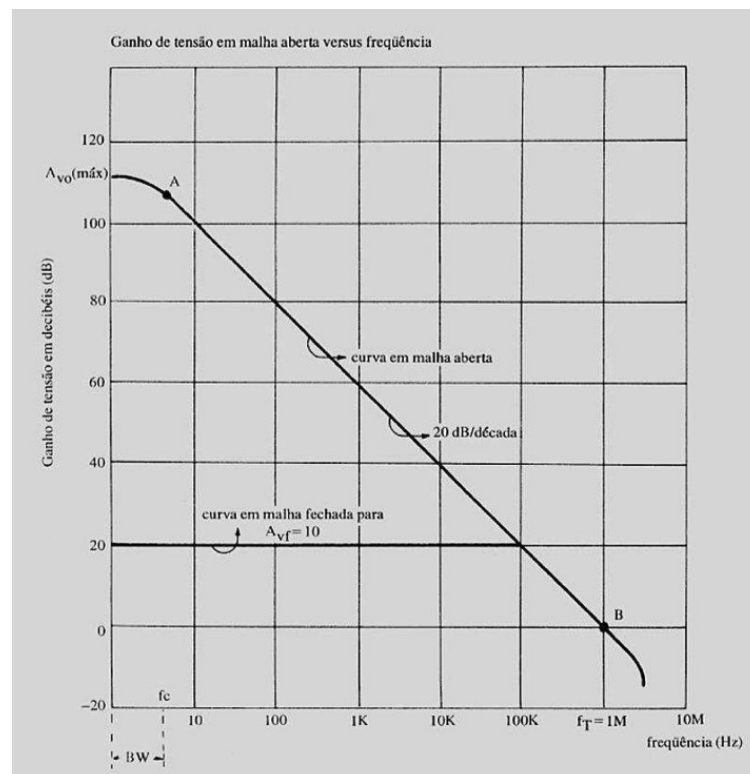
Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

2.2.5 Curva de Resposta em Malha aberta e em Malha Fechada

A curva de resposta em malha fechada e aberta é muito importante para um projeto de um amplificador. Com ela podemos identificar qual o melhor amplificador operacional para o projeto com base no f_t (largura de faixa de ganho unitário) do datasheet do AOP a ser utilizado.

A figura a baixo representa as curvas de ganho em malha aberta e fechada, pode-se identificar que do ponto A ao B representada pela curva de ganho em malha aberta, que temos uma curva decaindo 20dB por década após a frequência de corte de 5Hz, e que se torna impraticável o uso como amplificador com estas condições, pois tem-se uma BW muito curta para se trabalhar com AOPs como amplificadores. Mas abaixo também temos demonstrado em malha fechada com um ganho A_{vf} de 10 uma curva praticável para o meio do áudio representando estavelmente as frequências de 0 a 100kHz, sendo assim uma largura de banda ampla o suficiente para trabalhar com ganhos até 20 dB.

Figura 5 – Curvas de ganho de tensão em malha aberta e fechada.



Fonte: JUNIOR, 2003.

Há uma relação para a curva em malha fechada relacionada com o ganho e a largura de faixa. Assim temos:

$$PGL = A_{vf}BW = f_t \quad (9)$$

Onde:

PGL: produto ganho versus largura de faixa

BW: bandwidth.

Avf : ganho

ft: largura de faixa de ganho unitário

2.2.6 Slew-Rate

O *slew rate* (SR) é definido pela taxa máxima de variação de tensão da saída de um amplificador operacional por unidade de tempo. Sendo assim, quanto maior é esta proporção, melhor será este AOP.

Considerando um sinal senoidal na entrada de um AOP, este representará um sinal senoidal na saída representado por:

$$v_o = V_p \text{sen}(\omega t) \quad (10)$$

Sendo que V_p é a amplitude máxima ou o valor de pico do sinal de saída. Temos que a definição de SR é:

$$SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\text{Máxima}} \quad (11)$$

Logo:

$$SR = V_p \left. \frac{\omega \cdot \text{cosen}(\omega t)}{1} \right|_{\omega t = 0} \quad (12)$$

$$SR = V_p \cdot \omega \quad (13)$$

Assim,

$$SR = 2\pi f V_p \quad (14)$$

Isolando a frequência:

$$f = \frac{SR}{2\pi V_p} \quad (15)$$

A equação (13) nos diz qual a frequência máxima esse AOP poderá representar em sua saída sem grandes distorções. Sendo assim, para projetos envolvendo áudio é de muita valia obter um amplificador operacional com o maior valor de SR possível para não degradar o sinal elétrico na saída do amplificador.

2.2.7 Saturação

A saturação do amplificador operacional é muito importante para o projeto de um amplificador, pois nela é quando temos a máxima tensão de saída do amplificador. Experimentalmente, a saturação ocorre próximo do valor de alimentação V_{cc} do amplificador operacional, como exemplo, se alimentarmos um amplificador com $\pm 15V$, a saída positiva atingirá uma saturação próxima de 14V de pico e uma saturação negativa em -14V de pico. Por fim, podemos considerar que a região entre a tensão de 0 a aproximadamente V_{cc} é a região de operação linear dos AOPs, para a maioria dos amplificadores operacionais, mas em alguns casos esta diferença poderá ser muito maior.

2.2.8 Ruído

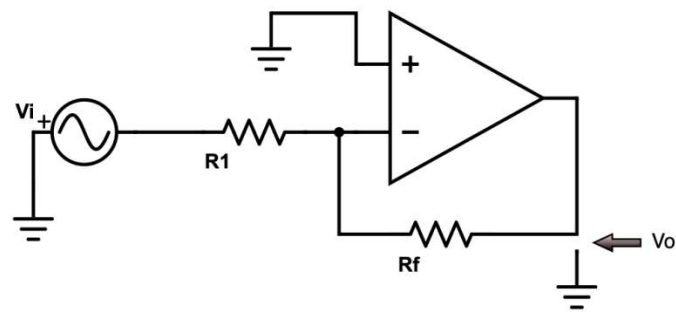
Para um projeto utilizando amplificadores operacionais é de crucial importância a não existência de ruídos na saída do amplificador, pois são sinais indesejáveis que podem acontecer por erros de projeto. Algumas das fontes de ruído são: motores elétricos, descargas atmosféricas, radiações eletromagnéticas e etc. Uma boa prática em projetos com AOPs é um bom aterramento utilizando-se também do princípio da gaiola de Faraday para isolamento de radiações eletromagnéticas, como, por exemplo, a própria rede elétrica emitindo radiações eletromagnéticas com uma frequência de 60Hz.

Uma das melhores proteções contra ruídos são capacitores inseridos entre o terra e os pinos do CI de alimentação. Estes capacitores oferecem passagem para correntes parasitas e eliminam ruídos de alta frequência no sistema e consecutivamente na saída do amplificador. Para obter o melhor resultado na filtragem destes ruídos, estes capacitores deverão ser colocados o mais próximo possível do CI.

2.2.8.1 Cálculos dos Ruídos de um AOP

Alguns ruídos são ocasionados não apenas por descargas atmosféricas ou interferências externas ao circuito, também há ruídos significantes ocasionado por ruídos de corrente, ruídos de tensão e ruídos resistivo. As somas desses três tipos de ruídos são variáveis que podem ser controlados pelo projetista do amplificador.

De acordo com Matt Duff, o cálculo que é utilizado para os ruídos resistivos corresponde a $4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ para cada $1\text{k}\Omega$ acompanhado do ganho de tensão aplicado no resistor. Por exemplo, na figura 6, em uma aplicação inversora, R2 se sobressaía a R1 por causa do ganho aplicado em R2.

Figura 6 – Modelo amplificador inversor.

Fonte: Adaptado de Analog Devices, Inc.

Logo temos que o ruído em cada resistor é representado pela equação abaixo:

$$Noise_R = A_p \cdot \sqrt{R} \cdot 4nV / \sqrt{Hz} \quad (16)$$

Assim, é possível calcular a quantidade de ruído injetado na saída por cada elemento resistivo no sistema, entende-se também que quanto maior o valor dos resistores utilizados, maior será o ruído de origem resistiva no sistema.

Há também os ruídos de corrente gerados pela corrente de entrada do amplificador operacional. De acordo com Matt Duff, os ruídos de corrente são calculados pela corrente de entrada multiplicada pela soma dos resistores do amplificador operacional, tal como defino em (15).

$$Noise_I = I_{in}(R_1 + R_2) \quad (17)$$

Os ruídos relacionados a tensão do sistema encontra-se no datasheet do amplificador e ele é multiplicado pelo ganho do amplificador operacional, representado pela equação abaixo:

$$Noise_V = V_{noise} A_p \quad (18)$$

2.2.9 Circuitos Lineares Básicos dos AOPs

Os circuitos lineares aplicados em amplificadores operacionais são todas as configurações utilizadas como amplificador. A análise em AOPs é muito simples quando o AOP é considerado ideal. Todavia, na prática, pelo fato de haver limitações intrínsecas dos dispositivos, os resultados não são ideais, sendo assim, há a necessidade de se elaborar um projeto adequado para que os amplificadores operem de maneira satisfatória.

2.2.10 Amplificador Inversor

O circuito do amplificador inversor, como seu próprio nome sugere, temos uma inversão do sinal na saída do amplificador, ou seja, o sinal de saída tem uma defasagem de 180° em relação ao sinal de entrada. A seguir é mostrado pela figura 7 a configuração inversora do AOP.

Aplicando as leis das correntes de Kirchhoff na entrada negativa, temos:

$$I_1 + I_f = I_{B1} \quad (19)$$

Supondo que o AOP é ideal, então temos:

$$I_{B1} = 0 \quad (20)$$

Logo:

$$\frac{v_i - v_a}{R_1} + \frac{v_o - v_a}{R_f} = 0 \quad (21)$$

Por outro lado, o ponto “a” é um terra virtual, ou seja:

$$v_a = 0 \quad (22)$$

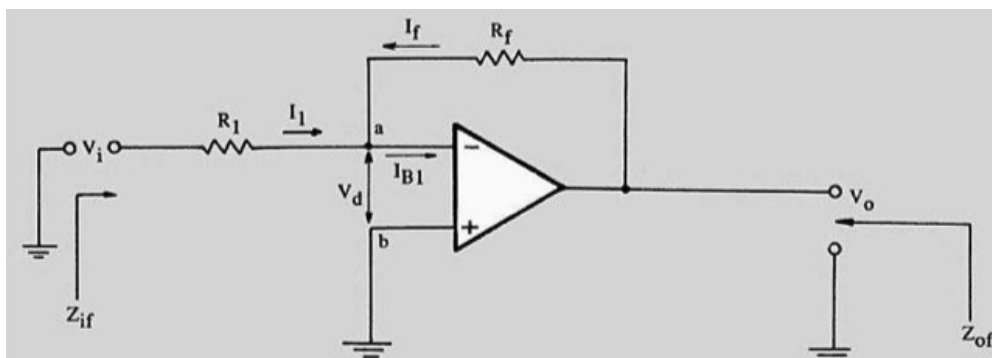
Então, substituindo $v_a = 0$ temos:

$$\frac{v_i}{R_1} + \frac{v_o}{R_f} = 0 \quad (23)$$

Assim, obtemos a relação de ganho desta configuração (22).

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (24)$$

Figura 7 – Modelo de amplificador inversor.



Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

Uma desvantagem deste amplificador é de que sua impedância é apenas expressa pelo valor de R_1 (JUNIOR, 2003).

2.2.11 Amplificador não-Inverso

O amplificador não-inversor como seu próprio nome sugere, não há inversão de fase na saída de amplificação do AOP. A configuração não inversora está expressa pela figura 8.

Analisando o amplificador não-inversor e aplicando as leis de Kirchhoff, temos:

$$\frac{0-v_a}{R_1} + \frac{v_o-v_a}{R_f} = 0 \quad (25)$$

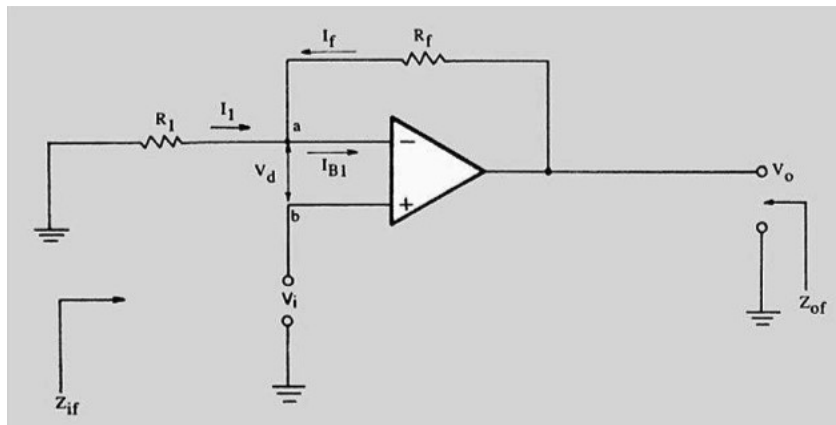
Temos na equação anterior que $v_b = 0$ e $v_a = v_i$, logo:

$$-\frac{v_i}{R_1} + \frac{v_o-v_i}{R_f} = 0 \quad (26)$$

Ou seja:

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (27)$$

Figura 8 – Modelo de amplificador não-inversor.



Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

2.2.11 Seguidor de Tensão (*Buffer*)

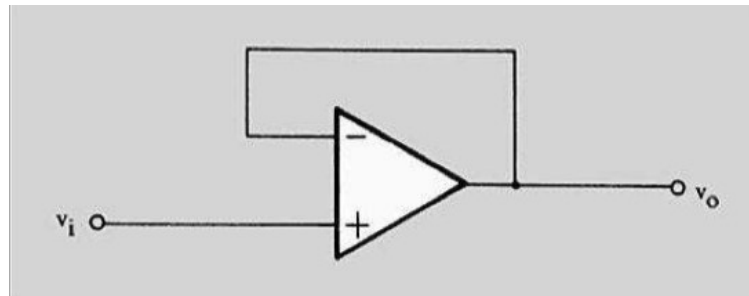
A configuração seguidor de tensão tem a função de “passar um sinal de um lugar para outro” sem haver nenhuma atenuação ou amplificação de sinais, e tem diversas aplicações como isolador de estágios, reforçador de corrente, casador de impedância e etc, sua configuração está disposta pela figura 9.

Considerando no amplificador não-inverso o $R_1 = \infty$ e $R_f = 0$, temos:

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = 1 \quad (28)$$

Assim, teremos o ganho teórico sempre unitário, que origina assim a configuração seguidor de tensão ou buffer.

Figura 9 – Modelo de amplificador seguidor de tensão.



Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

2.2.12 Amplificador Diferencial

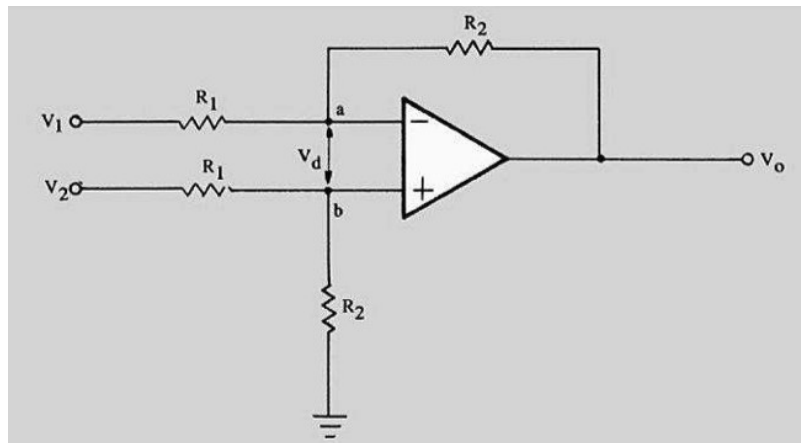
A configuração do amplificador diferencial, a qual é apresentada por meio da figura 9, é de grande importância nos pré-amplificadores de áudio, pois tem como principal função a subtração da entrada inversora e não inversora do AOP, esta configuração possui inúmeras aplicações na área de instrumentação, pois reduz os ruídos de modo comum.

Aplicando a lei de Kirchhoff no ponto a da figura 9 que representa o amplificador diferencial, temos:

$$\frac{v_2 - v_a}{R_1} + \frac{v_o - v_a}{R_2} = 0 \quad (29)$$

Aplicando LCK no ponto b, temos:

Figura 10 – Modelo de amplificador diferencial.



Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

$$\frac{v_2 - v_b}{R_1} + \frac{v_b}{R_2} = 0 \quad (30)$$

Isolando v_b , temos:

$$v_b = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_2 \quad (31)$$

Substituindo a equação (29) na equação 28, tem-se:

$$\frac{v_2 - \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot v_2}{R_1} + \frac{v_o - \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot v_2}{R_2} = 0 \quad (32)$$

E obtemos dessa forma que:

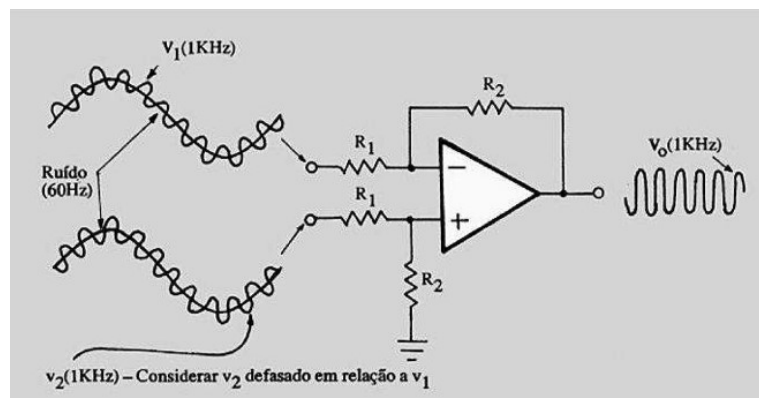
$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) \quad (33)$$

2.2.13 Razão de Rejeição de modo comum (CMRR)

A partir da equação (31) pode-se constatar que se $v_o = 0$ teremos, portanto, $v_2 - v_1 = 0$, logo, entende-se que este circuito (figura 9) é um subtrator das entradas do AOP.

Como exemplo temos a figura 10, que representa um amplificador diferencial com duas fontes de tensão fluindo sinais de 1kHz, sendo um deles defasado de 180°, mas em ambos sinais tem-se um ruído de 60Hz sem defasagem. Nota-se que este ruído não está presente na saída do AOP, isto é devido ao amplificador diferencial, no qual rejeita sinais iguais. Essa rejeição de modo comum é mais conhecida como CMRR nos *datasheets* dos AOPs.

Figura 11 – Modelo de amplificador diferencial.



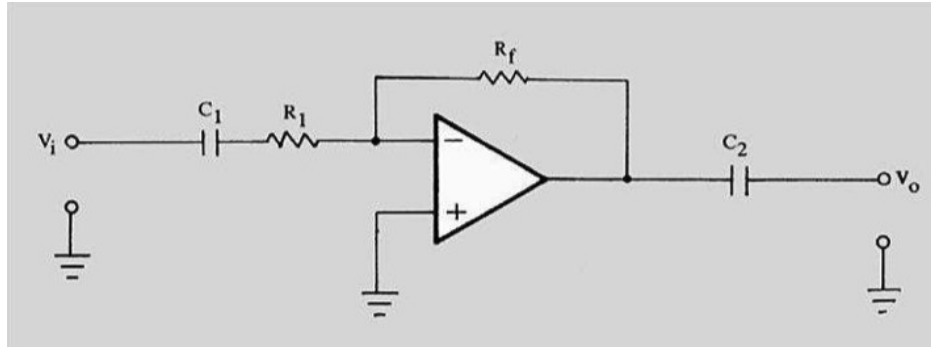
Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

2.2.14 Amplificador de sinais CA em AOPs

Em algumas ocasiões é bem comum amplificar sinais CA, no qual se torna necessário bloquear sinais de componentes CC para amplificar apenas a componente alternada.

Para se obter um amplificador CA, basta adicionar os capacitores $C1$ e $C2$ na entrada e a saída do amplificador como mostrado a figura 11. O mesmo também pode ser feito para o amplificador não inversor.

Figura 12 – Modelo de amplificador inversor.



Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2003.

Adotamos como regra de projeto um valor de **R₁** 10 vezes maior que **X_c**. Para que não apresente reatâncias significativas à passagem do sinal CA. Logo:

$$R_1 \geq \frac{10}{2\pi f C_1} \quad (34)$$

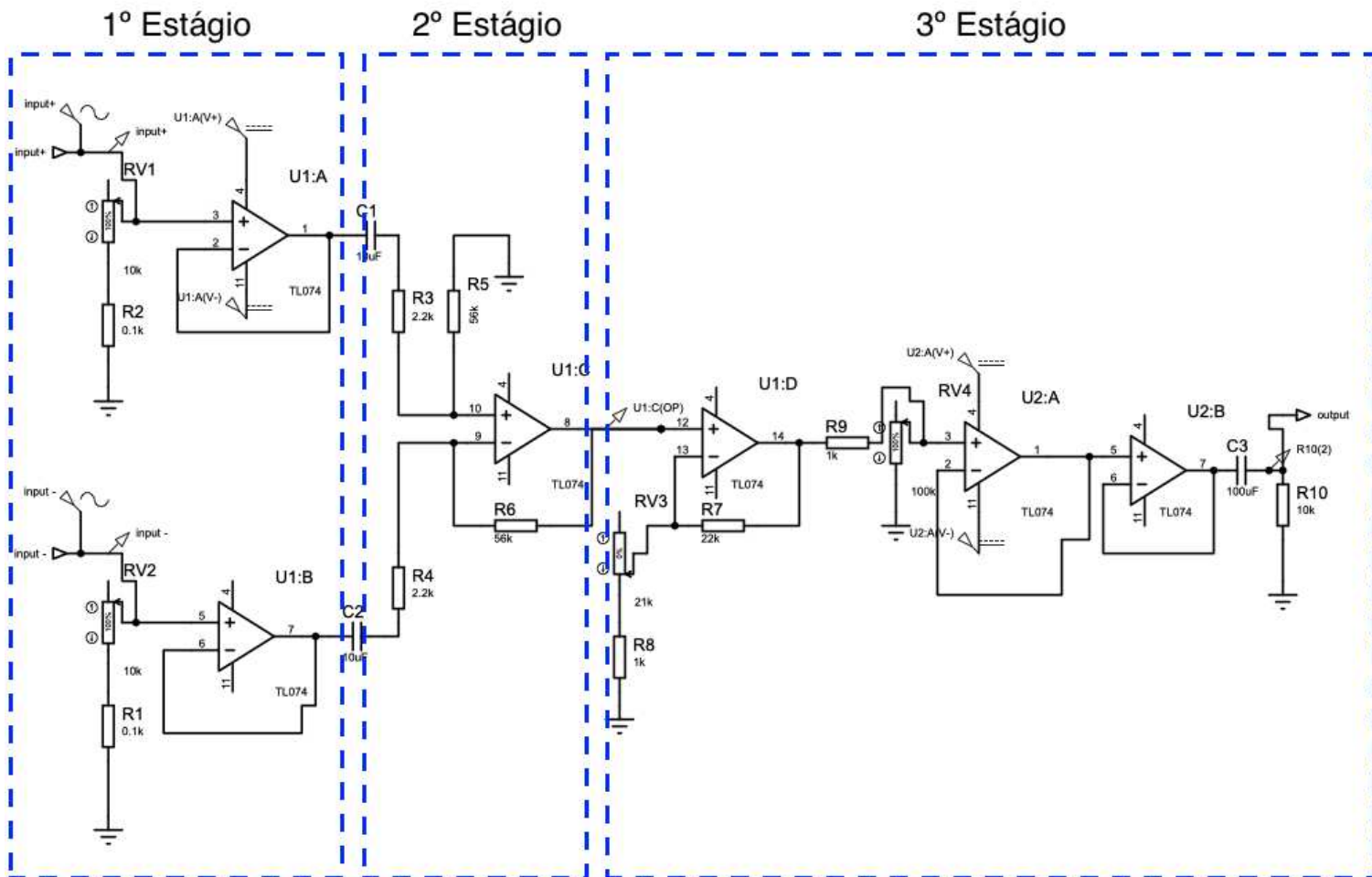
3 TRABALHO E CÁLCULOS

A presente sessão tem por finalidade apresentar o circuito eletrônico do pré-amplificador proposto, bem como também, expor os resultados de simulação e os resultados experimentais do referido circuito.

3.1 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO

Tal como relatado anteriormente, a proposta do trabalho é desenvolver um dispositivo pré-amplificador portátil e que possa ter uma impedância de entrada Ajustável. A Figura 13 mostra o esquemático do circuito proposto.

Figura 13 – Esquemático proposto.



Fonte: Autoria Própria.

O circuito apresenta no estágio de entrada dois AOPs com a configuração não-inversora. Como os microfones dinâmicos possuem sinais de saída muito baixos, é necessário que os circuitos pré-amplificadores apresentem um ganho relativamente alto comparado ao sinal de entrada. Se o sinal de entrada estiver distorcido, o sinal na saída do pré-amplificador sairá com uma distorção com proporções muito maiores do que a quando comparado à entrada. Assim, os componentes do estágio de entrada precisam ser de baixa distorção harmônica e de adequada precisão. A ideia de se utilizar dois AOPs na entrada é a de conseguir ter uma impedância de entrada

ajustável e com uma baixa distorção utilizando a configuração não-inversora com um resistor ajustável na entrada com um ganho unitário, assim, não teremos problemas com diferenciação do lado positivo e negativo ao ajustar a resistência de entrada.

Após o estágio de variação da impedância de entrada, os dois sinais são somados por um amplificador operacional com configuração de amplificador diferencial. O ganho aplicado aos amplificadores desrespeito a uma pré-amplificação, pois este sinal ainda será amplificado ao ser inserido a uma mesa de som. Foi escolhido um ganho final próximo ao da entrada de uma mesa de som para assim, garantir que qualquer microfone poderá ser amplificado.

Um dos sinais é colocado na entrada inversora e outra na não-inversora, com um ganho A_d de 25. Como um dos sinais é negativo, o AOP irá invertê-lo e assim soma-se os dois sinais, tanto o negativo como o positivo, tendo na saída do AOP um sinal amplificado 50 vezes em relação ao sinal de entrada do AOP, este ganho é um valor padrão utilizado na entrada do desbalanceamento do sinal, mas não é um padrão comumente utilizado, e servirá como um ganho estático de entrada pelo fato de ter uma impedância de entrada variável, podendo assim diminuir a magnitude da obtenção do sinal na entrada do instrumento captador a ser amplificado. O ruído de modo comum adquirido ao longo do caminho até a entrada do pré-amplificador é severamente atenuado, como já foi mencionado na seção de CMRR, representando assim o estágio de balanceamento e amplificação.

O terceiro estágio está relacionado a manter a tensão de saída do pré-amplificador com um ganho suficiente para poder ser conectado a uma mesa de som em uma entrada não balanceada. Neste estágio, o usuário terá o controle em suas mãos do ganho do pré-amplificador, assim, pode-se controlar também a qualidade do sinal que será enviado para o próximo estágio.

No quarto estágio temos o volume, que é basicamente um divisor de tensão ligado a um AOP com a configuração de buffer e então temos uma relação de 1% a 100% de volume. Logo em seguida temos um outro AOP ligado como buffer e um resistor de proteção na saída deste AOP.

3.1.1 Projeto e Dimensionamento dos Elementos do Circuito Proposto

Para realizar a escolha do amplificador operacional é necessário levar em conta algumas especificações de construção do amplificador operacional. Como CMRR, *slew rate*, ruído, impedância de entrada, resposta em frequência, distorção harmônica, consumo de energia, tensão de alimentação e etc.

3.1.1.1 Cálculos e Análises dos AOPs

Para este projeto em específico optou-se pela escolha do amplificador operacional TL074, pelo motivo dos indicadores do dispositivo serem favoráveis a sua aplicação com sinais de áudio e ruídos reduzidos, também por ter um *slew rate* suficiente para ser utilizado em áudio, além de apresentar uma rejeição de modo comum elevada.

Para começo do projeto, além da escolha do amplificador operacional, é necessário fazer o cálculo utilizando a largura de faixa unitária encontrada no *datasheet* do AOP.

A seguir tem-se o cálculo da BW utilizando-se da equação 7 e isolando BW, considerando o maior ganho dos amplificadores de 25 vezes e também $f_t = 3\text{MHz}$, temos BW calculado pela equação 33, a seguir:

$$BW = \frac{3\text{MHz}}{25} = 120\text{kHz} \quad (35)$$

Logo, entende-se que será possível utilizar este amplificador operacional pelo fato da banda ser maior que 20kHz, que é a máxima frequência audível.

Em seguida tem-se o cálculo do *slew rate*, representado pela equação 13. Considerando que o *slew rate* do TL074 é de $13\text{V}/\mu\text{s}$ e que a maior tensão de pico a pico em sinais de áudio é de aproximadamente 3V de acordo com o *datasheet* da *fast trackpro M-AUDIO*, interface de áudio utilizada para adquirir os dados dos resultados deste trabalho, temos que a frequência utilizável será de:

$$f = \frac{13\text{V}/\mu\text{s}}{2.\pi.3} = 689,67\text{kHz} \quad (36)$$

Como temos que $f = 689,67\text{kHz}$, sabe-se que o amplificador operacional conseguirá replicar o sinal de entrada na saída do amplificador com facilidade.

A partir da folha de dados do AOP escolhido pode-se verificar que o mesmo pode ser alimentado com uma tensão de até $\pm 18\text{V}$. Então, foi escolhido uma tensão de operação de $\pm 4,5\text{V}$, pois utilizaremos por convenção fontes de 9V para alimentação deste circuito, pois é o que usualmente utilizado para pré-amplificadores e pedais de efeito em geral. Como o AOP escolhido necessita de uma fonte simétrica demonstrado pela figura 2, foi utilizado um modelo de fonte com base em um divisor de tensão, criando o polo negativo e positivo, utilizando dois resistores de $10\text{k}\Omega$. Assim, também se evita de saturar o sinal, pois o maior pico de tensão possível para áudio é de 3V *datasheet* da *fast trackpro*, que esta bem abaixo de $4,5\text{V}$.

Para o primeiro estágio foi utilizado um amplificador na configuração buffer. Em razão de precisarmos de uma impedância de entrada ajustável foi adicionado um potenciômetro estéreo, ou seja, que varia a resistência igualmente de ambos os lados. Assim, foi possível variar a resistência de entrada do pré-amplificador.

Em seguida, tem-se o segundo estágio, que foi utilizado da configuração de amplificador diferencial. Este estágio tem-se um ganho basal do pré-amplificador de 25 vezes para cada sinal, totalizando 50 vezes, pois soma-se os dois sinais. Utilizando a equação 22 e 25, temos os cálculos para o ganho de tensão deste estágio. Foi utilizado resistores com valores comerciais mais próximos do que foi projetado.

$$A_{vf} = 2 \frac{56k}{2.2k} = 50.90 \quad (37)$$

Para o terceiro estágio de amplificação temos o ganho de tensão variável, onde o usuário poderá variar o ganho do pré-amplificador. Foi utilizado nesta etapa a configuração não inversora, com um potenciômetro R1 associado a R1min, para que o ganho não passe de um certo valor para que não atinjamos a saturação neste estágio. A seguir tem-se os cálculos, utilizando-se da equação 25. Foi utilizado para R2, $22\text{k}\Omega$, e para R1, $1\text{k}\Omega$.

$$A_{vf} = 1 + \frac{22k}{1k} = 23 \quad (38)$$

Logo em seguida, temos o circuito responsável pelo volume do pré-amplificador, que idealmente não deveria existir para não haver perda de sinal na saída do pré-amplificador, mas foi colocado pela necessidade do controle do usuário, por motivos deste pré-amplificador poder ser ligado em outros dispositivos desconhecidos, assim, facilita o usuário a não saturar a entrada do dispositivo subsequente. Para este circuito foi utilizado um divisor de tensão na entrada positiva do amplificador operacional com um resistor de $1k\Omega$ e um potenciômetro de $100k\Omega$. Assim, com esta diferença de potência, a perda de sinal será mínima e foi utilizado a configuração de buffer.

Para o ultimo circuito seguindo, foi adicionado um buffer, e na saída deste AOP, um resistor de 100Ω , com a finalidade de evitar possíveis curto-circuito com o terra por vias externas ao pré-amplificador. Logo, para o circuito completo temos um ganho de tensão total igual a 559,9 vezes.

3.1.1.1 Cálculos de Ruídos nos AOPs

Em relação aos ruídos, foi utilizado o menor valor de resistor possível para diminuir os ruídos de tensão e também de corrente do sistema. Foi utilizado às equações 14, 15 e 16, para os cálculos de ruídos a seguir.

Para o primeiro estágio do pré-amplificador, temos apenas ruídos de tensão e corrente, pois não há amplificação neste primeiro estágio. Considerando que a corrente de entrada do TL074 = $0,01 \text{ pA}$, logo temos que o ruído de corrente é de:

$$Noise_I = 0,01 \cdot 10^{-12} \cdot 10k = 0,1nV/\sqrt{Hz} \quad (39)$$

Para o ruído de tensão, como não temos amplificação neste estágio o ruído de tensão será o mesmo do próprio amplificador operacional.

$$Noise_v = 18nV/\sqrt{Hz} \quad (40)$$

Assim, para o primeiro estágio temos praticamente o próprio ruído de tensão do amplificador operacional, totalizando **18,1nV/√Hz**.

Para o cálculo de desbalanceamento tem-se os três tipos de ruídos, tensão, corrente e resistência. A seguir os cálculos considerando $R_2 = R_4 = 56k\Omega$ e $R_1 = R_3 = 2.2k\Omega$ e o ganho de tensão igual a 50,90.

$$Noise_I = 0,01.10^{-12}.(2,2k + 2,2k).50,90 = 2,24nV/\sqrt{Hz} \quad (41)$$

$$Noise_v = 18.50,90 = 916nV/\sqrt{Hz} \quad (42)$$

$$Noise_{r1 e r3} = 2.25,45.\sqrt{2,2k}.4nV = 9549,70nV/\sqrt{Hz} \quad (43)$$

$$Noise_{r2 e r4} = 2.\sqrt{56k}.4nV = 1893,14nV/\sqrt{Hz} \quad (44)$$

Logo em seguida tem-se mais um estágio de ganho, no qual o ganho deste estágio é de:

$$Noise_{r10} = 23.\sqrt{1k}.4nV = 2909,30nV/\sqrt{Hz} \quad (45)$$

$$Noise_{r12} = 1.\sqrt{22k}.4nV = 593,30nV/\sqrt{Hz} \quad (46)$$

$$Noise_I = 0,01.10^{-12}.(1k).23 = 23nV/\sqrt{Hz} \quad (47)$$

$$Noise_v = 18nV.23 = 414nV/\sqrt{Hz} \quad (48)$$

Para o próximo estágio não temos ganho, pois estamos utilizando uma configuração tipo buffer e um divisor de tensão na entrada positiva do AOP. Logo temos os cálculos de ruído.

$$Noise_{r_{13} e r_{14}} = 1 \cdot \sqrt{101k} \cdot 4nV = 1271,21nV/\sqrt{Hz} \quad (49)$$

$$Noise_I = 0,01 \cdot 10^{-12} \cdot (101k) = 1,01nV/\sqrt{Hz} \quad (50)$$

$$Noise_v = 18nV \cdot 1 = 18nV/\sqrt{Hz} \quad (51)$$

Para o ultimo estágio, teremos apenas um buffer, logo só teremos o ruído de tensão neste estágio.

$$Noise_v = 18nV \cdot 1 = 18nV/\sqrt{Hz} \quad (52)$$

Somando todos os ruídos do sistema temos:

$$\begin{aligned} Noise_{total} &= 18,1n + 2,24n + 916n + 9549,70n + 1893,14n + 2909,30n + 593,30n \\ &+ 23n + 414n + 1271,21n + 1,01n + 18n + 18n = 17627nV/\sqrt{Hz} \end{aligned} \quad (53)$$

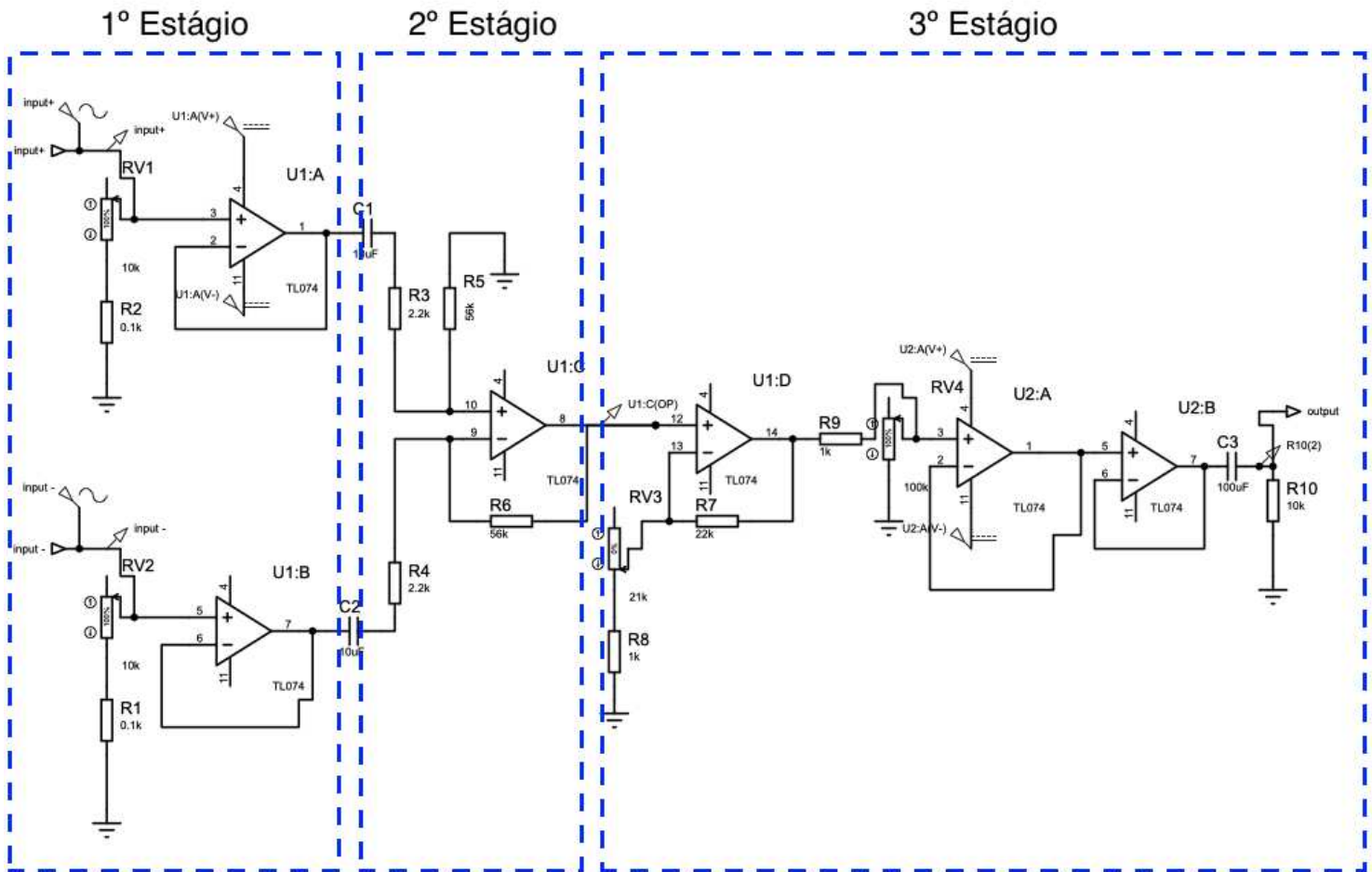
4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Com a finalidade de validar o projeto teórico desenvolveu-se uma simulação numérica a partir do software Protheus®, sendo que o mesmo permite realizar simulações de componentes de amplificação ligados em série e a medição destes simultaneamente. Para o tratamento dos dados, foi gerado uma tabela e plotado os gráficos com base na base de dados gerada pelo software Protheus®.

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Abaixo encontra-se o esquemático do sistema simulado representado pela figura 13. Ele contém as entradas do sistema representado pelo 1º estágio com sinais de entrada V_{pp} igual a 4mV, sendo que uma das entradas tem sinal invertido. Em seguida tem-se os potenciômetros na entrada dos primeiros dois AOPs para fazer a função de impedância variável ainda no 1º estágio. Em seguida tem-se o balanceamento dos sinais representado pelo 2º estágio. No começo do terceiro estágio tem-se o ganho de tensão variável representado pelo primeiro AOP e em seguida há o volume variável representado pelo segundo AOP do 3º estágio, finalizando com um AOP seguidor de tensão.

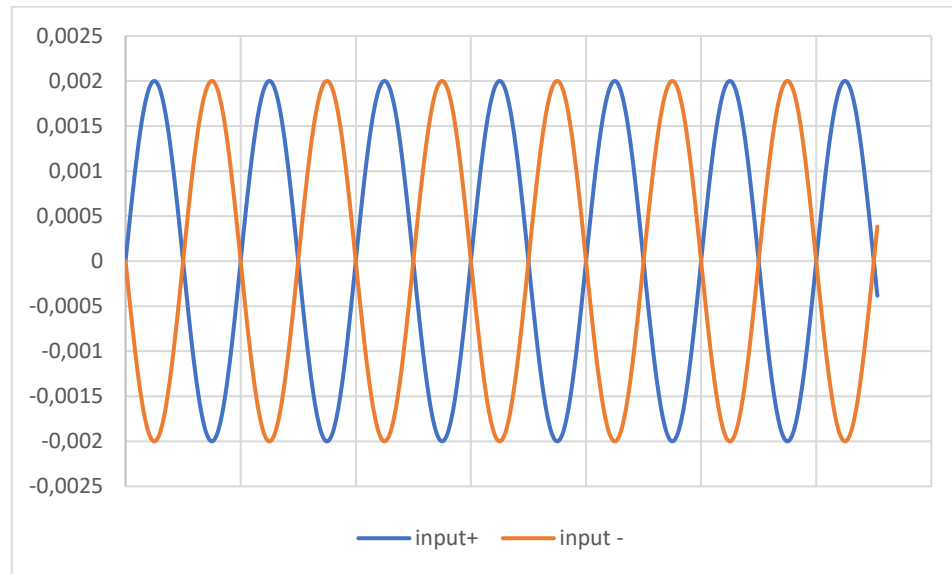
Figura 14 – Esquemático Simulado.



Fonte: Autoria própria.

Na simulação numérica do circuito acima tem-se primeiramente uma fonte de tensão na entrada com valor de tensão de pico a pico (V_{pp}) igual a 4mV representando um sinal elétrico vindo de uma fonte sonora. Abaixo encontra-se este sinal adquirido pela simulação que é exatamente o mesmo sinal de entrada do segundo estágio.

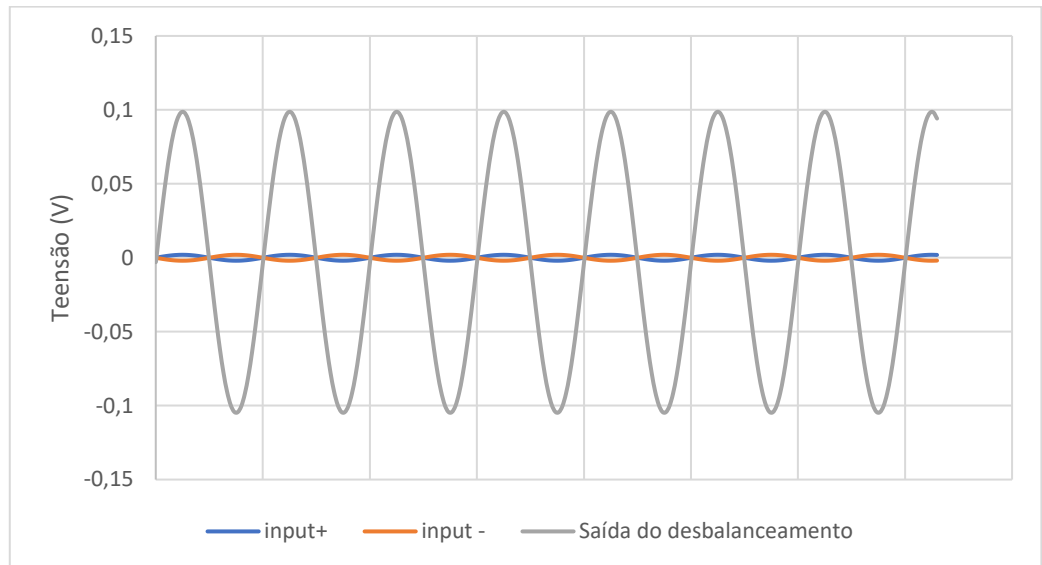
Figura 15 – Sinais positivo e negativo da entrada do pré-amplificador.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida tem-se a saída do segundo estágio, no qual temos um ganho de 50,90 vezes representado pela equação 34 referente a entrada que está representada pela figura 14. Logo, temos uma tensão de pico a pico (V_{pp}) igual a 0,2036V sendo comparado ao sinal de entrada, sendo estes sinais mostrados pela figura 16.

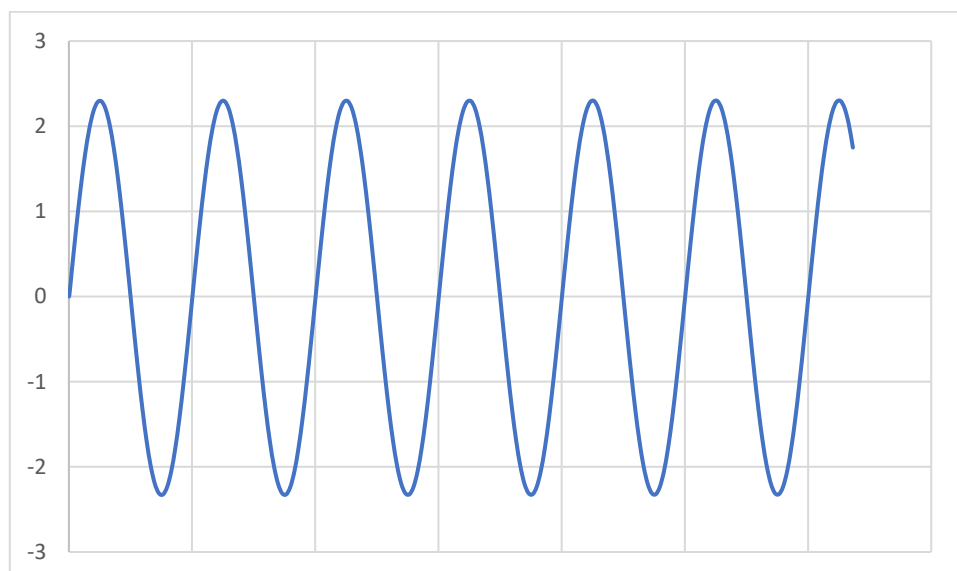
Figura 16 – Sinais de entrada do primeiro estágio e sinal de saída do segundo estágio



Fonte: Autoria própria.

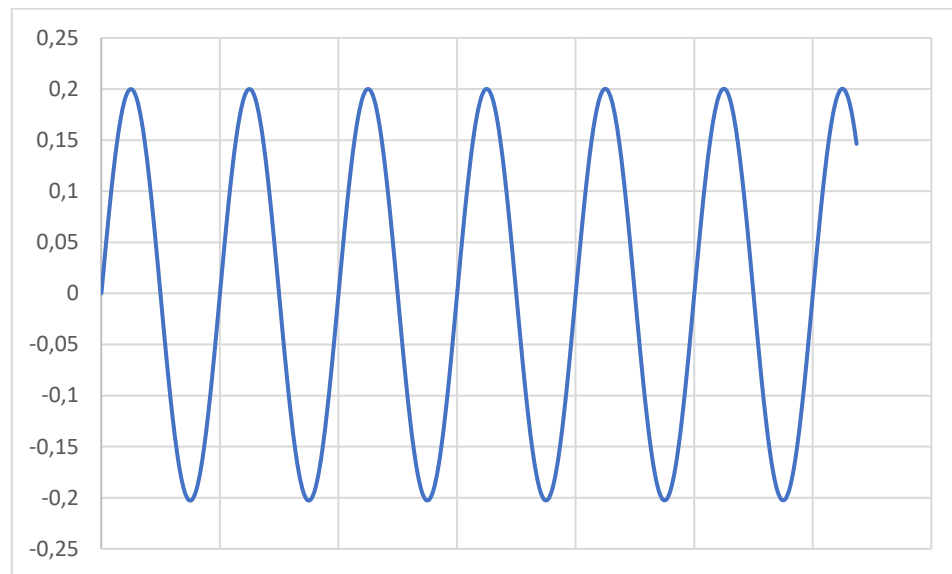
Logo em seguida tem-se o ganho de tensão variável com um ganho máximo de 23 vezes e um ganho mínimo de 2 vezes. Abaixo tem-se representado pela figura 17 o ganho máximo de tensão.

Figura 17 – Sinais com ganho máximo do terceiro estágio.



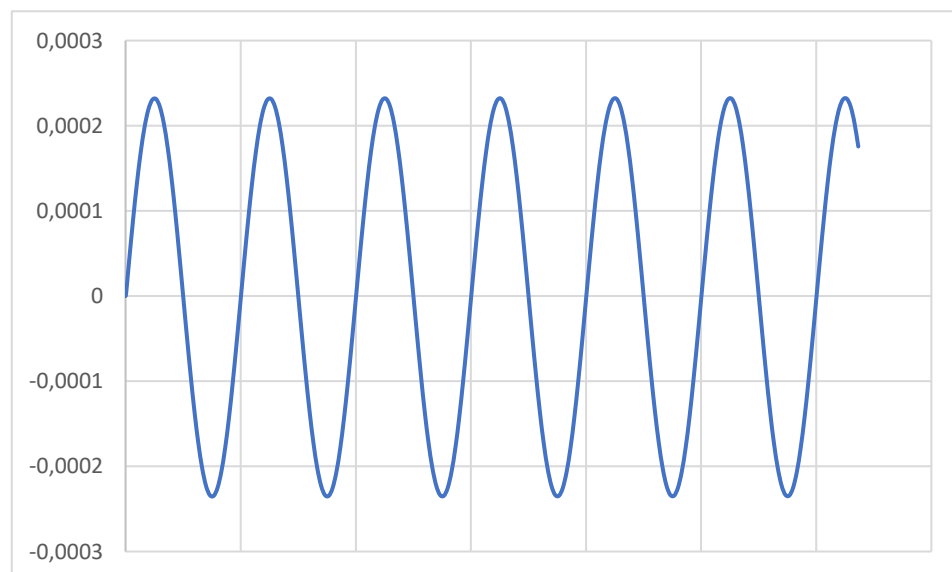
Fonte: Autoria própria.

A seguir tem-se representado pela figura 18 o ganho mínimo de tensão.

Figura 18 – Sinais com ganho mínimo do terceiro estágio.

Fonte: Autoria própria.

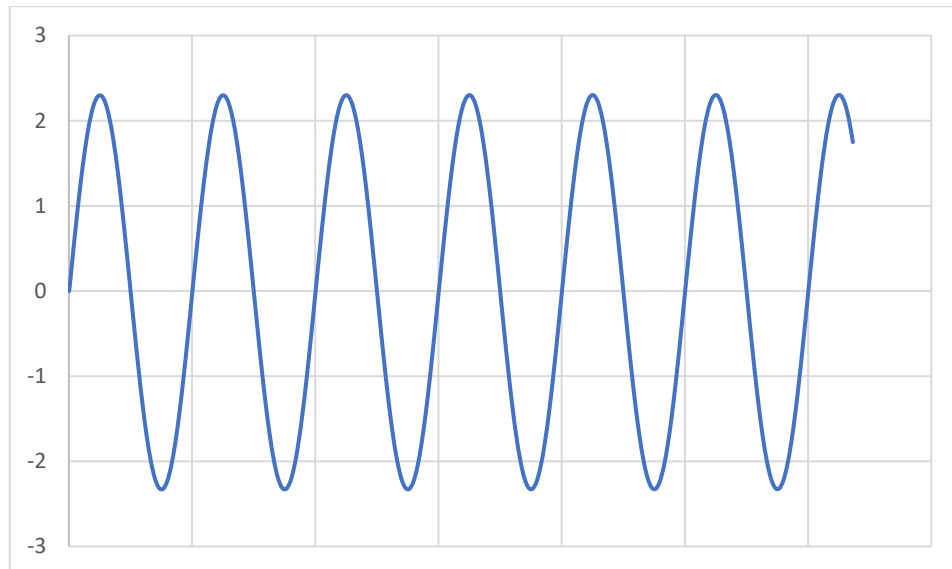
O terceiro estágio também engloba a saída do pré-amplificador, neste estágio temos também um AOP fazendo papel de volume. Em seguida temos a saída do pré-amplificador com volume mínimo e máximo. A figura 19 representa o volume mínimo possível.

Figura 19 – Sinais de volume mínimo do terceiro estágio.

Fonte: Autoria própria.

A figura 20 a seguir representa os sinais de volume máximo de saída do terceiro estágio.

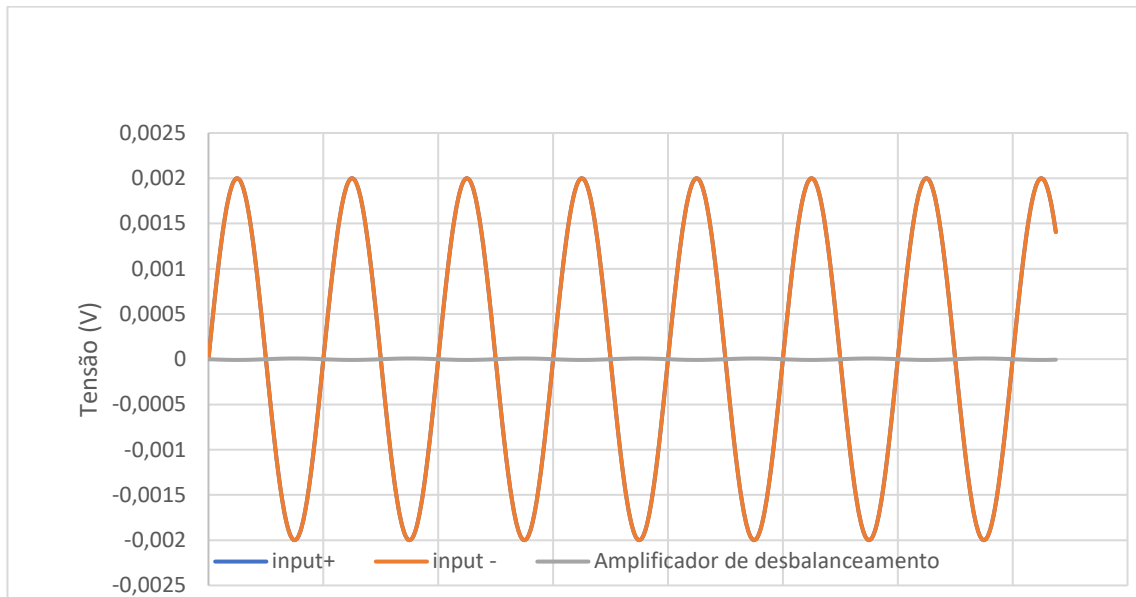
Figura 20 – Sinais de volume mínimo do terceiro estágio.



Fonte: Autoria própria.

Foi feito também testes com ruídos de modo comum na entrada do pré-amplificador, injetando sinais iguais nos dois terminais da entrada do pré-amplificador para analisar a saída. É possível analisar que a saída do pré-amplificador atenua o sinal comum em cerca de 23,94dB, pois temos um sinal de entrada igual a 2mV de pico e um sinal de saída de 8,06 μ V. A baixo na figura 21 está representado os sinais de entrada iguais, para o teste de cancelamento dos sinais comuns de entrada.

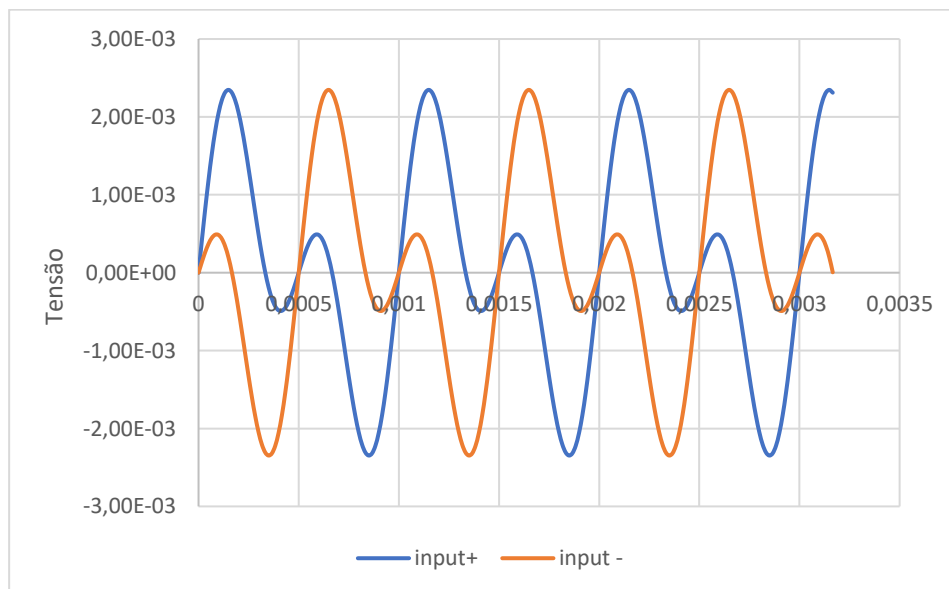
Figura 21 – Sinais de entrada e sinal de saída do desbalanceamento.



Fonte: Autoria própria.

Citando ainda ruídos, mais um teste foi realizado inserindo um sinal comum de 2kHz na entrada do pré-amplificador representado pela figura 22, junto aos sinais de entrada representados pela figura 15.

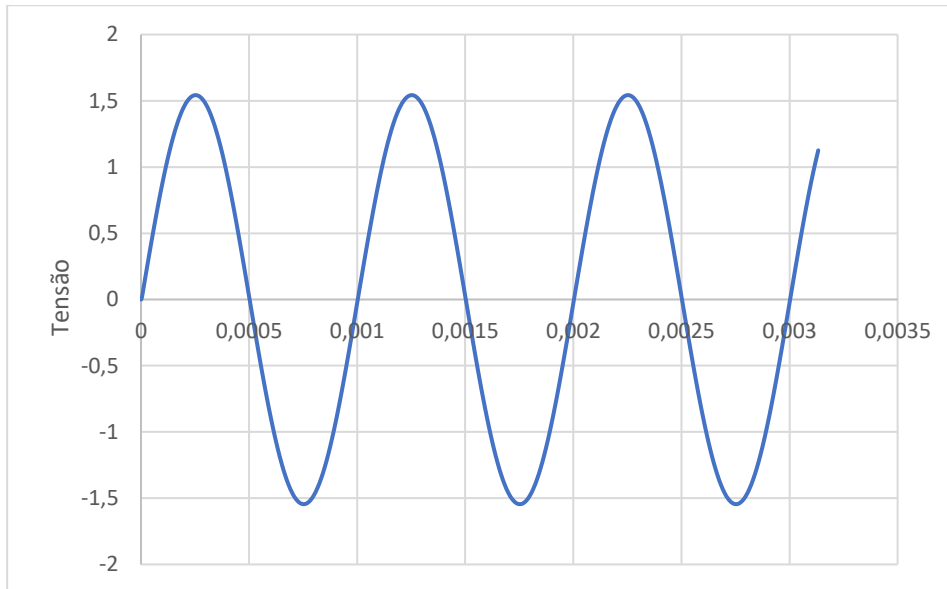
Figura 22 – Sinal de entrada adicionado ruído de modo comum.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida encontra-se na figura 23, a saída de tensão dos sinais, no qual encontra-se apenas a porção não comum dos sinais de entrada.

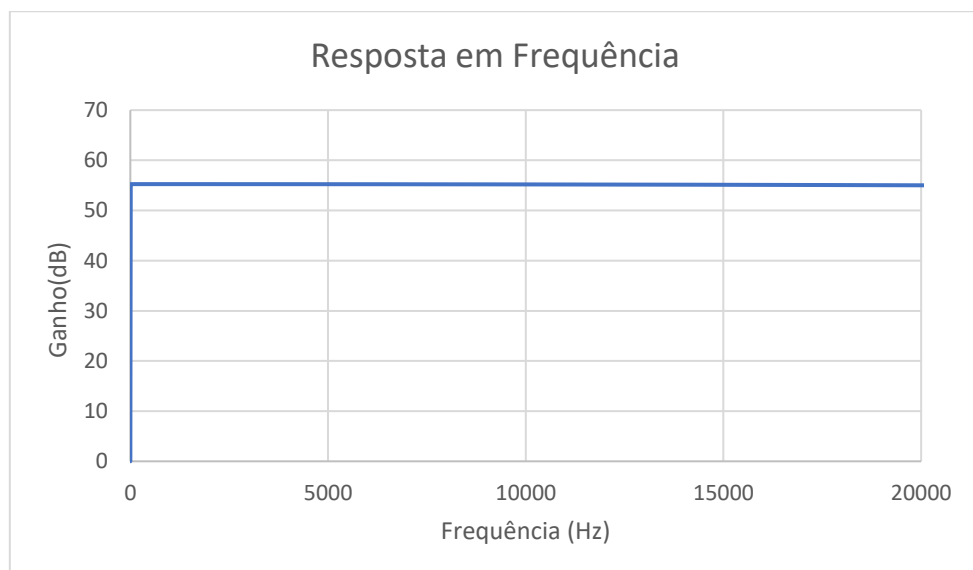
Figura 23 – Sinal de entrada adicionado ruído de modo comum.



Fonte: Autoria própria.

A figura 24, tem-se a resposta em frequência do sistema, representando o ganho respectivo a frequências de 20Hz a 20kHz, no qual é o *range* de frequência que o ouvido humano é possível ouvir. Aqui é apresentado um ganho de cerca de 55,25 dB, pois a referencia de entrada está expressa por apenas uma das entradas.

Figura 24 – Resposta em frequência do pré-amplificador.



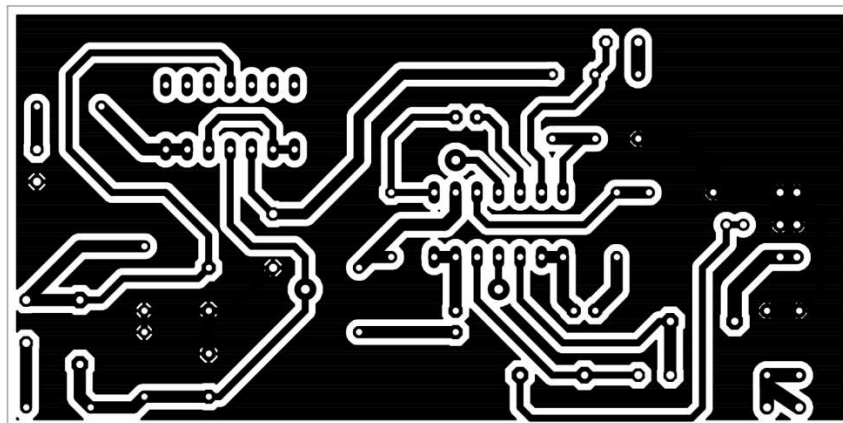
Fonte: Autoria própria.

5 CONFEÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS

5.1 CONFEÇÃO DA PCB

Para a confecção da placa de circuito Impresso, foi utilizado o modelo convencional. Primeiramente foi realizado o desenho do esquemático do projeto no programa protheus®, e logo em seguida feito o desenho da placa PCB. Após o desenho pronto, este circuito foi impresso em uma folha fotográfica por impressora *toner*. O circuito pode ser encontrado pelo esquemático na figura 25 e o circuito impresso pode ser encontrado abaixo.

Figura 25- – Placa PCB impressa.



Fonte: Própria.

Em seguida, iniciou-se o processo de passagem da tinta do papel para a placa de fenolite. Este processo funciona com temperatura, logo, com o auxílio de um ferro de passar, foi pressionado a placa contra o papel e o ferro para passar a tinta do papel para a placa. O resultado é encontrado na figura 26 abaixo.

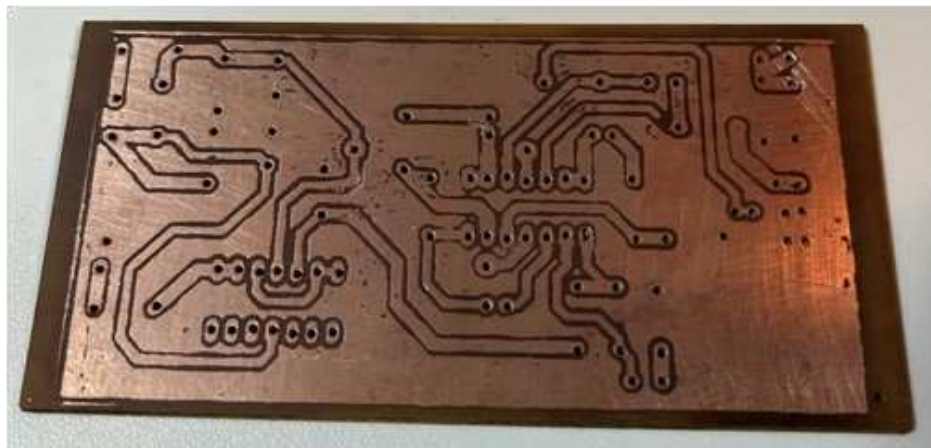
Figura 26 – Placa PCB com tinta impressa.



Fonte: Própria.

O próximo estágio corresponde a corrosão do cobre não protegido pela tinta. Para este processo foi utilizado uma substância denominada com percloroeto de ferro, a qual reage com o cobre da placa de fenolite, corroendo o metal da região não protegida da placa. O resultado encontra-se na figura abaixo, nota-se que não há mais a predominância do metal nas regiões não protegidas.

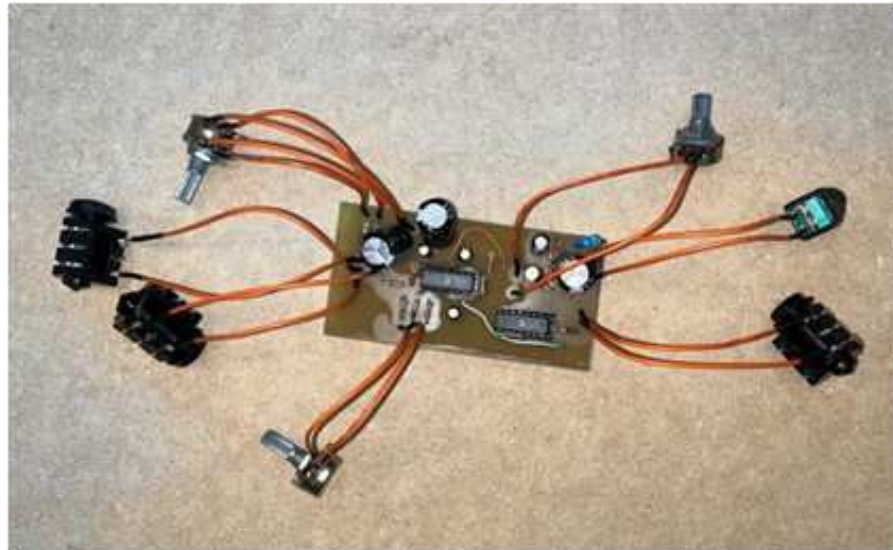
Figura 27 – Placa PCB corroída pelo percloroeto de ferro.



Fonte: Própria.

Então, iniciou-se o processo de soldagem dos componentes eletrônicos. A placa finalizada pode ser visualizado por meio da figura 26.

Figura 28 – Placa PCB pronta.



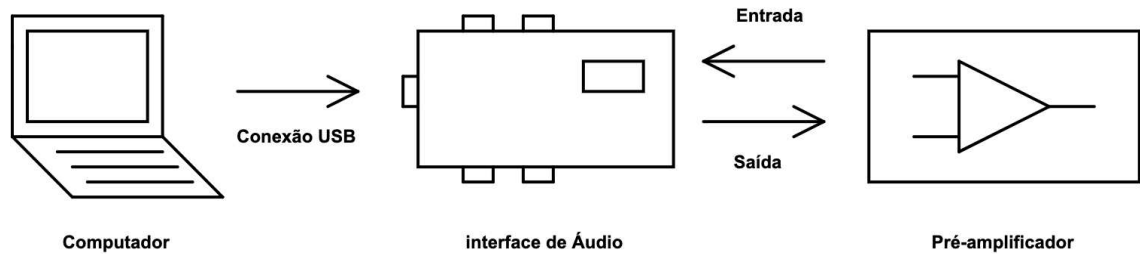
Fonte: Própria.

5.2 DIAGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a aquisição de dados, foi utilizado um computador, uma interface de áudio, cabos p10 e a própria placa PCB finalizada.

Para os testes serem realizados, precisamos entender primeiro o fluxo dos sinais. A figura abaixo demonstra o fluxo de dados para retirada dos sinais. Primeiramente, temos a conexão USB com a interface de áudio fast-track pro. Esta interface de áudio tem o objetivo de transformar o sinal analógico do pre-amplificador em sinal digital, e também funcionar como um gerador de função, para assim, gerarmos ondas senoidais e injeta-las na entrada do pre-amplificador e então, gravar o sinal de saída utilizando a mesma interface de áudio.

Figura 29 – Diagrama de como foi obtido os dados.



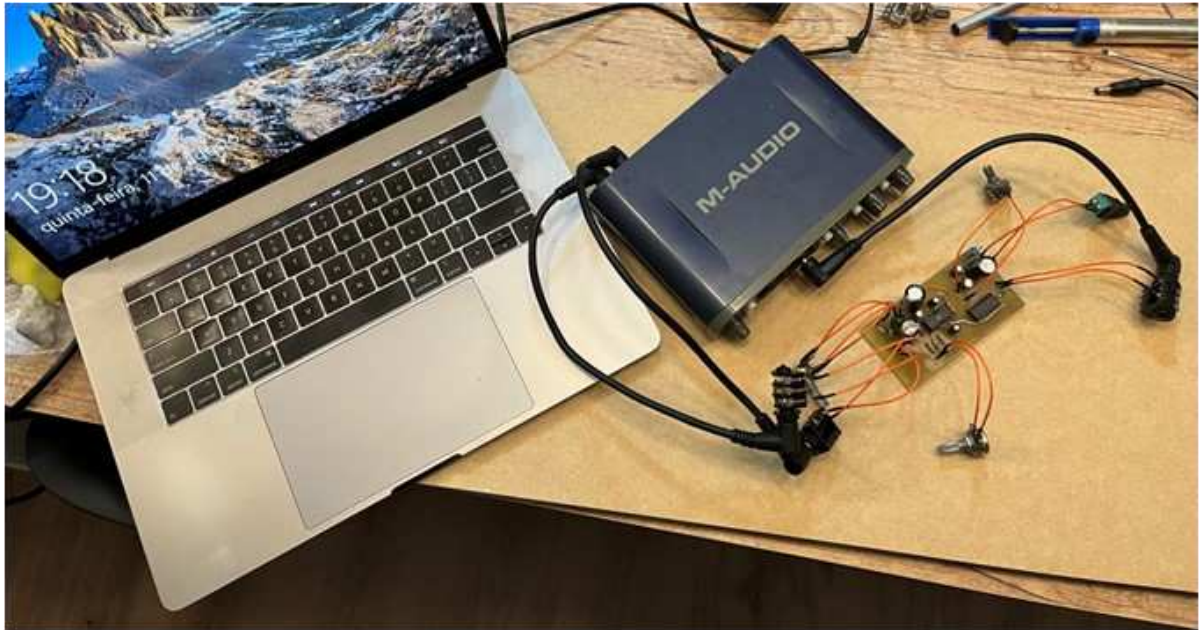
Fonte: Própria.

A seguir temos na Figura 30, uma representação real do fluxo que relatamos acima.

Para a geração dos sinais senoidais, foi utilizado o programa REW®. Este programa conecta com a interface de áudio e gera ondas de 20Hz a 20kHz, pelas duas saídas da interface de áudio. Para a melhor efetividade do recolhimento dos dados, o programa REW tem a possibilidade de gerar ondas invertidas em uma das saídas, assim, foi possível testar também o CMRR do pré-amplificador.

As duas saídas da interface foram conectadas via cabo p10 nas duas entradas do pré-amplificador. Após isso, a resposta foi adquirida pela saída do pré-amplificador, que também é conectada em uma das entradas do pré-amplificador. Assim, é possível retirar a resposta em frequência do pré-amplificador gerando ondas de 20Hz a 20kHz e adquirindo esta resposta.

Figura 30 – Esquemático real de como foi adquirido os dados.



Fonte: Autoria própria.

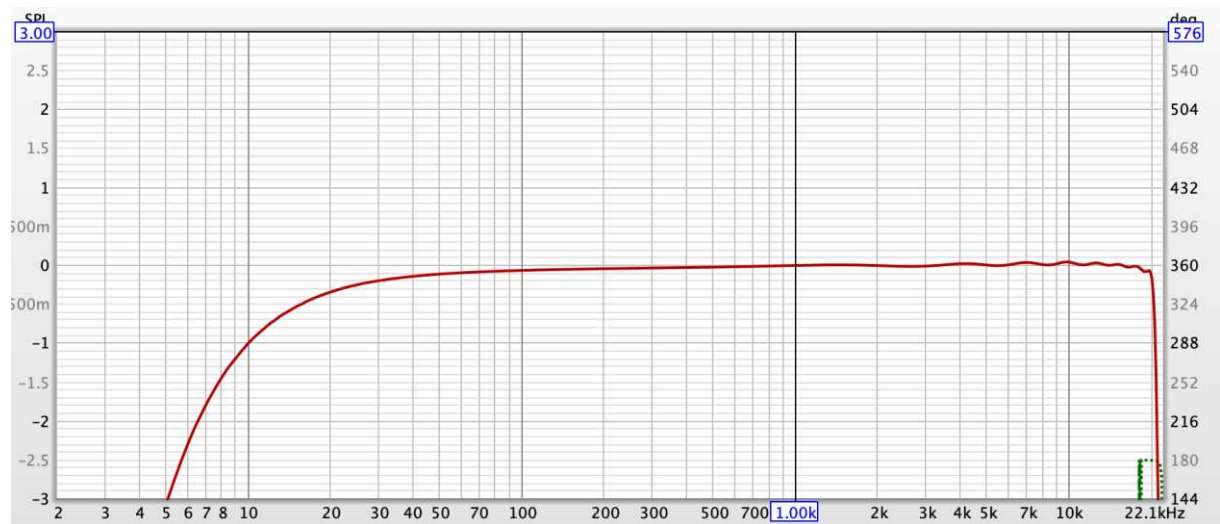
5.3 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos com o auxílio de um computador, o software REW®, sendo que este software permite a geração de ondas senoidais por meio de uma interface de áudio e também permite a aquisição de dados pela mesma interface de áudio, logo, foi possível obter a resposta em frequência do pré-amplificador.

5.3.1 Ganho do Pré-amplificador e Resposta em Frequência

Para retirar os dados do ganho completo do pré-amplificador, foi necessário equalizar a saída de sinais da interface de áudio utilizando o próprio programa, assim, sabemos que não houve interferências da placa de áudio na leitura dos sinais. A baixo segue este processo realizado demonstrado pela figura 31. Entende-se que a interface de áudio estava apta para realização de testes, pois não teve grandes distorções no sinal e estabilidade considerável na resposta em frequência.

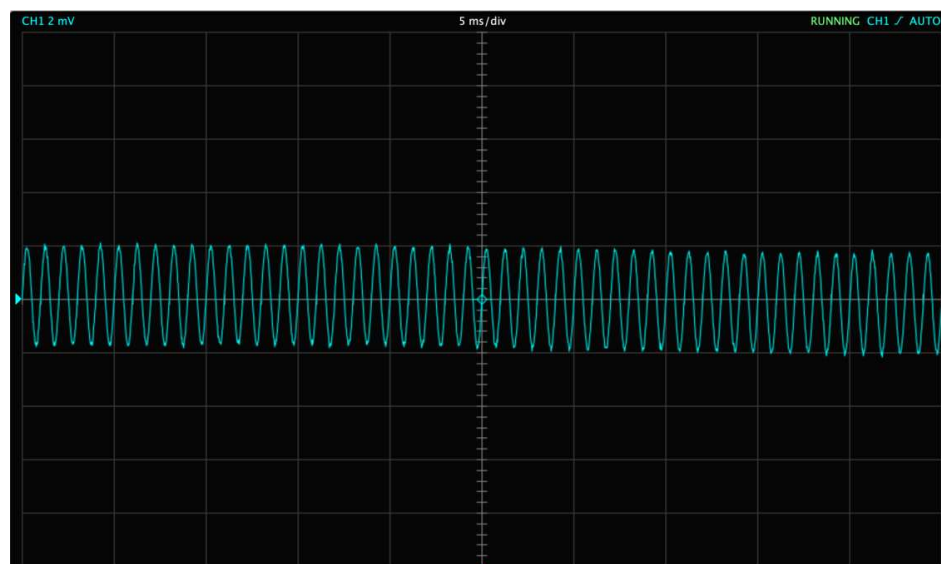
Figura 31 – Resposta em Frequência da Interface de Áudio



Fonte: Autoria própria.

Na figura 32 temos a tensão de saída da interface de áudio, a qual apresenta uma amplitude de aproximadamente 4mV de pico a pico. Estes dados foram retirados utilizando um gerador de sinal de 1kHz.

Figura 32 – Sinal de saída da interface de áudio.

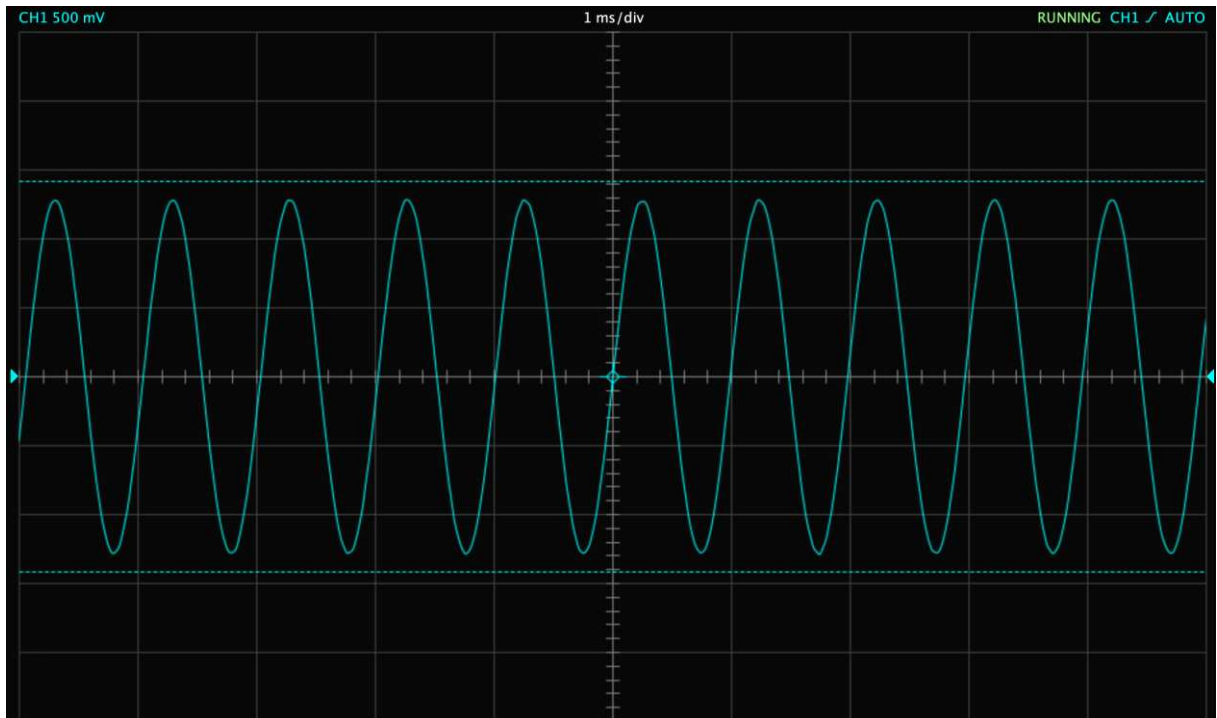


Fonte: Autoria própria.

Logo, o sinal de saída do pré-amplificador a seguir tem-se uma tensão de pico a pico de cerca de 2,75V, está representando o ganho máximo possível do pré-amplificador. Isso representa um ganho de 650 vezes que é cerca de 10% maior que

o valor teórico, isso pode ter ocorrido por questões de precisão dos resistores e características intrínsecas dos componentes amplificadores.

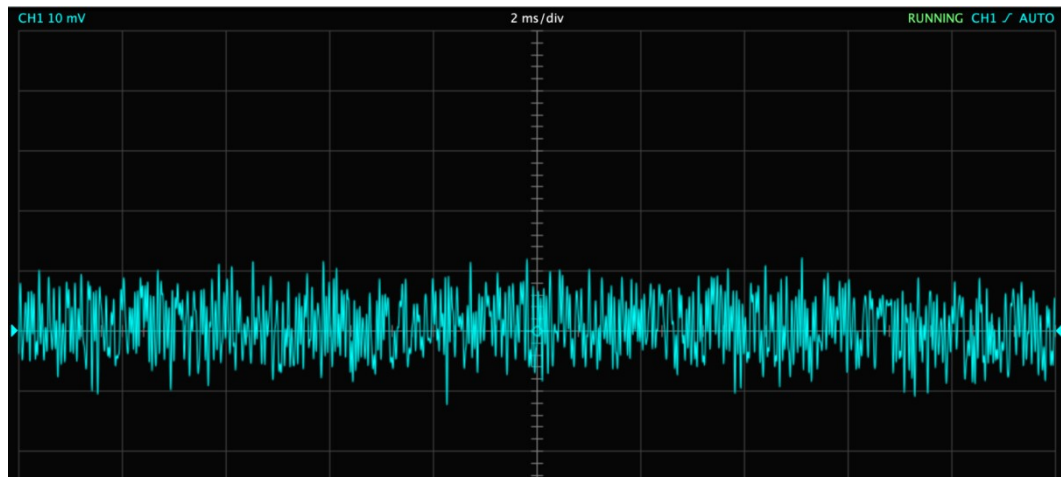
Figura 33 – Sinal de saída do pré-amplificador



Fonte: Autoria própria.

Com a finalidade de validar o desbalanceamento do sinal de entrada e redução dos ruídos comuns nos terminais de entrada, foi injetado um ruído na entrada do sistema de ordem de 4mV de tensão de pico a pico (V_{pp}). Logo, com as configurações do pré-amplificador em ganho máximo tem-se a resposta da saída do pré-amplificador mostrada pela figura 32 abaixo. Representando uma atenuação de 24,39 dB em relação a entrada do sistema, que foi bem próximo do esperado.

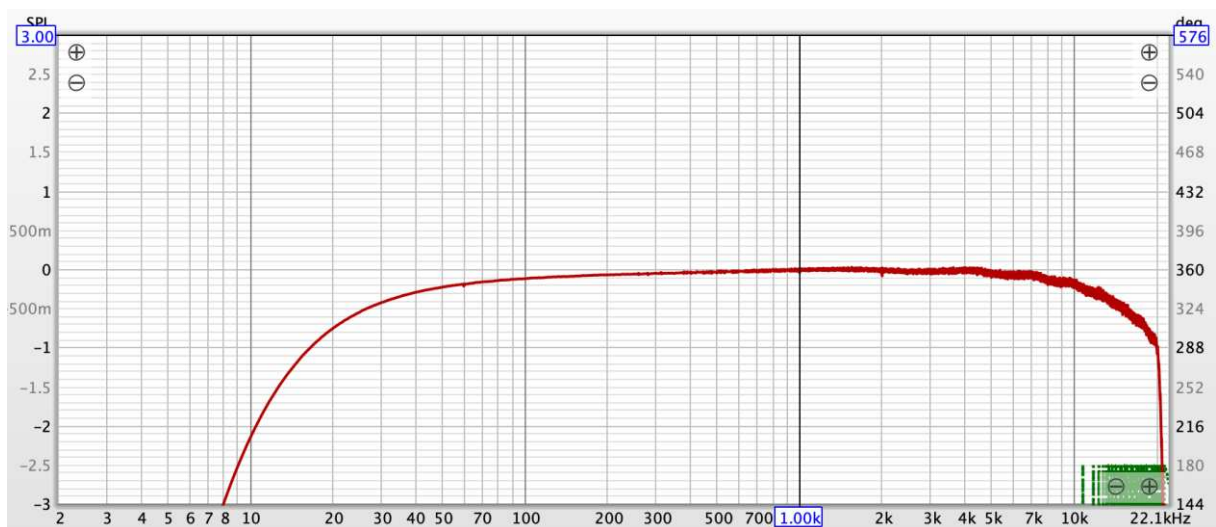
Figura 34 – Ruído injetado na entrada de pré-amplificador



Fonte: Autoria própria.

A resposta em frequência do pré-amplificador é apresentada por intermédio da figura 29. Tem-se uma certa distorção e atenuação do ganho de cerca de 9,16 dB acima das frequências de 10kHz, isso pode ser devido a filtros passivos ocasionados por questões estruturais do próprio pré-amplificador operacional. Nota-se que há um engrossamento da linha acima de 5kHz, um dos motivos para isso ocorrer é do protótipo não ter proteção contra ondas eletromagnéticas, ou seja, não está isolado junto a uma estrutura metálica ligado ao terra do circuito para isolá-lo de interferências maiores externa.

Figura 35 – Resposta em frequência do pré-amplificador.



Fonte: Autoria própria.

6 Conclusão

Neste trabalho vê-se o por que da necessidade de um pré-amplificador de impedância de entrada variável e sua utilidade para microfones em geral. Caso não haja um dispositivo deste, não será possível extrair um áudio fiel comparado a fonte sonora, obviamente que também há características do próprio microfone que alteram o som da fonte sonora, mas utilizando-se de um pré-amplificador de impedância de entrada variável, faz com que o som seja o mais próximo da realidade do som a ser amplificado, com frequências mais fiéis ao instrumento ou voz.

Conclui-se neste trabalho que o pré-amplificador de impedância de entrada variável atingiu seu objetivo de amplificar sinais elétricos podendo assim, variar a sua impedância de entrada, facilitando a maior extração dos sinais elétricos de fontes sonoras. Houve interferências na resposta em frequência em relação a ruídos, mas que não alteraram a sua característica linear para a representação dos sinais auditivos, isso deve-se pelo fato de ser um protótipo e não haver todos os recursos que deveriam apresentar em um produto definitivo. Os resultados experimentais obtidos são similares aos resultados teóricos e de simulação numérica, e que, por sua vez, valida o estudo proposto que neste trabalho foi apresentado.

7 REFERÊNCIAS

USER MANUAL X32 DIGITAL MIXER, **BEHINGER**, disponível em: https://mediadl.musictribe.com/media/sys_master/h9b/h22/8849399545886.pdf

Acesso em: 10 ago. 2022

P3S MICROFONES DINÂMICO CARDIOIDE PARA VOZ, **AKG**, disponível em: <https://br.akg.com/P3.html>> Acesso em: 13 ago. 2022

BARROS, M. **Uma Breve História dos Amplificadores de Áudio**. 2019. Disponível em: <https://amplificadoresnextpro.com.br/index.php/blog/de-marcelo-barros/186-uma-breve-historia-dos-amplificadores-de-audio>> Acesso em: 13 ago. 2019.

BORTONI, R. **Amplificadores de Áudio**. 1. ed. Brasil: H. SHELDON, 2002.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo, Brasil: Pearson, 2004. 666 p. ISBN 8587918222.

CARTER, B.; MANCINI, R. **OP AMPS FOR EVERYONE**. Burlington, MA: Newnes, 2009. 533–550 p. ISSN 1856175057. ISBN 9781856175050.

CROWGURST, N. H. **Basic Audio**. Vol. 1. New York, N.Y.: John F. Rider Publisher, INC., 1959.

DUNCAN, B. **High Performance Audio Amplifiers**. Oxford: Newnes, 1996.

FERREIRA, F. F. **Eletrônica I**. 1998. 61 p. Disponível em: [https://paginas.fe.up.pt/fff/Homepage/Ficheiros/E1 Cap4.pdf](https://paginas.fe.up.pt/fff/Homepage/Ficheiros/E1%20Cap4.pdf)>.

MALVINO, A. P. **Eletrônica**. Vol.1, 4 e. São Paulo, Brasil: MAKRON Books, 1995.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Makron Books, 2005. 848 p. ISBN 9788576050223.

SPADA, A. L. **Microfones - Parte 1**. 2017. 20 p. Disponível em: [http://www.attack.com.br/artigos-tecnicos/mic 1.pdf](http://www.attack.com.br/artigos-tecnicos/mic-1.pdf)>.

JUNIOR, Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos. 6. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

FAST TRACK PRO USER GUIDE, M-AUDIO, disponível em:<
<https://www.lclark.edu/live/files/14551-maudio-fast-track-pro-manual>> acesso em:
Acesso em: 10 ago. 2022.

NOISE OF A NON-INVERTING OPERATIONAL AMPLIFIER CIRCUIT, ANALOG
DEVICES, disponível em:< <https://www.analog.com/en/product-category/amplifiers.html>> acesso em: Acesso em: 10 ago. 2022.

NOISE OF A NON-INVERTING OPERATIONAL AMPLIFIER CIRCUIT, MATT DUFF,
disponível em https://www.youtube.com/watch?v=W0vfALQ_n54 acesso em: Acesso
em: 10 ago. 2022.