



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
CECAU - Colegiado do Curso de
Engenharia de Controle e Automação



Anderson Martins

CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM MICROFONE COM CIRCUITO DE AMPLIFICAÇÃO DIFERENCIAL

Monografia de Graduação

Ouro Preto, 2022

Anderson Martins

CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM MICROFONE COM CIRCUITO DE AMPLIFICAÇÃO DIFERENCIAL

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia(o) de Controle e Automação.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Profa. Adrielle de Carvalho Santana, Dra.

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M386c Martins, Anderson.

Construção e análise de um microfone com circuito de amplificação diferencial. [manuscrito] / Anderson Martins. - 2022.

61 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Adrielle de Carvalho Santana.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Microfone. 2. Amplificadores operacionais. 3. Processamento de sinais. I. Santana, Adrielle de Carvalho. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Anderson Martins

Construção e Análise de um Microfone com Circuito de Amplificação Diferencial

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Aprovada em 26 de Outubro de 2022

Membros da banca

Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Orientadora (DECAT - Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Alan Kardek Rego Segundo - Convidado (DECAT - Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Convidado (DEMEC - Universidade Federal de Ouro Preto)

Adrielle de Carvalho Santana, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Adrielle de Carvalho Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/10/2022, às 13:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0416874** e o código CRC **8F913163**.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido saúde e força para enfrentar todos os desafios.

Ao meu pai Cor Jesus, minha mãe Zulmira e meus irmãos Humberto, Eliane e Douglas por serem meu porto seguro durante toda essa caminhada, me oferecendo total apoio quando precisei.

À minha namorada Tayanne por ser minha referência, sempre me incentivando a dar o meu melhor e me fazendo acreditar mais em mim.

Aos meus colegas, em especial Douglas, Gabriela e Wesley, que compartilharam comigo momentos de profundo aprendizado, contribuindo imensamente com minha formação.

A todos os professores que se dedicam a compartilhar seus conhecimentos, em especial minha orientadora Adrielle por acreditar junto comigo neste projeto, me conduzindo e orientando sempre com muita sabedoria.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.” (Isaac Newton)

Resumo

O microfone pode ser entendido como um transdutor eletroacústico que transforma energia acústica em elétrica. Desde sua invenção os microfones vêm sendo utilizados em diversas aplicações como telecomunicações, gravações musicais, sonares, instrumentos cirúrgicos, aparelhos auditivos, sensores de distância, medições de nível de ruído, monitoramento de estruturas e acionamento de dispositivos por meio da voz.

Tendo em vista o grande número de aplicações e a importância do estudo de processamento de sinais, desenvolveu-se um circuito analógico capaz de filtrar e amplificar o sinal elétrico proveniente de um microfone de eletreto omnidirecional, obtendo como resultado um microfone com saída balanceada, resposta em frequências semelhante a um microfone comercial, com relação sinal ruído de 57,23dBc e distorção harmônica total de 0,76%.

Palavras-chaves: microfone, amplificador operacional, processamento de sinais.

Abstract

The microphone can be understood as an electroacoustic transducer that transforms acoustic energy into electrical energy. Since their invention, microphones have been used in various applications such as telecommunications, music recordings, sonar, surgical instruments, hearing aids, distance sensors, noise level measurements, monitoring of structures and triggering devices through voice.

In view of the large number of applications and the importance of studying signal processing, an analog circuit capable of filtering and amplifying the electrical signal from an omnidirectional electret microphone was developed, resulting in a microphone with balanced output, at frequencies similar to a commercial microphone, with signal to noise ratio of 57.23dBc and THD of 0.76%.

Key-words: microphone, operational amplifier, signal processing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Microfone Piezoresistivo. Fonte: (SPADA, 2013)	21
Figura 2 – Microfone Piezoelétrico. Fonte: (SPADA, 2013)	22
Figura 3 – Microfone Eletromagnético. Fonte: (SPADA, 2013)	22
Figura 4 – Microfone Condensador. Fonte: (SPADA, 2013)	23
Figura 5 – Microfone de eletreto. Fonte: (SPADA, 2013)	23
Figura 6 – Diagrama polar omnidirecional. Fonte: https://magroove.com/blog/pt-br/microfone-omnidirecional/	24
Figura 7 – Diagrama polar Cardióide. Fonte: (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013)	25
Figura 8 – Diagrama polar Bidirecional. Fonte: (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013)	26
Figura 9 – Circuito phantom power com transformador. Fonte: (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013)	27
Figura 10 – Circuito phantom power com amplificador operacional. Fonte: Autoria própria	27
Figura 11 – Saturação do sinal de saída de um amplificador. Fonte: Newton Braga.	29
Figura 12 – Definição de operação em pequeno sinal. Fonte: (MALVINO; BATES, 2011)	29
Figura 13 – Esquema de um amplificador. Fonte: (TOKHEIM, 2013)	30
Figura 14 – (a) Filtro passa-baixas ativo de primeira ordem; (b) gráfico da resposta. Fonte: (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)	32
Figura 15 – Filtro passa-altas ativo de primeira ordem. Fonte: (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)	32
Figura 16 – Filtro passa-baixas de segunda ordem: (a) Butterworth 50KHz; (b) Bessel 100KHz. Fonte: (SELF, 2020)	33
Figura 17 – Resposta em frequência dos filtros Butterworth e Bessel. Fonte: (SELF, 2020)	33
Figura 18 – Diagrama de blocos do sistema para a caracterização dos microfones. Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2020)	34
Figura 19 – Curva com os valores dos NPS para os microfones. Fonte: Lopes et al. (2020)	35
Figura 20 – Curva da resposta em frequência do microfone WM-61A. Fonte: citar datasheet	38
Figura 21 – Microfone eletreto com circuito de polarização fixa. Fonte: Autoria própria	39
Figura 22 – Circuito com configuração inversor. Fonte: Autoria própria.	40
Figura 23 – Microfone com saídas normal e invertida. Fonte: Autoria própria.	41
Figura 24 – Microfone com saídas normal e invertida seguidas de um estágio de amplificação. Fonte: Autoria própria.	42

Figura 25 – Circuito de alimentação. Fonte: Autoria própria	42
Figura 26 – Circuito utilizado na simulação de rejeição em modo comum. Fonte: Autoria própria	44
Figura 27 – Simulação de rejeição em modo comum. Fonte: Autoria própria	45
Figura 28 – Análise do circuito simulado no Proteus. Fonte: Autoria própria	46
Figura 29 – Montagem do circuito em protoboard. Fonte: Autoria própria	47
Figura 30 – Posicionamento do microfone WM-61A para realização dos experimen- tos. Fonte: Autoria própria	47
Figura 31 – Diagrama do experimento no Simulink/Matlab. Fonte: Autoria própria	48
Figura 32 – Ferramenta de análise de espectro do Simulink/Matlab. Fonte: Autoria própria	49
Figura 33 – Correlação entre os microfones C01 e WM-61A. Fonte: Autoria própria	51
Figura 34 – Resposta em frequência dos dois microfones. Fonte: Autoria própria . .	52
Figura 35 – Resposta do microfone WM-61A para varredura de frequências entre 40Hz e 22kHz. Fonte: Autoria própria	53

Lista de tabelas

Tabela 1 – Intensidade dos sons.	19
Tabela 2 – Especificações WM-61A.	38
Tabela 3 – Especificação dos componentes	43
Tabela 4 – Dados da resposta C01. M1, M2 e M3 representam as três medições feitas para cada frequência.	51
Tabela 5 – Dados da resposta WA-61A. M1, M2 e M3 representam as três medições feitas para cada frequência.	52
Tabela 6 – Harmônicos C01	54
Tabela 7 – Harmônicos WM-61A	54
Tabela 8 – THD e SNR para C01 e WM-61A.	54

Lista de abreviaturas e siglas

dB	Decibel
SNR	Relação Sinal Ruído
THD	Distorção Harmônica Total
CC	Corrente Contínua
RMS	Raiz Média Quadrática
NPS	Nível de Pressão Sonora
JFET	Transistor de junção por efeito de campo

Lista de símbolos

λ	Lambda
ω	Omega minúsculo
Ω	Omega maiúsculo
π	Pi
Δ	Delta
ρ	Rô
β	Beta
μ	Mi

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	16
1.4	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	O som	18
2.2	Microfones	19
2.2.1	Classificação dos microfones	20
2.2.1.1	Piezoresistivo	20
2.2.1.2	Piezoelétrico	21
2.2.1.3	Eletromagnético	21
2.2.1.4	Condensador	23
2.2.2	Padrão Polar	24
2.2.2.1	Omnidirecional	24
2.2.2.2	Unidirecional	25
2.2.2.3	Bidirecional	25
2.3	Phantom Power	26
2.4	Ruído	27
2.5	Distorção Harmônica	28
2.6	Amplificadores para pequenos sinais	30
2.7	Filtros	31
2.8	Métodos de avaliação de microfones	33
2.8.1	Avaliação da resposta em frequência	34
2.8.2	Avaliação da taxa de distorção harmônica	35
2.8.3	Avaliação da relação sinal ruído	35
3	DESENVOLVIMENTO	37
3.1	Seleção do microfone	37
3.2	Circuito básico para funcionamento microfone de eletreto	37
3.3	Pré amplificador com amplificador operacional	39
3.4	Saída balanceada	40
3.5	Circuito de alimentação utilizando Phantom-Power	41

3.6	Cálculos do circuito final	43
3.7	Simulações utilizando software Proteus	44
3.8	Experimentos de teste utilizando Matlab	45
4	RESULTADOS	50
4.1	Resposta em frequência	50
4.2	THD e SNR	53
	 Conclusão	 55
	 Referências	 56
	 APÊNDICES	 58
	 APÊNDICE A – LAYOUT DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	 59

1 Introdução

1.1 Contextualização

O microfone foi inventado em meados do século XIX (COSTA, 2002) e foi fundamental para o avanço das telecomunicações, permitindo invenções como a do telefone (PONTA GROSSA, 2010) e posteriormente do rádio (PAIXÃO FERREIRA, 2013). Tão breve o microfone começou a ser utilizado também em gravações musicais (DE MARCHI, 2005) permitindo expansão da indústria fonográfica. O microfone tem aplicação militar tanto nas telecomunicações como nos sonares utilizados para a detecção de submarinos, por exemplo. Na medicina o microfone pode ser utilizado em instrumentos cirúrgicos, ultrassonografias e aparelhos auditivos. Do ponto de vista da engenharia, os microfones tem sido utilizado em sistemas de medição de distância, nível de ruído (LOPES et al., 2020) e no monitoramento de estruturas como prédios, pontes e barragens (JUSTEN, 2012). Mais recentemente os microfones têm sido utilizados em conjunto com técnicas de inteligência artificial para o reconhecimento de fala, permitindo, por exemplo, acionamento de dispositivos por meio da voz.

O microfone pode ser definido como um transdutor eletroacústico que transforma energia acústica em energia elétrica (COSTA, 2002). Na maior parte dos casos, as ondas sonoras excitam uma membrana que interage com algum tipo de arranjo elétrico que gera um sinal elétrico com intensidade proporcional à intensidade da onda sonora que excitou a membrana. Os microfones podem ser agrupados pelo princípio de operação e são basicamente: piezo-resistivo, piezoelétrico, eletromagnético, eletrodinâmico e eletrostático. A depender do princípio de operação os microfones podem necessitar de um circuito de alimentação. Os microfones podem ser classificados também de acordo com seu diagrama polar de captação, ou seja, sua resposta em amplitude em função da direção da fonte sonora. As formas básicas são omnidirecional, unidirecional e bidirecional. A resposta em frequência de um microfone também é uma característica muito importante a ser analisada, já que descreve a faixa de frequências captadas e o quão plana é a resposta do microfone (SPADA, 2013).

O sinal elétrico captado pelos microfones geralmente é de pequena amplitude, fazendo necessário a utilização de circuitos pré-amplificadores para se adequar o sinal elétrico aos requisitos da aplicação. Para sinais de tensão e corrente pequenos, a capacidade de fornecimento de potência e a eficiência tem pouca importância (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). Contudo a linearidade na amplificação e a magnitude do ganho são as características mais importantes. Outras características importantes de um bom pré-amplificador são baixa relação sinal ruído, baixa distorção harmônica e resposta em

frequência plana. Podem ser projetados ainda filtros que agirão atenuando ou enfatizando determinadas frequências, com a finalidade de manter a variação destas frequências dentro de um limiar. Em [Self \(2020\)](#) vê-se que existem varias possibilidades para arquitetar o circuito de um pré-amplificador e cada uma delas será mais adequada ou não a depender da aplicação.

1.2 Justificativa

Tendo em vista o grande número de aplicações para microfones e circuitos dedicados a processamento de sinais, se vê importante um maior aprofundamento nestas áreas de estudo. O intuito deste trabalho é então, desenvolver um sistema de captação de som de baixo custo, que tenha boa resposta em frequência e boa relação sinal ruído. Ao fim do projeto, pretense-se compara-lo com outros microfones existentes com o intuito de validar a solução criada. Este projeto permitirá não só a aplicação de muitos conceitos aprendidos ao longo do curso de Engenharia de Controle e Automação, como também o aprofundamento no estudo de circuitos eletrônicos, acústica, sistemas de controle e processamento e análise de sinais. Assim, justifica-se a relevância de se realizar este trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um circuito analógico capaz de filtrar e amplificar o sinal elétrico proveniente de um microfone de eletreto omnidirecional, com a finalidade de captar sons com boa fidelidade.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos deste trabalho tem-se:

- Projetar um pré-amplificador que condicione o nível de saída adequadamente para que o microfone possa ser conectado em mesas de som e placas de captura.
- Projetar filtros analógicos que serão utilizados como equalizadores, corrigindo a resposta em frequência do sistema. A resposta do pré-amplificador idealmente deve ser plana entre 20Hz e 20kHz.
- Montagem do circuito em *protoboard* e realização da montagem do microfone em uma estrutura.

1.4 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 apresenta a contextualização e objetivos do trabalho. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos e dispositivos usados neste trabalho. O capítulo 3 apresenta a metodologia e o desenvolvimento do projeto. O capítulo 4 contém os resultados e testes realizados e , por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros relacionados ao projeto desenvolvido.

2 Revisão bibliográfica

O objetivo dessa revisão bibliográfica é tomar conhecimento sobre o caminho que o som faz, desde a sua geração, passando pela sua captação, processamento, digitalização e amplificação, se atentando principalmente aos aspectos físicos e quantitativos do processo. Todo esse conhecimento revisado e adquirido é a base principal para as tomadas de decisão durante o projeto.

2.1 O som

Em seu trabalho [Wisnik \(1999\)](#) define o som como uma onda, que faz os corpos vibrarem transmitindo essa vibração para a atmosfera sob a forma de uma propagação ondulatória, que o nosso ouvido é capaz de captar e que o cérebro interpreta, dando-lhe configurações e sentidos.

O som pode ser entendido como a sensação auditiva produzida por vibrações mecânicas. Portanto para que haja som, algo deve vibrar, essa vibração deve ser transmitida através de algum meio até um ouvinte que por fim tem uma sensação auditiva.

Já [Halliday, Resnick e Walker \(2016\)](#) definem uma onda sonora genericamente como uma onda longitudinal, ou seja, as moléculas oscilam na direção paralela a de propagação da onda. Dentre os vários conceitos apresentados pelos autores, pode-se trazer para o âmbito deste trabalho algo que pode vir a ser útil. [Halliday, Resnick e Walker \(2016\)](#) mostram que uma onda sonora de comprimento de onda λ e frequência f produz um deslocamento longitudinal s de um elemento de massa do ar que pode ser descrito pela equação 2.1:

$$s = s_m \cos(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

em que s_m é a amplitude do deslocamento, $k = 2\pi/\lambda$ e $\omega = 2\pi f$.

Uma onda sonora também produz uma variação Δp da pressão do ar que pode ser descrita pela equação 2.2:

$$\Delta p = \Delta p_m \sin(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

em que a amplitude da variação de pressão é $\Delta p_m = (v\rho\omega)s_m$.

Usualmente a intensidade de uma onda sonora é indicada em decibel(dB). O nível de intensidade sonora em dB é definido na equação 2.3 ([VUOLO; FRANCO, 2004](#)):

$$\beta(dB) = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (2.3)$$

onde $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$, em que I_0 é um valor aproximado para o limiar da audição humana em 1kHz e corresponde a 0dB. Na tabela 1 pode-se ver exemplos de sons e suas respectivas intensidades (VUOLO; FRANCO, 2004).

Tabela 1 – Intensidade dos sons.

Fonte sonora	$\beta(\text{dB})$	I/I_0
Limiar da audição	0	1
Mais fracos sons audíveis	10	10^1
Conversa muito baixa a 1m	20	10^2
Rua silenciosa	30	10^3
Música baixa	40	10^4
Escritório comum	50	10^5
Conversa alta a 1m	60	10^6
Motor de caminhão	70	10^7
Rua barulhenta com trânsito	80	10^8
Britadeira pneumática	90	10^9
Buzina automotiva	100	10^{10}
Grupo de rock	110	10^{11}
Turbina de jato grande a 30m	120	10^{12}
Limiar da dor	120 a 130	10^{12}
Foguete espacial grande	200	10^{20}
Explosão nuclear a 500m	220	10^{22}

Os ouvidos humanos têm dificuldade de perceber frequências de som muito baixas ou muito altas. Em média, a faixa de frequências perceptíveis pela audição humana é de 20Hz até 20kHz, podendo variar de pessoa para pessoa. Com o envelhecimento é comum a perda da capacidade auditiva, principalmente nas frequências mais altas (RUI; STEFFANI, 2007).

A audição humana não possui sensibilidade linear em frequência. Isso significa que a percepção sonora para sons com a mesma intensidade varia de acordo com a frequência da onda sonora (VUOLO; FRANCO, 2004).

2.2 Microfones

Este capítulo tem por finalidade um estudo mais aprofundado dos microfones, fornecendo assim embasamento teórico para uma escolha apropriada do microfone de acordo as condições do som de interesse a ser capturado.

Inventado por David Hughes, os microfones são transdutores eletroacústicos que transformam energia acústica em energia elétrica por meio do deslocamento de sua membrana proporcionalmente às ondas de som capturadas (COSTA, 2002).

A depender da aplicação do microfone, este pode apresentar diferentes características. Um microfone utilizado para entretenimento pode apresentar um efeito de proximidade para adicionar corpo e presença à voz captada. Por outro lado, em uma aplicação de medição se necessita de uma resposta à pressão sonora uniforme em uma larga faixa de frequências (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013). Alguns parâmetros de interesse nos microfones para o desenvolvimento de um sistema de captação de som são:

- Sensibilidade - É o nível de entrada necessário para levar um equipamento a sua potência nominal.
- Resposta Polar - Representa a diferença de sensibilidade do microfone em relação ao ângulo de incidência de uma onda sonora.
- Resposta em frequência - Refere-se à capacidade de reprodução de frequência que um determinado equipamento possui.
- Impedância de saída - É a impedância equivalente do sistema visto a partir da saída.
- Nível acústico máximo de entrada - Maior nível suportado pelo microfone antes que haja saturação mecânica ou elétrica.
- Distorção Harmônica Total - É a relação da frequência fundamental e a potência total de todas as harmônicas observadas na saída do sistema.
- Relação sinal ruído - É a relação entre o nível de sinal e o nível de ruído produzido pelo equipamento.

2.2.1 Classificação dos microfones

Em seu trabalho Spada (2013) classifica os microfones segundo seu princípio de operação, ou seja como os microfones convertem sons acústicos em sinais elétricos. Podem ser: piezoresistivos, piezoelétricos, eletromagnéticos ou condensadores.

2.2.1.1 Piezoresistivo

Descrito como um dos mais antigos, o microfone piezoresistivo lustrado na Figura 1 possui um copo metálico com grãos de carbono, pelo qual circula uma corrente elétrica, proveniente da alimentação de uma bateria. Um diafragma metálico é acoplado a um botão de latão que serve de tampa do copo, mantendo os grãos de carbono dentro. Com a incidência de ondas sonoras sobre o diafragma, esse comprime e descomprime os grãos de carbono, variando assim a resistência elétrica. A variação da resistência converte a tensão constante da bateria em uma corrente variável proporcional ao som incidente no diafragma (SPADA, 2013).

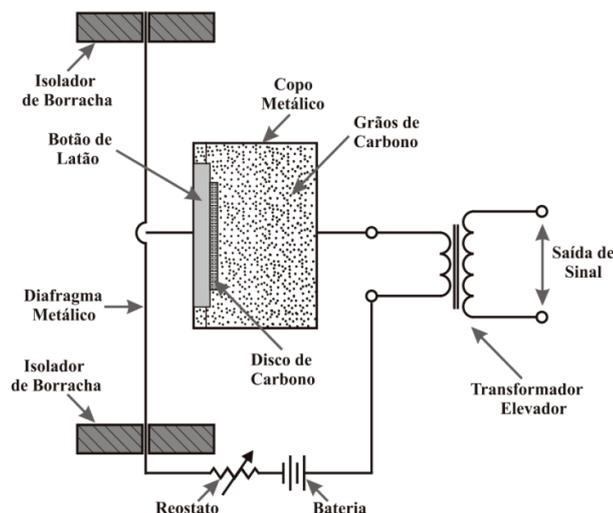


Figura 1 – Microfone Piezoresistivo. Fonte: (SPADA, 2013)

Esses microfones sofrem de flutuações na resistência de contato entre os grãos de carbono mesmo na ausência de excitação. Isso acaba por produzir um nível de ruído mínimo consideravelmente alto e isso limita a aplicação desse tipo de microfone (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013).

Esse tipo de microfone foi muito utilizado em telefones antigos e suas características são durabilidade e baixa qualidade de áudio (VALLE, 2002).

2.2.1.2 Piezoelétrico

O microfone piezoelétrico lustrado na Figura 2 faz uso da propriedade que certos materiais, cristais e cerâmicas, têm de gerar uma tensão em suas extremidades quando deformados. Quando se acopla uma membrana a esses materiais, esses se tornam capazes de captar ondas sonoras e transforma-las em um sinal de tensão (VALLE, 2002).

Em seu trabalho Spada (2013) destaca o uso dos cristais principalmente como captadores em instrumentos musicais, não sendo muito utilizados como microfones devido a sua baixa qualidade de áudio e alta impedância de saída.

No passado, a alta sensibilidade e tensão de saída de tais microfones os tornaram populares para gravadores e aplicações simples onde cabos de conexão curtos eram possíveis. Eles ainda são empregados em alguns medidores de nível de som, porém outras aplicações profissionais são bastante restritas (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013).

2.2.1.3 Eletromagnético

Também chamado de microfone dinâmico, o microfone eletromagnético possui um diafragma de material leve e resistente acoplado a uma bobina, que ao ser excitado por uma

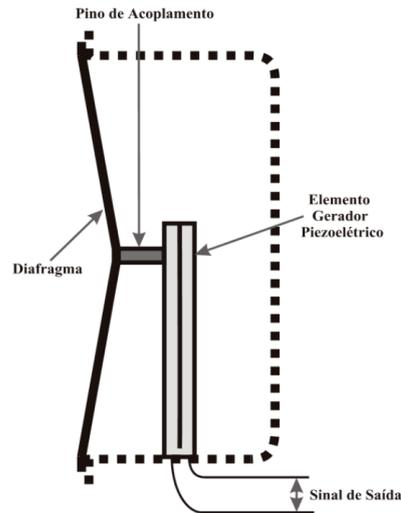


Figura 2 – Microfone Piezoelétrico. Fonte: (SPADA, 2013)

onda sonora se move em relação a um ímã fixo conforme pode ser visto na Figura 3. O movimento da bonina em relação ao ímã causa uma variação no fluxo magnético gerando assim uma força eletromotriz induzida, que é proporcional à fonte sonora (VALLE, 2002).

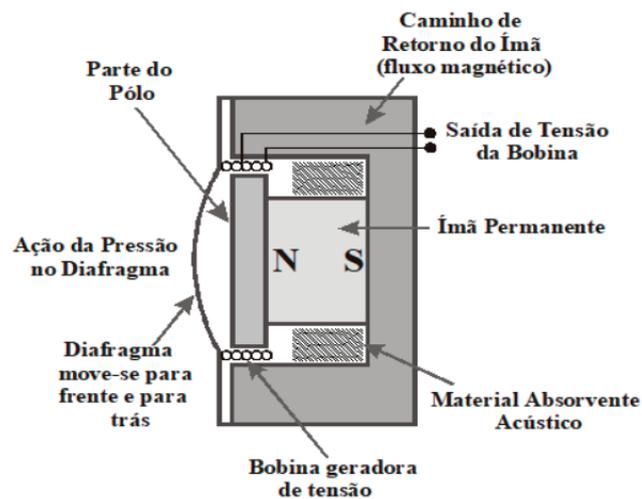


Figura 3 – Microfone Eletromagnético. Fonte: (SPADA, 2013)

Mecanicamente estes microfones são muito resistentes e são capazes de suportar altos níveis de pressão sonora sem que haja distorção do sinal gerado. A resposta a transientes e em frequências altas e baixas é limitada, sendo necessário uma compensação que é feita utilizando pequenas câmaras ressonantes (SPADA, 2013).

2.2.1.4 Condensador

Existem basicamente dois tipos de microfones condensadores (ou capacitivos). Um deles, ilustrado na Figura 4 é formado por um diafragma metálico flexível de baixa massa separado por um *gap* de ar de uma placa paralela de metal rígido, formando assim um capacitor. O diafragma é conectado ao terra e a placa fixa é carregada por meio de um resistor de valor alto por uma tensão.

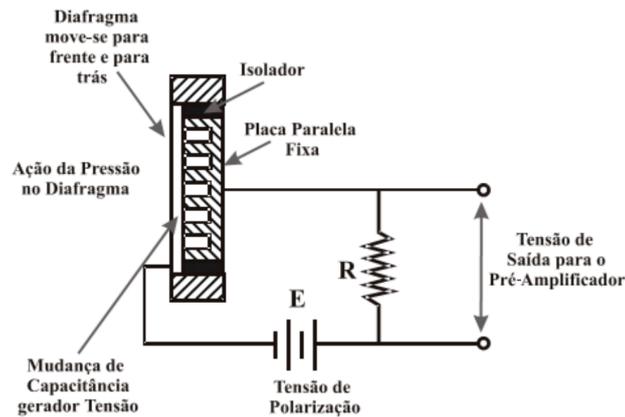


Figura 4 – Microfone Condensador. Fonte: (SPADA, 2013)

O segundo tipo possui forma muito semelhante, porém o diafragma agora é composto por um material polarizado permanentemente, dispensando a necessidade de uma tensão para o carregamento do capacitor. Este é chamado de microfone de eletreto (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013). Como pode ser visto na Figura 5.

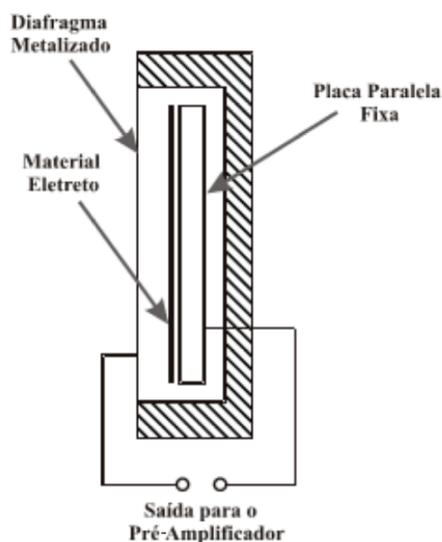


Figura 5 – Microfone de eletreto. Fonte: (SPADA, 2013)

Nos dois casos, com a vibração do diafragma provocada por uma onda sonora, modifica-se a distância entre as placas resultando em uma variação na capacitância. Devido ao alto valor da resistência, a carga no capacitor pode ser considerada constante, portando, com uma variação na capacitância surge uma variação na tensão que é proporcional ao movimento do diafragma (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013).

Para que se evite a descarga do capacitor, se vê necessário a utilização de um circuito de amplificação com alta impedância de entrada, podendo ser, por exemplo, uma válvula ou um transistor de efeito de campo (VALLE, 2002).

Os microfones capacitivos possuem alta sensibilidade devido a flexibilidade do tipo de membrana utilizada e respondem bem a sons de pequena intensidade, captando maior nível de detalhamento do timbre. Além disso, a resposta em frequência é plana produzindo uma sonoridade bem natural (VALLE, 2002).

2.2.2 Padrão Polar

Os microfones podem ser classificados quanto à sua diretividade, ou seja, com qual intensidade o microfone capta o som vindo de diferentes ângulos. Basicamente qualquer padrão polar pode ser obtido a partir da combinação de três padrões fundamentais: Omnidirecional, Unidirecional e Bidirecional (COSTA, 2002).

2.2.2.1 Omnidirecional

Em um microfone omnidirecional ideal, a intensidade com que ele capta o som é constante independente da direção da fonte sonora. O diagrama polar para esse tipo de microfone pode ser visto na Figura 6 e pode-se perceber que a qualquer ângulo de incidência do som esse microfone tem uma atenuação de 0db (COSTA, 2002).

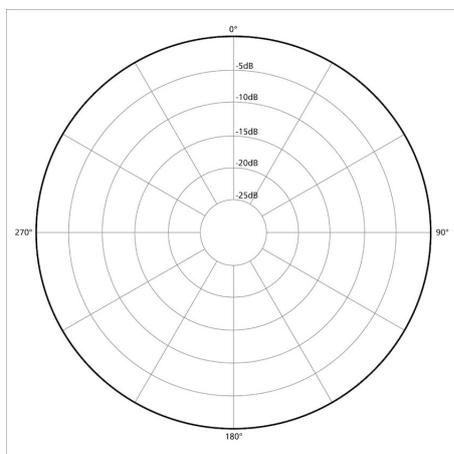


Figura 6 – Diagrama polar omnidirecional. Fonte: <https://magroove.com/blog/pt-br/microfone-omnidirecional/>

Do ponto de vista das aplicações, o som captado por esse tipo de microfone tende a ser mais natural e equilibrado, captando bem as reverberações naturais do ambiente e proporcionando um resultado bem agradável. Devido a essas características esse tipo de microfone é muito utilizado em estúdios onde se deseja boa fidelidade de som, e em aplicações onde se tem fontes sonoras provenientes de várias direções como na captação do som de um coral, por exemplo.

2.2.2.2 Unidirecional

Um microfone unidirecional, dá mais ênfase às fontes sonoras que incidem a cápsula do microfone a um ângulo de 0° em relação ao seu eixo, como visto na Figura 7. Fisicamente, esse tipo de microfone geralmente possui um caminho alternativo à passagem do som, que faz com que o som vindo de um ângulo de 180° chegue defasado em relação ao som que chega a 0° , ocasionando em um cancelamento que reduz a intensidade de som captada. Outro efeito observado nesse tipo de microfone é o efeito de proximidade, que consiste no aumento da resposta em baixas frequências em função da proximidade da fonte sonora (COSTA, 2002).

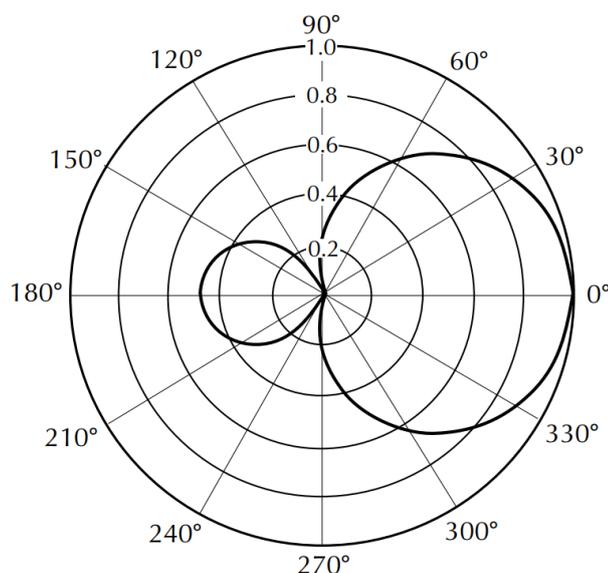


Figura 7 – Diagrama polar Cardióide. Fonte: (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013)

Esse microfone é capaz de isolar melhor uma fonte sonora de ruídos externos, sendo muito utilizado por esse motivo em aplicações ao vivo.

2.2.2.3 Bidirecional

Um microfone bidirecional ou figura em oito, capta bem sons frontais e traseiros, rejeitando os sons vindos das laterais da cápsula, como pode ser visto na Figura 8. Esse microfone geralmente é composto por dois diafragmas com polaridade invertida. O som

vindo das laterais chegam ao mesmo tempo aos dois diafragmas invertidos, resultando em cancelamento. Esse tipo de microfone pode ser usado para captar sons de duas fontes sonoras simultaneamente, como em uma entrevista (COSTA, 2002).

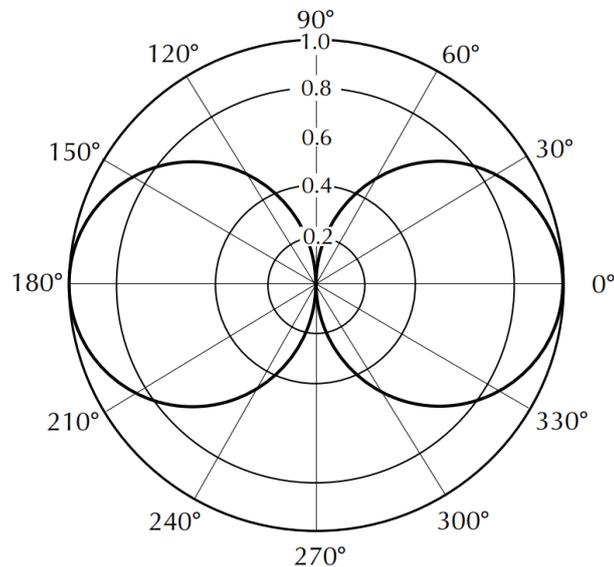


Figura 8 – Diagrama polar Bidirecional. Fonte: (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013)

2.3 Phantom Power

O fornecimento da tensão necessária para alimentação e polarização dos microfones condensadores (de eletreto e capacitivos) é realizado pelo *mixer* através do cabo conectado ao microfone. Esses circuitos são chamados alimentação fantasma ou como mais comumente chamado *phantom power* (SPADA, 2013). A Figura 9 é um exemplo de circuito *phantom power* utilizando transformadores. Do lado do pre-amplificador, uma tensão CC é aplicada aos condutores 2 e 3. Pode-se perceber que o nível CC é igual nos terminais dos transformadores, portando, não há corrente contínua nos enrolamentos do transformador. Para que isso ocorra, os valores das resistências devem ser rigorosamente iguais. Isso é necessário para manter o equilíbrio CC e também manter uma grande taxa de rejeição de modo comum (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013).

Pode-se optar também pelo uso de entradas balanceadas eletronicamente. Nesses casos são utilizados capacitores de acoplamento para isolar o sinal de áudio do nível CC conforme ilustrado na Figura 10.

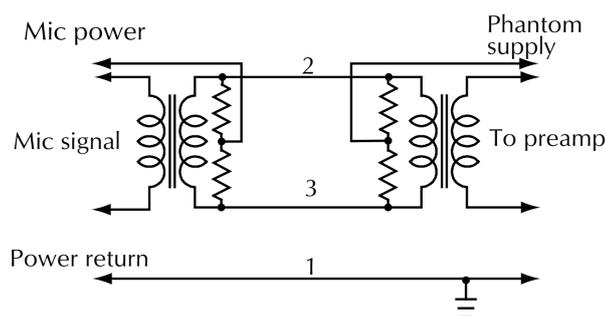


Figura 9 – Circuito phantom power com transformador. Fonte: (DAVIS; PATRONIS; BROWN, 2013)

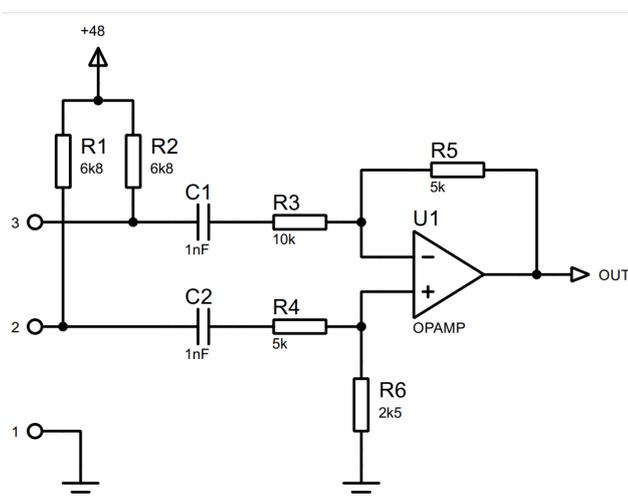


Figura 10 – Circuito phantom power com amplificador operacional. Fonte: Autoria própria

2.4 Ruído

O ruído pode ser entendido como uma interferência que dificulta a obtenção do valor verdadeiro em uma medição. Algumas formas de ruído são inevitáveis, como por exemplo flutuações reais da grandeza que se deseja medir. Fontes de ruído provenientes de interferências de radiofrequências e *loops* de terra podem ser reduzidas ou eliminadas utilizando-se filtros e tendo cautela na configuração e posicionamento da fiação em um circuito elétrico. O próprio sistema de amplificação pode ser uma fonte de ruído e técnicas de projetos de amplificador de baixo ruído podem ser aplicadas nesses casos (HOROWITZ; HILL, 2015).

O ruído pode ser caracterizado por seu espectro de frequência, sua distribuição de amplitude e o mecanismo físico responsável por sua geração. Os principais causadores do ruído são:

- Ruído térmico ou Johnson: É o ruído gerado pelos efeitos térmicos resultantes da

interação entre os elétrons livres e íons vibrantes de um material em condução. Geralmente esses sinais se encontram na casa dos microvolts, mas com amplificação suficientes podem danificar a resposta de um sistema. Esse tipo de ruído possui resposta em frequências relativamente plana. A equação do ruído Johnson é dada pela equação 2.4,

$$v_n = \sqrt{4kTRB} \quad (2.4)$$

onde v_n é tensão RMS do ruído, T é a temperatura em °K, B é a largura de banda analisada, k é a constante de Boltzmann e R é a resistência em Ohms.

- Ruído *Shot* (quântico): Esse ruído tem esse nome por soar como munições de chumbo sendo derramadas em um tambor ou como chuva forte em uma janela. O ruído *shot* tem origem dos portadores de carga que passam através de um meio em taxas desiguais. A equação do ruído *shot* é relativamente simples e dada pela equação 2.5,

$$\text{Noise current } i_n = \sqrt{2qI_{dc}B} \quad (2.5)$$

onde q é a carga de um elétron, I_{dc} é o valor médio da corrente e B é a largura de banda examinada.

- Ruído rosa, *flicker* ou 1/f: causado devido às variações no tempo de trânsito que portadores cruzam as junções de dispositivos semicondutores. Esse ruído normalmente aumenta 1/f em potência e pode ter uma infinidade de causas.

Um sistema também pode sofrer uma interferência externa em forma de ruído. Um bom exemplo disso é o ruído induzido pela rede elétrica numa frequência de 60Hz. Outras fontes de ruído são estações de rádio e televisão, motores elétricos, fontes chaveadas, telefones celulares e redes de internet. A maioria dessas fontes de ruído podem ser controladas utilizando blindagem eletromagnética e filtragem (HOROWITZ; HILL, 2015).

2.5 Distorção Harmônica

Em um amplificador ideal, o sinal de saída é idêntico ao de entrada, exceto por sua magnitude. Em outras palavras, caso a entrada seja uma onda senoidal pura, a saída será uma onda senoidal pura de mesma frequência, com amplitude diferente. Quando isso não ocorre diz-se que o sinal sofreu uma distorção (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

As distorções podem ser impostas por dispositivos que possuem relação não linear entre tensão e corrente, como transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação. Nos amplificadores a distorção pode ser oriunda de um ceifamento

do sinal de saída causado por uma saturação nos limites do amplificador como pode ser visto na Figura 11. A corrente alternada de emissor deve ser menor que 10% da corrente contínua de emissor, $i_e < 0,1I_e$.

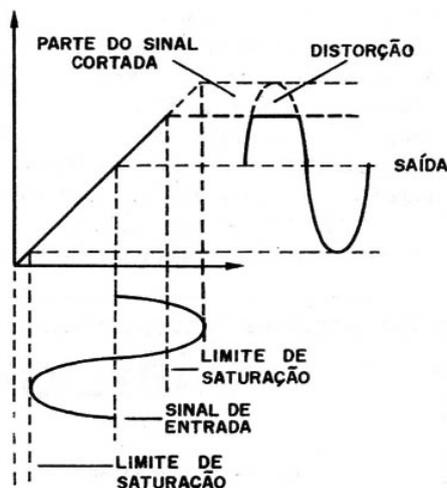


Figura 11 – Saturação do sinal de saída de um amplificador. Fonte: Newton Braga.¹

Devido à curvatura da resposta de um transistor, a corrente do emissor não é uma réplica perfeita da tensão na base, causando alongamentos e compressões de semiciclos alternados. Para diminuir os efeitos da distorção causados por esse fenômeno, o indicado é se trabalhar com pequenas variações da tensão de base, que resulta numa variação da saída mais próximo da linear como exemplificado na Figura 12 (MALVINO; BATES, 2011).

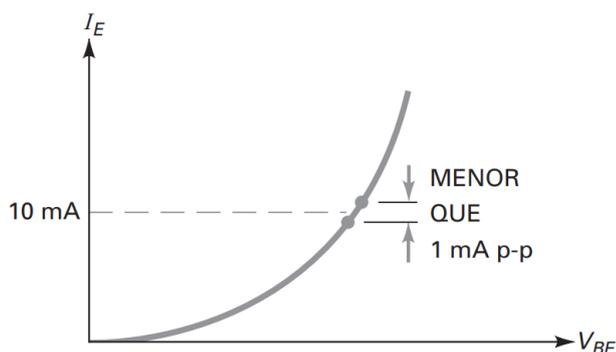


Figura 12 – Definição de operação em pequeno sinal. Fonte: (MALVINO; BATES, 2011)

Por meio de uma análise de Fourier de um sinal senoidal distorcido, pode-se perceber que esse é composto de uma frequência fundamental, correspondente à frequência do sinal e diversas harmônicas, que são, na verdade, múltiplos inteiros da fundamental (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

¹ <https://www.newtonbraga.com.br/index.php/electronica/52-artigos-diversos/10522-distorcão-o-que-voce-deve-saber-art2411>

Em amplificadores em que se deseja boa fidelidade entre o sinal de entrada e o de saída é extremamente importante se trabalhar com a distorção harmônica total, do inglês *total harmonic distortion* (THD) o menor possível. Contudo, um sinal distorcido pode também modificar o timbre do som captado, resultando em sons agradáveis aos ouvidos. Um bom exemplo disso são os pedais de distorção utilizados em guitarras.

2.6 Amplificadores para pequenos sinais

A função dos amplificadores é a de proporcionar níveis maiores para os sinais, agregando uma característica genérica chamada ganho. Um sinal pequeno, difícil de ser utilizado, pode ter seu ganho aumentado e possibilitar a sua utilização. Na Figura 13 pode-se ver o esquema de um amplificador e o ganho que o sinal de saída tem em relação ao sinal de entrada. Esse ganho pode ser de tensão (equação 2.6), de corrente (equação 2.7) ou de potência (equação 2.8). Quando descreve-se a operação de amplificadores de pequenos sinais utiliza-se o ganho de tensão (TOKHEIM, 2013).

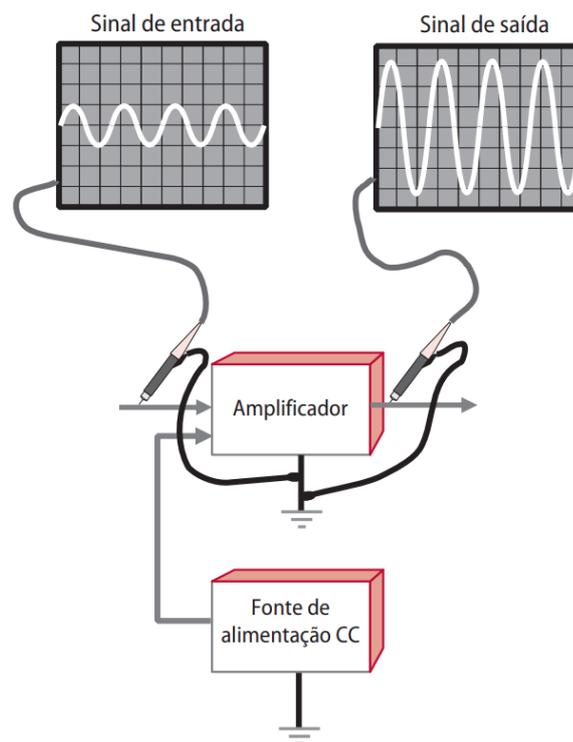


Figura 13 – Esquema de um amplificador. Fonte: (TOKHEIM, 2013)

$$A_V = \frac{V_{s\grave{a}ida}}{V_{e\grave{n}trada}} = \text{ganho de tens\~{a}o} \quad (2.6)$$

$$A_I = \frac{I_{s\grave{a}ida}}{I_{e\grave{n}trada}} = \text{ganho de corrente} \quad (2.7)$$

$$A_P = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \text{ganho de potencia} \quad (2.8)$$

O ouvido humano possui resposta logarítmica ao som e por esse motivo utiliza-se uma escala logarítmica para descrever o desempenho de sistemas de áudio. O ganho normalmente é medido em decibéis(dB) e pode ser determinado a partir da equação 2.9. É interessante observar que logaritmos de números menores que 1 são negativos, logo um amplificador que produzir uma saída menor que sua entrada terá um ganho em decibéis negativo. Outra facilidade que se tem ao se trabalhar com decibéis é que para se calcular o ganho resultante de múltiplos estágios, basta realizar um somatório de todos os ganhos (TOKHEIM, 2013).

$$\text{Ganho dB} = 10 \log_{10} A \quad (2.9)$$

2.7 Filtros

Os filtros são ferramentas fundamentais quando se trabalha com o processamento de sinais e estudá-los auxilia a fortalecer a compreensão de alguns conceitos difíceis como o comportamento dos transistores, realimentação e limitações dos amplificadores operacionais. Quando se trabalha com filtros em sinais analógicos em tempo contínuo, utiliza-se de filtros analógicos, e estes podem ser passivos ou ativos. Os filtros passivos utilizam apenas componentes passivos como resistores, capacitores e indutores. Apesar de mais simples são suficientes em muitas aplicações. Por outro lado existem os filtros ativos, que surgem da combinação de elementos passivos com amplificadores, geralmente amplificadores operacionais. Os filtros ativos podem atenuar ou acentuar determinadas frequências de um sinal, diferentemente dos filtros passivos que trabalham somente atenuando. Os filtros também podem ser utilizados em sinais digitais ou em tempo discreto, sendo implementados via *software*. Um exemplo de um filtro digital simples é o de média móvel, que realiza uma média das últimas amostras, rejeitando variações de frequências mais altas (HOROWITZ; HILL, 2015).

Pelas características deste projeto, optou-se por se aprofundar no estudo dos filtros ativos em tempo contínuo. Na Figura 14 tem-se o exemplo de um filtro passa-baixas de primeira ordem que apresenta um decaimento de 20dB por década a partir da frequência de corte que é dada pela equação 2.10. Abaixo da frequência de corte, o ganho de tensão é constante e pode ser obtido pela equação 2.11 (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

$$f_{OH} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (2.10)$$

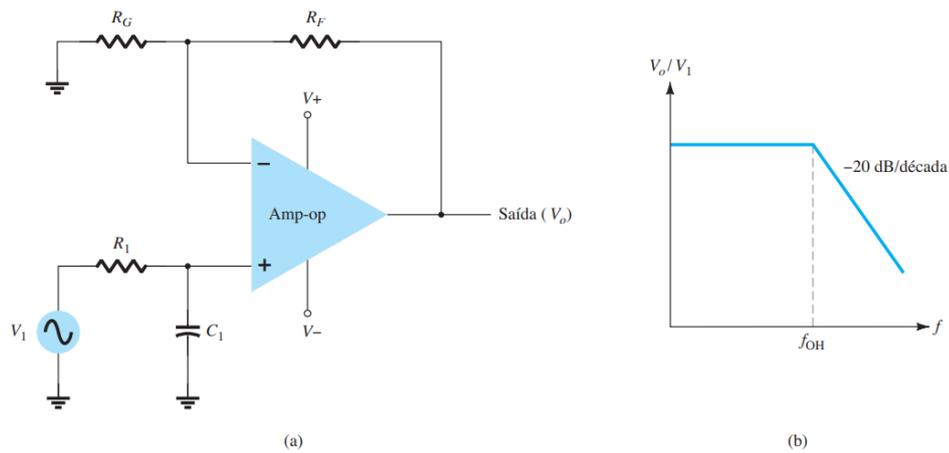


Figura 14 – (a) Filtro passa-baixas ativo de primeira ordem; (b) gráfico da resposta. Fonte: (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

$$A_V = 1 + \frac{R_F}{R_G} \quad (2.11)$$

De maneira similar pode-se construir um filtro passa-altas (Figura 15), em que acima da frequência de corte o ganho é constante e calculado pela equação 2.11. A frequência de corte é dada pela equação 2.12 (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

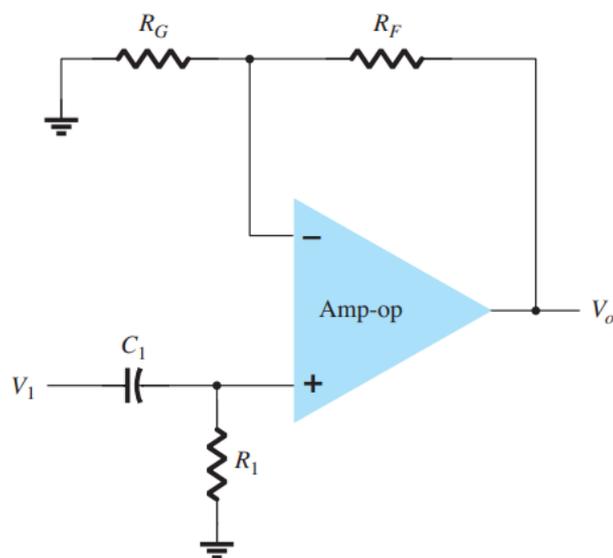


Figura 15 – Filtro passa-altas ativo de primeira ordem. Fonte: (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

$$f_{OL} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (2.12)$$

Os filtros passa-baixas utilizados como limite superior da largura de banda de um sinal de áudio geralmente são de segunda ordem, ou seja, tem decaimento de 40dB por década. Podem ser usados tanto do tipo Butterworth (resposta em frequência maximamente plana) ou Bessel (atraso de grupo maximamente plano) (SELF, 2020). Na figura 16 pode-se ver que os circuitos para os dois filtros são praticamente idênticos, se diferenciando apenas pelos valores dos componentes que resulta nas respostas apresentadas no gráfico da Figura 17.

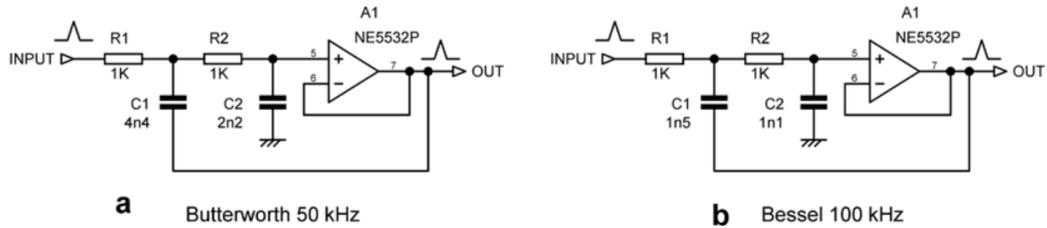


Figura 16 – Filtro passa-baixas de segunda ordem: (a) Butterworth 50KHz; (b) Bessel 100KHz. Fonte: (SELF, 2020)

2.8 Métodos de avaliação de microfones

Dentre as características importantes de um microfone citadas no subcapítulo 2.2, destaca-se a importância de investigar mais a fundo métodos para se avaliar um microfone quanto à resposta em frequência, distorção harmônica e relação sinal ruído (do inglês *signal to noise ratio* - SNR).

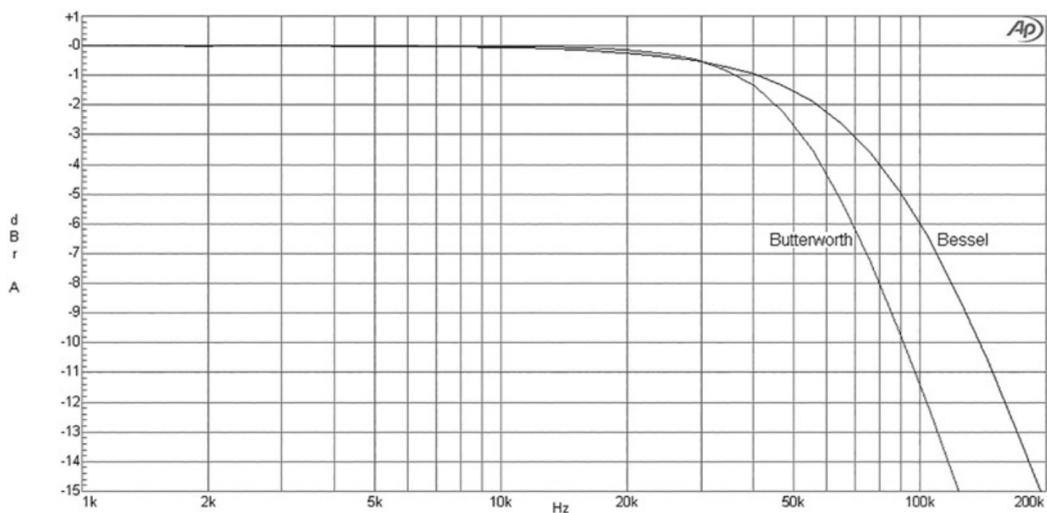


Figura 17 – Resposta em frequência dos filtros Butterworth e Bessel. Fonte: (SELF, 2020)

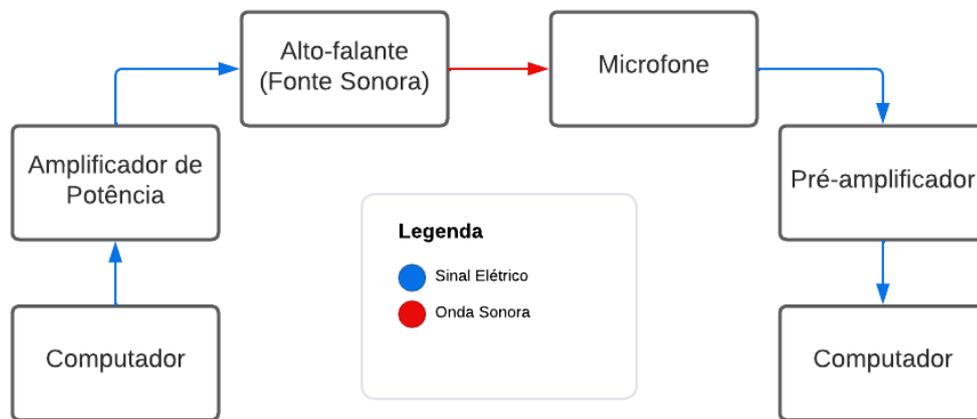


Figura 18 – Diagrama de blocos do sistema para a caracterização dos microfones. Fonte: Adaptado de [Lopes et al. \(2020\)](#)

2.8.1 Avaliação da resposta em frequência

Em seu trabalho, [Lopes et al. \(2020\)](#) realizam um experimento com a finalidade de caracterizar a curva de resposta em frequência de diversos microfones. A metodologia consiste em gerar sons em frequências específicas ao longo de uma faixa de trabalho a partir de uma fonte sonora, captá-los com os diversos microfones e realizar uma análise comparativa entre eles. O diagrama esquemático do experimento pode ser visto na Figura 18.

Devido a longa cadeia que o sinal percorre, é importante estabelecer padrões como o posicionamento da fonte sonora e dos microfones, utilização de suportes que absorvam as vibrações que possam ser transmitidas da base para o microfone e por último, padronização da potência da sonora da fonte e ganho da entrada de áudio. Essas medidas tem a finalidade de garantir boa repetibilidade nos experimentos.

Sabendo que cada microfone possui uma sensibilidade diferente é necessário determinar um valor de referência para que as comparações sejam proporcionais entre si. Esse valor pode ser obtido a partir da equação 2.13

$$p_0 = 10^{\log(p_{eficaz}) - \frac{L_p}{20}} \quad (2.13)$$

onde, L_p = nível de pressão sonora (NPS); $p_{eficaz} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{N}}$; p_0 = Pressão de referência.

O valor de p_0 obtido a partir da equação 2.13 pode ser utilizado para o cálculo do NPS das demais frequências para todos os microfones através da equação 2.14. No gráfico da Figura 19 pode-se ver as curvas de resposta em frequência obtida para cada microfone

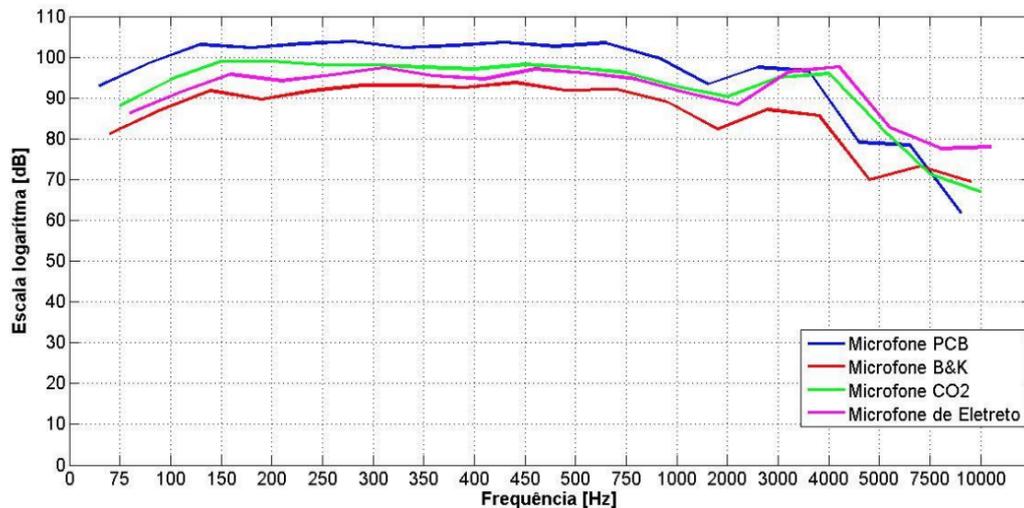


Figura 19 – Curva com os valores dos NPS para os microfones. Fonte: Lopes et al. (2020)

e realizar as análises comparativas entre elas.

$$L_p = 20 \log\left(\frac{p_{eficaz}}{p_0}\right) \quad (2.14)$$

2.8.2 Avaliação da taxa de distorção harmônica

Considerando que a frequência fundamental de um sinal possui amplitude A_1 e o n -ésimo componente de frequência tem uma amplitude A_n ; a distorção harmônica poderá ser definida como na equação, 2.15:

$$\%D_n = \frac{|A_n|}{|A_1|} 100\% \quad (2.15)$$

O nível total de distorção harmônica pode ser obtido combinando as várias componentes harmônicas por meio da equação 2.16:

$$\%THD = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + D_4^2 + \dots} 100\% \quad (2.16)$$

onde THD é a distorção harmônica total (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

2.8.3 Avaliação da relação sinal ruído

A relação sinal ruído pode ser utilizada como indicador de desempenho de amplificadores. É importante lembrar que embora as medições sejam feitas na saída de um amplificador, o sinal de entrada já possui um nível de ruído atrelado. Dessa forma o nível de ruído de um sistema é relativo a contribuição de ruído pelo estágio de entrada. Para mensurar o

impacto da degradação causada pelo ruído em um sinal, utiliza-se a relação sinal-ruído (SNR) que pode ser definida na equação 2.17

$$SNR = 20 \log \frac{v_s}{v_n} \text{ db} \quad (2.17)$$

ou seja, a razão, em decibéis da tensão RMS (v_s) do sinal desejado para a tensão RMS do ruído (v_n) (HOROWITZ; HILL, 2015).

3 Desenvolvimento

3.1 Seleção do microfone

Conforme visto na revisão bibliográfica, existem diversos tipos de microfones, cada qual com suas características e aplicabilidades. Dentre aqueles estudados, optou-se pelo uso do microfone condensador de eletreto por geralmente possuir resposta em frequência plana, pequeno tamanho e baixo custo de aquisição. Devido as suas características esse tipo de microfone é encontrado em variadas aplicações como *headsets*, telefones celulares, microfones de medição, microfones de lapela e captação de instrumentos musicais dentre outras aplicações.

Baseando-se na revisão bibliográfica realizada constata-se que o padrão polar omnidirecional é o que possui resposta mais natural e equilibrada, ou seja boa resposta em frequência. Em uma busca pelos microfones de medição, onde o foco é a resposta em frequência plana, nota-se que na grande maioria dos casos o tipo de elemento transdutor é um microfone condensador de eletreto com padrão omnidirecional. Por esses motivos optou-se pelo uso deste padrão polar.

Os microfones de eletreto são relativamente fáceis de serem encontrados e realmente custam pouco, possibilitando testes com mais de um modelo. Foram testados alguns modelos genéricos de baixo custo ou retirados de sucata porém os resultados não foram satisfatórios, ou pelo elevado nível de ruído ou pela assinatura sonora desagradável. Sendo assim se viu a necessidade de realizar uma busca mais refinada com a finalidade de escolher e adquirir microfones que oferecessem características mais adequadas aos objetivos do projeto. Após pesquisas e comparações, foram adquiridos quatro unidades do microfone WM-61A da Panasonic, que segundo o *datasheet* do fabricante, trata-se de um microfone condensador de eletreto com padrão omnidirecional que foi desenvolvido para ser altamente resistente a vibrações e possui alta relação sinal ruído. Como pode ser visto no gráfico da Figura 20, o microfone responde de 20Hz a 20kHz, apresentando resposta muito plana com um pouco de variação acima de 5000Hz que não representa grandes problemas. As demais especificações do microfone estão disponíveis na tabela 2.

3.2 Circuito básico para funcionamento microfone de eletreto

Conforme visto na revisão bibliográfica, o microfone de eletreto é composto por duas placas paralelas, uma fixa e outra carregada permanentemente (eletreto). As duas placas paralelas possuem uma capacitância que é alterada com a movimentação de uma em

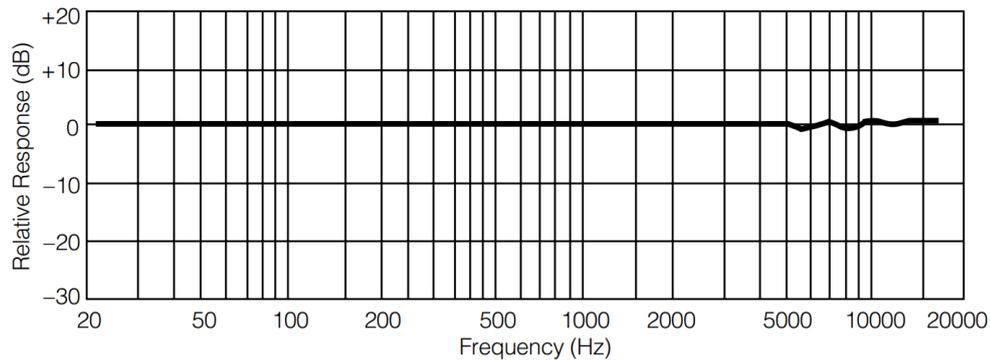


Figura 20 – Curva da resposta em frequência do microfone WM-61A. Fonte: citar datasheet

Tabela 2 – Especificações WM-61A.

Sensibilidade	$-35 \pm 4dB$ ($0dB = 1V/Pa$)
Impedância	Menor que $2,2k\Omega$
Directividade	Omnidirecional
Frequência	20Hz a 20kHz
Tensão máxima de operação	10V
Tensão nominal de operação	2V
Consumo de corrente	Max 0,5mA
Redução de sensibilidade	$-3dB$ a 1,5V
SNR	Maior que 62dB

relação a outra, resultando em uma variação na tensão entre as placas proporcional ao som captado. O sinal gerado é de baixa amplitude e com fornecimento de corrente muito pequeno e por esse motivo os microfones de eletreto já possuem um pequeno JFET encapsulado que serve como amplificador. Para concepção de um circuito simples foi utilizado como base uma configuração com polarização fixa para o JFET, alimentado com uma bateria de 9V. Todo esse esquema está representado na Figura 21.

As pequenas variações de tensão aplicadas ao *gate* de Q1 fazem variar a corrente que circula por Q1. A corrente que circula por Q1 é aproximadamente igual à que circula em RD e essa variação de corrente provoca uma variação na queda de tensão em RD. O sinal resultante possui um ganho de tensão e de corrente em relação ao sinal gerado pelo microfone de eletreto, porém somado com um nível DC.

O cálculo de RD é feito para garantir a tensão nominal e a corrente máxima de operação do microfone. O valor de RD pode ser obtido utilizando-se a equação 3.1. O capacitor C2, comumente chamado capacitor de acoplamento, funciona como um filtro passa-altas e tem a função de bloquear o nível DC para os próximos estágios. Após o cálculo de RD e escolha de uma frequência de corte, pode-se utilizar a equação 3.2 para

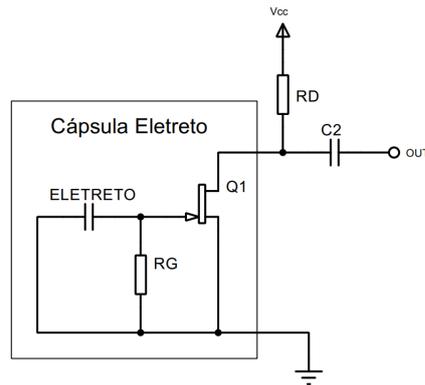


Figura 21 – Microfone eletreto com circuito de polarização fixa. Fonte: Autoria própria

encontrar o valor de $C2$.

$$RD = \frac{V_{cc} - V_{mic}}{I_{max}} \quad (3.1)$$

$$C2 = \frac{1}{2\pi R_D f_c} \quad (3.2)$$

Em muitas aplicações o circuito apresentado é suficiente mas pode apresentar algumas limitações. O ganho máximo que pode-se obter é limitado pelas características de operação do JFET já incorporado à capsula do microfone. A resposta do sistema é fortemente condicionada à impedância da carga conectada à saída do circuito.

3.3 Pré amplificador com amplificador operacional

Com a finalidade de amenizar os problemas citados no capítulo 3.2, utilizou-se um circuito com amplificador operacional que proporciona um estágio adicional de ganho e melhor isolamento entre a saída do primeiro circuito e os próximos estágios. Escolheu-se utilizar uma adaptação de um circuito inversor por possuir maior estabilidade e fidelidade. Como não se dispunha de uma alimentação simétrica (+9V e -9V), criou-se um sinal de referência a partir de um divisor de tensão utilizando os resistores $R1$ e $R2$ e o capacitor $C1$ servindo como filtro passa baixas. Conectou-se esse sinal ao terminal não-inversor do amplificador operacional. Devido a baixíssima corrente consumida pela entrada dos amplificadores operacionais, escolheu-se utilizar $R1 = R2 = 100k\Omega$. Considerando uma frequência de corte de pelo menos 1Hz, $C1 > \frac{1}{2\pi(R1||R2)} = 3,15\mu F$. Conectou-se ao terminal inversor o sinal vindo do circuito de polarização do microfone. O circuito proposto está ilustrado na Figura 22. O ganho em dB do circuito amplificador neste caso pode ser obtido pela

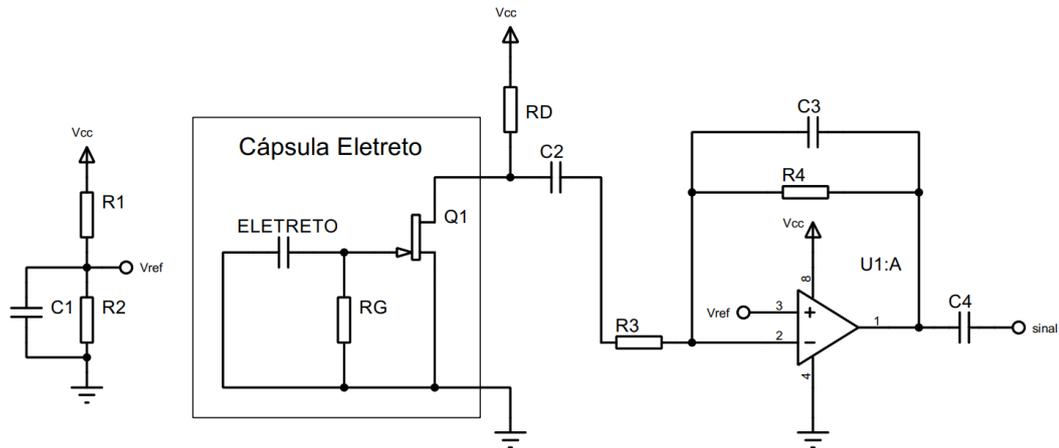


Figura 22 – Circuito com configuração inversor. Fonte: Autoria própria.

equação 3.3. Já a frequência de corte pode ser obtida utilizando-se a equação 3.4.

$$\text{Ganho } dB = 10 \log \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (3.3)$$

$$C3 = \frac{1}{2\pi R_4 f_c} \quad (3.4)$$

A alta impedância de entrada e a baixa impedância de saída que o amplificador operacional diminui consideravelmente a influência que a carga tem sobre a resposta do sistema. Com esse circuito é possível controlar bem o ganho e as frequências de corte do sistema.

3.4 Saída balanceada

Os microfones geralmente são conectados a consoles de mixagem ou interfaces de áudio por meio de cabos, que introduzem ruídos que degradam o sinal. Para minimizar esse efeito indesejado, pode-se utilizar uma saída balanceada, que consiste em transmitir o sinal por um par trançado de fios. Em um dos fios o sinal transmitido é o original e no outro fio o sinal enviado é uma cópia invertida do original. Do lado receptor, os dois sinais são subtraídos e o resultado é um sinal com o dobro de amplitude do original. Devido ao fato de que o ruído que incide sobre os dois fios são praticamente idênticos, a subtração dos dois sinais resulta em um nível de ruído muito menor, melhorando a relação sinal ruído.

Para se obter um sinal invertido do microfone de eletreto, optou-se por modificar a polarização do JFET, acrescentando um resistor ao *source* do mesmo, como pode ser visto na Figura 23. Essa nova configuração permite que se tenha uma cópia invertida do sinal

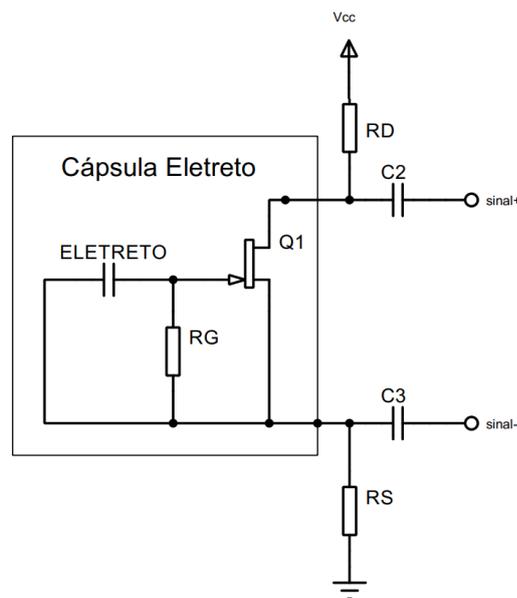


Figura 23 – Microfone com saídas normal e invertida. Fonte: Autoria própria.

de saída do microfone, que será útil para a amplificação diferencial. Fazendo $R_D = R_S$, podemos realizar o cálculo dos valores das resistências a partir da equação 3.5. O cálculo de C1 e C2 pode ser feito da mesma forma como anteriormente a partir da equação 3.2.

$$R_D = R_S = \frac{V_{cc} - V_{mic}}{2I_{max}} \quad (3.5)$$

Para que a saída invertida também seja amplificada, replicou-se o circuito mostrado na Figura 22 resultando em uma amplificação simétrica mostrada na Figura 24. Vale ressaltar que para alcançar altas taxas de rejeição em modo comum, os dois circuitos devem ser o mais parecidos possível, sendo importante a utilização de componentes com boa precisão e valores muito próximos. Na prática, mediu-se e selecionou-se componentes com os valores mais parecidos o quanto possível.

3.5 Circuito de alimentação utilizando Phantom-Power

Como visto anteriormente, os consoles de mixagem e interfaces de áudio possuem junto de suas entradas balanceadas um sistema de alimentação denominado phantom-power que pode ser utilizado para alimentação do circuito, dispensando o uso de baterias ou fontes externas. Para se beneficiar deste recurso, o circuito de alimentação mostrado na Figura 25 foi desenvolvido.

Através de uma conexão XLR de 3 terminais tem-se a alimentação *phantom power* e o sinal de áudio. Os terminais 2 e 3 têm uma diferença de potencial de 48V em relação

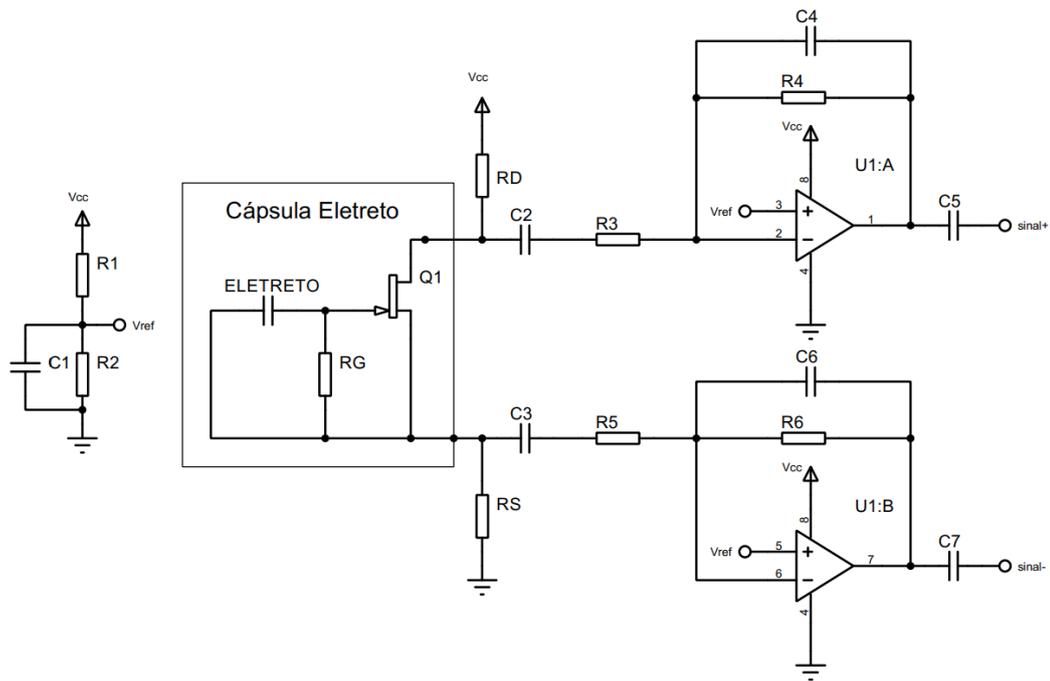


Figura 24 – Microfone com saídas normal e invertida seguidas de um estágio de amplificação. Fonte: Autoria própria.

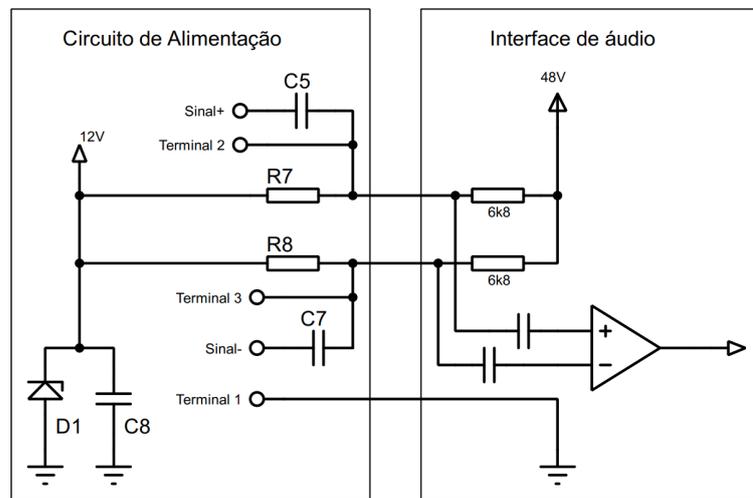


Figura 25 – Circuito de alimentação. Fonte: Autoria própria

ao terminal 1. O terminal 1 é conectado à malha de blindagem do cabo e aterrado internamente na placa de som. Ao terminal 2 é conectado o sinal+ e ao terminal 3 é conectado o sinal-. Dessa forma temos os 2 sinais de áudio somados a um nível DC de 48V, sendo de extrema importância o uso de capacitores de acoplamento ($C5$ e $C7$) ligados às saídas que funcionam como um passa altas para o sinal e um passa baixas para a alimentação. Ainda na interface de áudio, a tensão de 48V é aplicada aos terminais 2 e 3 através de

resistores com valores padrão de $6,8k\Omega$.

A tensão de alimentação máxima recomendada para os amplificadores operacionais utilizados é de $-15V$ a $15V$, conforme descrito no datasheet do mesmo. Escolheu-se alimentar o circuito com $12V$, tendo em vista uma margem de segurança ao limite máximo especificado pelo fabricante. Para garantir uma tensão constante de $12V$ utilizou-se um diodo zener como regulador de tensão. Os resistores $R7$ e $R8$ têm a função tanto de isolar o sinal de áudio do circuito de alimentação quanto controlar a corrente consumida, evitando perdas desnecessárias no diodo zener. Dessa forma $R7$ e $R8$ devem ter o maior valor possível para isolar a saída de áudio e que garanta a corrente consumida pelo circuito. Fazendo $R7 = R8$, pode-se calcular os valores a partir da equação 3.6.

$$R_7 = R_8 = \frac{2(48V - 12V)}{I_{min}} - 6,8K\Omega \quad (3.6)$$

3.6 Cálculos do circuito final

Para que se obtivesse um ganho semelhante entre o microfone C01 utilizado como padrão de comparação e o microfone projetado, utilizou-se um método empírico para a obtenção do ganho utilizado nos circuitos de amplificação. Utilizando-se de um potenciômetro duplo de $10k$, foi possível obter uma proporção $\frac{R4}{R3} = \frac{R6}{R5}$ utilizada para estipulação de um ganho aproximado de $3,2dB$. Os demais componentes foram calculados utilizando-se das equações citadas nos capítulos anteriores. Os valores calculados e os utilizados na prática podem ser vistos na tabela 3. É interessante ressaltar que em alguns casos os valores utilizados divergem dos calculados pela disponibilidade dos componentes no momento da montagem.

Tabela 3 – Especificação dos componentes

Componente	Valor Calculado	Valor Utilizado
$R_D = R_S$	$10k\Omega$	$10k\Omega$
$R_1 = R_2$	$100k\Omega$	$100k\Omega$
$R_3 = R_5$	Empiricamente	$4,7k\Omega$
$R_4 = R_6$	Empiricamente	$6,8k\Omega$
$R_7 = R_8$	$11,19k\Omega$	$10k\Omega$
C_1	$3,18\mu F$	$4,7\mu F$
$C_2 = C_3$	$796nF$	$1\mu F$
$C_4 = C_6$	$1,17nF$	$2,2nF$
$C_5 = C_7$	$1,17\mu F$	$1\mu F$
C_8	$53\mu F$	$100\mu F$
D_1	$12V$	$12V(1n4742a)$

3.7 Simulações utilizando software Proteus

Antes da realização da montagem dos componentes é bastante útil a realização de simulações que confirmem o funcionamento do circuito, ajudando a prevenir erros de montagem que possam ocasionar em acidentes e danificação dos componentes.

Para validar a rejeição de ruído em modo comum, simulou-se sinais de entrada diferenciais (invertidos) com frequência de 1kHz e amplitude de 20mV e um ruído branco com amplitude de 20mV aplicado em modo comum, simulando dessa forma um sinal de áudio de 1kHz sendo degradado ao longo de um cabo por um ruído de mesma amplitude, conforme ilustrado na Figura 26. Em seguida ligou-se o sinal+ aos canais A e C do osciloscópio e o sinal- aos canais B e D. Na Figura 27 pode-se ver o sinal+ no canal C em rosa e o sinal- no canal D em verde. Nota-se que esses sinais estão bem degradados devido a ação do ruído aplicado a eles. Em amarelo vemos a soma do sinal do canal A (sinal+) com o inverso do sinal do canal B (sinal-), simulando a subtração dos dois sinais, resultando em um sinal senoidal íntegro com frequência de 1kHz. Cabe lembrar que em uma simulação como essa tem-se o privilégio de se considerar os componentes como sendo ideais, alcançando resultados perfeitos. Ainda assim pode-se utilizar essa simulação para colaborar com a confirmação do correto funcionamento do circuito no que diz respeito a rejeição do ruído.

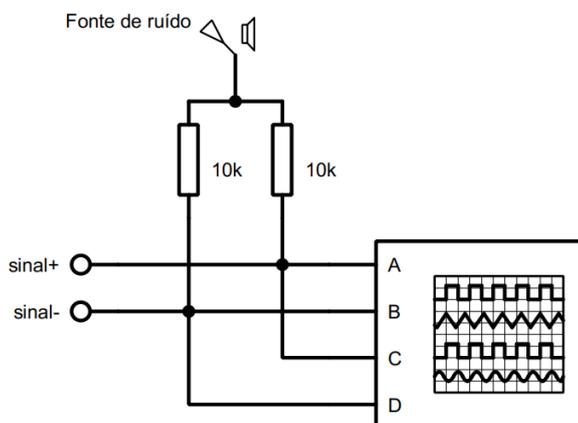


Figura 26 – Circuito utilizado na simulação de rejeição em modo comum. Fonte: Autoria própria

Além da possibilidade da simulação de um osciloscópio, o Proteus conta também com a geração de diversos tipos de gráficos para a análise de sinais. Na Figura 28 tem-se os gráficos da resposta em frequência, análise de Fourier e análise de ruído.

Para o gráfico de resposta em frequência observa-se uma resposta plana na região de interesse com um ganho de 29,5dB. A 20Hz tem-se 27dB (-2,5dB do ganho) e a 20kHz tem-se 28dB(-1,5dB do ganho).

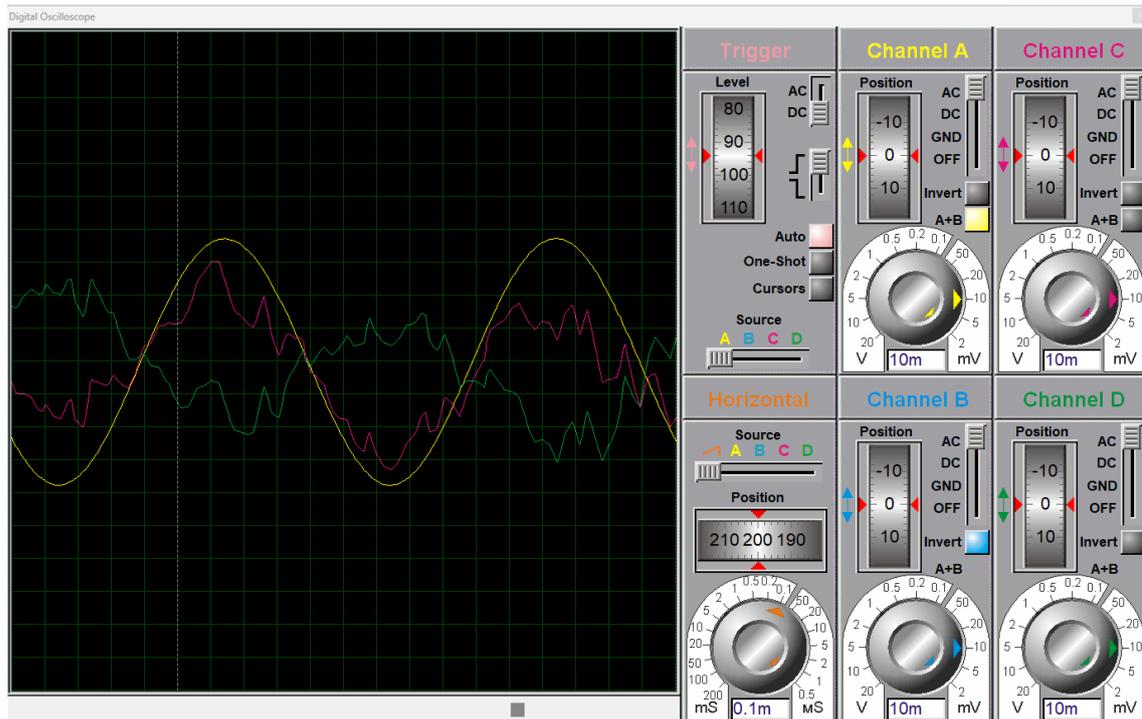


Figura 27 – Simulação de rejeição em modo comum. Fonte: Autoria própria

A partir da análise de Fourier pode-se calcular o %THD a partir da equação 2.16. Olhando para o gráfico é difícil visualizar com precisão os valores das amplitudes das harmônicas, porém obteve-se esses valores diretamente no Proteus, possibilitando a realização dos cálculos e obtenção do valor do THD de 0,61%. Já a partir do gráfico de ruído obtém-se uma relação sinal ruído de 152,5dB.

Após a simulação e validação do circuito projetado realizou-se a montagem do mesmo em *protobaord*, buscando sempre que possível manter a simetria do circuito, escolhendo por componentes de valores o mais próximos possível. O resultado da montagem pode ser visto na Figura 29. Do lado esquerdo da imagem tem-se o cabo de conexão com o microfone e do lado direito o cabo que conecta o circuito à interface de áudio.

3.8 Experimentos de teste utilizando Matlab

Três critérios foram escolhidos para a avaliação do desempenho do microfone projetado: resposta em frequência, THD e SNR. Para que se obtenha resultados realmente confiáveis, idealmente esse tipo de teste deve ser realizando utilizando-se de padrões de emissão sonora calibrados e em uma sala com acústica rigorosamente tratada para que as reflexões do som não influenciem nos resultados dos testes. Calibrações desse nível acabam por ter custo elevado e fogem do escopo do atual projeto e uma alternativa mais simples foi

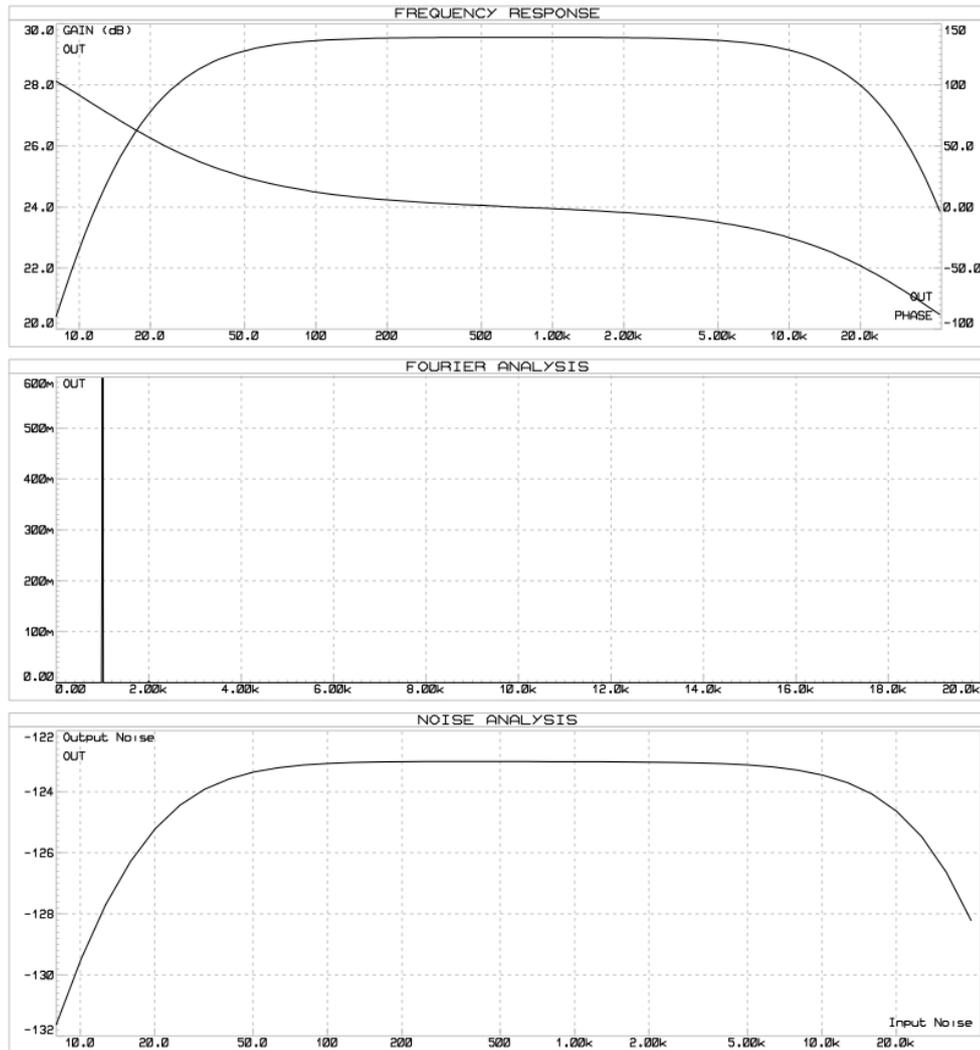


Figura 28 – Análise do circuito simulado no Proteus. Fonte: Autoria própria

proposta para se ter uma ideia do nível de qualidade que foi possível alcançar neste projeto.

A proposta é realizar medições e comparações entre o microfone C01 da marca Samson e o microfone construído neste projeto. Os testes baseiam-se na emissão de sons em frequências específicas em uma caixa de som e capta-los pelos dois microfones se atentando em manter um padrão entre eles, como volume do som reproduzido, posicionamento dos microfones em relação à fonte sonora e mesmo ganho de entrada na placa de áudio. Para minimizar as interferências por reflexões na sala, foi escolhido posicionar os microfones a uma curta distância da caixa de som (15cm) e todo o conjunto foi posicionado distante de paredes e solo, como pode ser visto na figura 30. O nível de som emitido foi de aproximadamente 40% da capacidade total, para que se tivesse um nível sonoro considerável, sem se preocupar muito com as distorções geradas no próprio sistema de

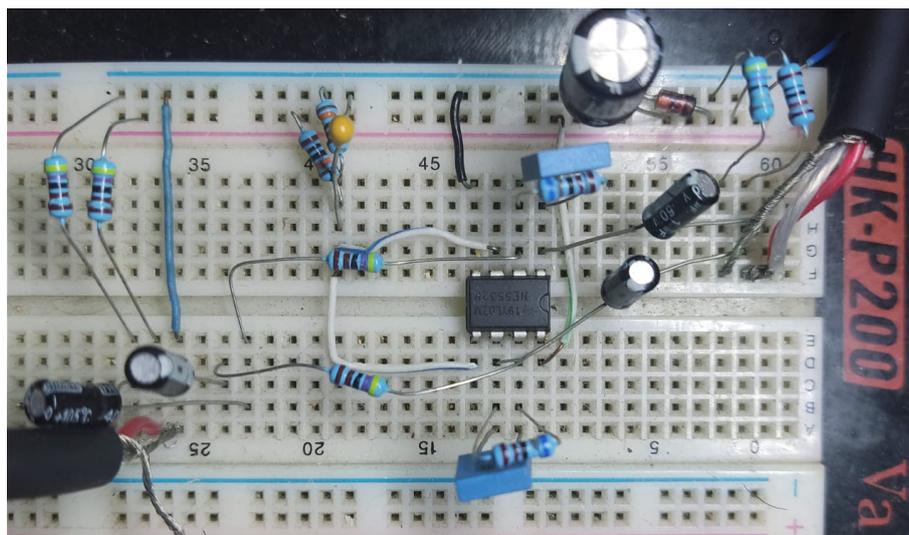


Figura 29 – Montagem do circuito em protoboard. Fonte: Autoria própria

reprodução. O ganho escolhido para ambos os microfones foi o mesmo (80%) e regulado de tal forma que o ganho seria o máximo possível sem o risco de distorção do sinal na entrada da interface de áudio.

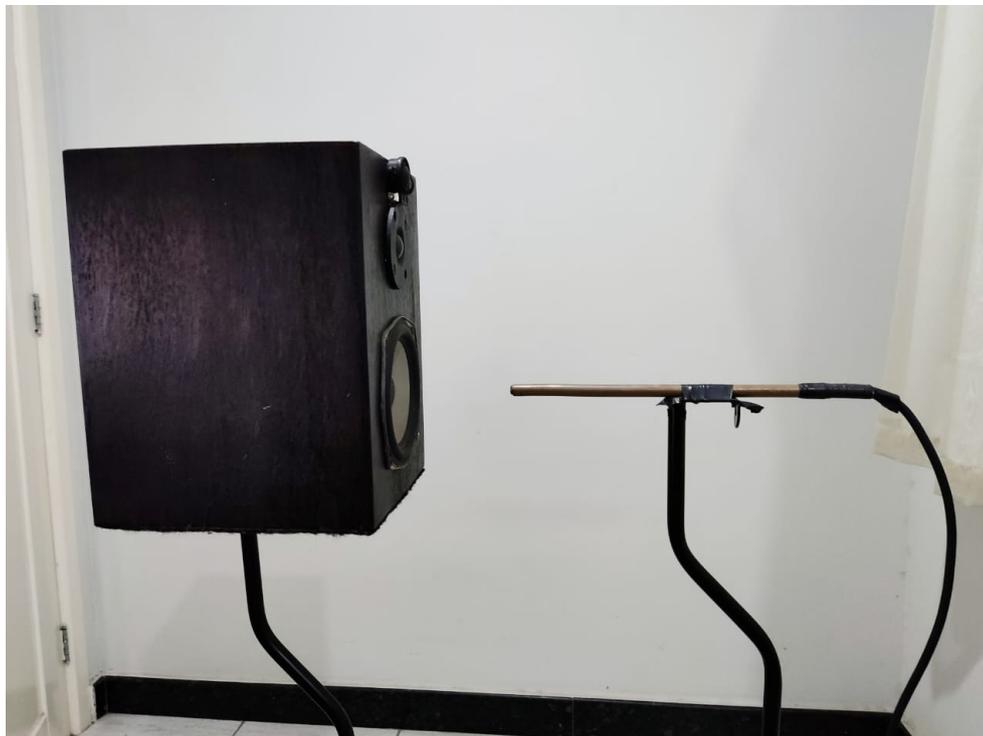


Figura 30 – Posicionamento do microfone WM-61A para realização dos experimentos. Fonte: Autoria própria

Para a obtenção da curva de resposta em frequência dos microfones foram escolhidas 20 frequências entre 20Hz e 20kHz sendo elas: 29Hz; 72Hz; 144Hz; 230Hz; 359Hz; 517Hz; 718Hz; 991Hz; 1335Hz; 1766Hz; 2311Hz; 3015Hz; 3876Hz; 4967Hz; 6331Hz; 8025Hz; 10135Hz; 12762Hz; 15992Hz; 19997Hz e realizadas 3 medições em cada uma delas para cada um dos microfones. Já para a obtenção dos valores de THD e SNR, um sinal com frequência de 1kHz foi gerado e captado pelos microfones, permitindo que a partir da análise das componentes harmônicas, esses valores possam ser mensurados.

Utilizou-se o Simulink do Matlab para a realização dos experimentos. O Simulink disponibiliza uma série de ferramentas para simulações e realização de experimentos, incluindo uma série de blocos dedicados ao processamento de áudio. Utilizou-se o bloco "Wavetable Synthesizer" para gerar sinais periódicos que foram enviados para a interface de áudio através do bloco "Audio Device Writer" e reproduzidos pela sistema de som. O som é então captado pelos microfones e o bloco "Audio Device Reader" captura esse sinal e envia para o *Spectrum Analyzer*. Uma captura de tela do diagrama feito no Simulink está apresentando na Figura 31.

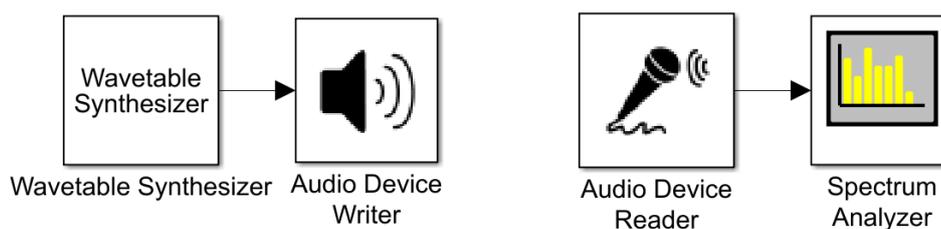


Figura 31 – Diagrama do experimento no Simulink/Matlab. Fonte: Autoria própria

O analisador de espectro do Simulink facilitou muito o trabalho de captação e análise dos resultados, já que esse oferece ferramentas como detecção de pico, frequência, amplitude em diversas métricas, medição THD e SNR. Na Figura 32 tem-se um exemplo de utilização onde o analisador identifica as 6 primeiras harmônicas do sinal de um dos microfones e calcula o THD e o SNR.

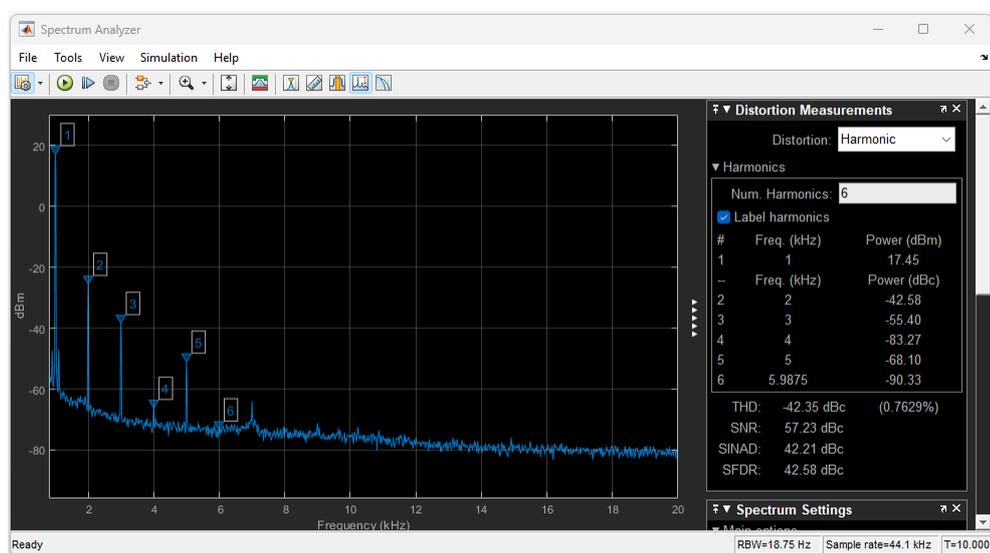


Figura 32 – Ferramenta de análise de espectro do Simulink/Matlab. Fonte: Autoria própria

4 Resultados

4.1 Resposta em frequência

Nas tabelas 4 e 5 estão apresentadas as medições realizadas para os 2 microfones juntamente com a média das 3 medições em cada frequência medida. Para os dois microfones notou-se pouca variação entre as medições, que é indicativo de boa repetibilidade e confiabilidade nos resultados obtidos.

Para construção do gráfico da resposta em frequências, foi utilizado um tipo de normalização nos dados para facilitar a posterior análise do gráfico. Utilizando-se a equação 4.1 calculou-se o valor médio das médias ($\bar{\bar{x}}$) das medições dos dois microfones, desconsiderando os valores para 29Hz, 72Hz, 15991Hz e 19997Hz, já que esses valores estão em uma região de *roll-off* que faz com que esses valores sejam muito discrepantes do restante do conjunto de dados. O valor $\bar{\bar{x}}$ obtido foi subtraído de cada valor médio para cada frequência nos dois microfones para obtenção dos dados normalizados utilizando-se a equação 4.2.

$$\bar{\bar{x}} = \sum \frac{\bar{x}_i}{n} \quad (4.1)$$

$$m_i = \bar{x}_i - \bar{\bar{x}} \quad (4.2)$$

Na Figura 34 vê-se as curvas de resposta dos microfones. De maneira geral a resposta dos dois microfones se mostrou bem linear, principalmente na região entre 200Hz e 5000Hz. Possivelmente as regiões abaixo de 100Hz e acima de 16kHz são regiões onde a caixa de som utilizada não responde muito bem, implicando em pouca credibilidade nas medições realizadas nessa região. Ainda assim nota-se que nas baixas frequências, o microfone projetado tem maior atenuação que o C01. Isso pode facilmente ser corrigido diminuindo a frequência de corte dos filtros passa altas do circuito. Como ilustrado na Figura 33, pode-se observar boa correlação entre as medições dos dois microfones. O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,916 e na maioria das medições a diferença foi entre 2dB e 4dB, colaborando com a ideia de que provavelmente a fonte das variações que ocorreram provêm do sistema reproduzidor de som e não da captação dos microfones.

Aplicando-se um sinal de varredura de frequências variando entre 40Hz e 22kHz, coletou-se ou dados de valores máximos obtidos a partir do microfone WM-61A, com a finalidade de se obter uma curva de resposta mais detalhada do microfone projetado. O resultado está plotado no gráfico da Figura 35. Claramente pode-se ver que a curva

Tabela 4 – Dados da resposta C01. M1, M2 e M3 representam as três medições feitas para cada frequência.

f(Hz)	M1(dBm)	M2(dBm)	M3(dBm)	Média(dBm)
29	-7,97	-7,94	-7,75	-7,89
72	9,96	9,94	9,99	9,96
144	23,97	23,97	23,97	23,97
230	23,33	23,34	23,35	23,34
359	23,26	23,24	23,31	23,27
517	21,41	21,52	21,57	21,50
718	19,92	20,13	19,63	19,89
991	23,28	23,10	22,96	23,11
1335	22,11	22,06	22,02	22,06
1766	17,58	17,40	17,02	17,34
2311	17,72	17,08	17,67	17,49
3015	18,26	18,56	18,17	18,33
3876	19,48	19,39	19,49	19,45
4967	21,53	20,89	21,26	21,23
6331	27,42	27,42	27,43	27,42
8025	12,39	12,27	12,18	12,28
10135	20,78	21,60	21,55	21,31
12762	18,98	18,37	18,71	18,69
15992	6,66	4,79	6,51	5,99
19997	-5,05	-5,33	-5,62	-5,34

Intensidade WM-61A (dB) versus Intensidade C01 (dB)

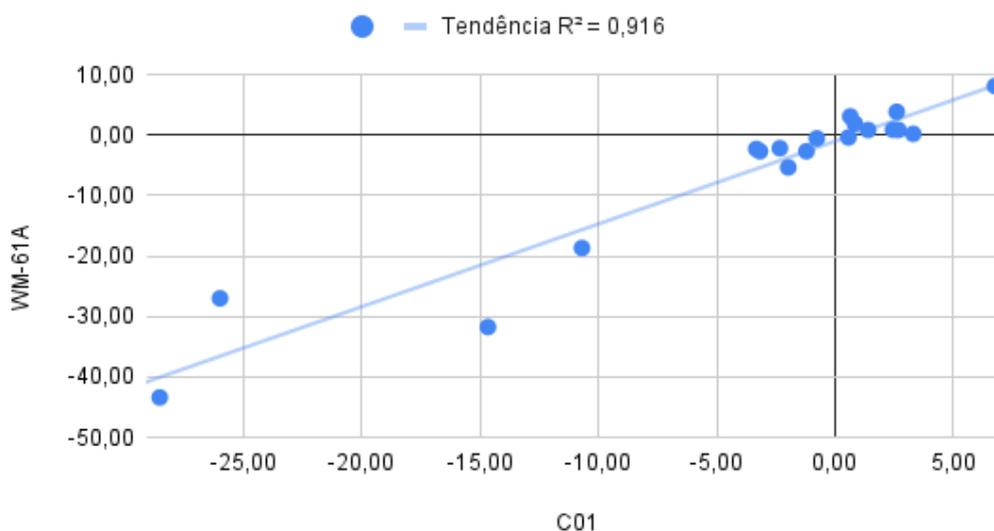


Figura 33 – Correlação entre os microfones C01 e WM-61A. Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Dados da resposta WA-61A. M1, M2 e M3 representam as três medições feitas para cada frequência.

f(Hz)	M1(dBm)	M2(dBm)	M3(dBm)	Média(dBm)
29	-23,26	-23,45	-22,41	-23,04
72	1,69	1,67	1,67	1,68
144	20,55	20,56	20,55	20,55
230	21,17	21,19	21,23	21,20
359	24,13	24,14	24,33	24,20
517	22,15	22,25	22,39	22,26
718	19,73	20,27	19,41	19,80
991	21,46	21,01	21,21	21,23
1335	21,22	21,34	21,01	21,19
1766	18,01	17,65	18,51	18,06
2311	17,63	17,33	18,04	17,67
3015	17,45	18,69	18,39	18,18
3876	17,84	17,91	17,25	17,67
4967	20,03	19,45	20,38	19,95
6331	28,41	28,45	28,50	28,45
8025	18,17	16,37	15,43	16,66
10135	23,24	23,65	23,41	23,44
12762	14,94	14,60	15,46	15,00
15992	-12,56	-12,42	-9,18	-11,39
19997	-6,92	-7,66	-5,37	-6,65

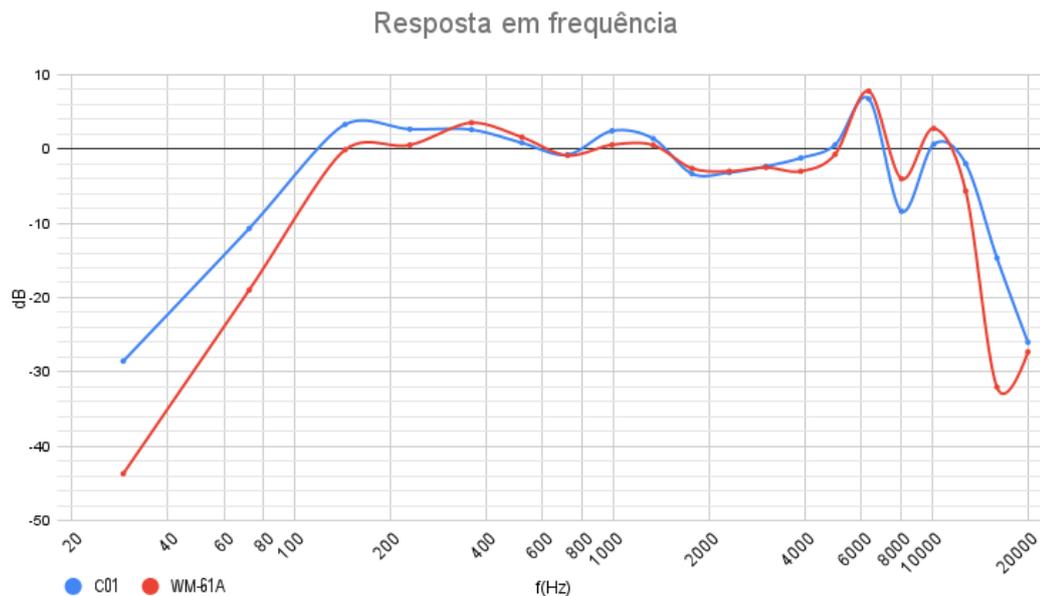


Figura 34 – Resposta em frequência dos dois microfones. Fonte: Autoria própria

obtida não é completamente linear como a mostrada na Figura 20 retirada do *datasheet* do fabricante e essa diferença pode ser explicada pelas dificuldades em se obter a resposta do microfone sem um ambiente controlado. A primeira dificuldade é que a verdadeira resposta da caixa de som utilizada como fonte sonora não é conhecida, impossibilitando algum tipo de correção das medições. A realização das medições em campo próximo é uma ação tomada para reduzir a interferência das reflexões da sala mas que intensifica os erros provocados pelo mal posicionamento dos microfones em relação à fonte sonora, além de não satisfazer a condição de campo afastado.

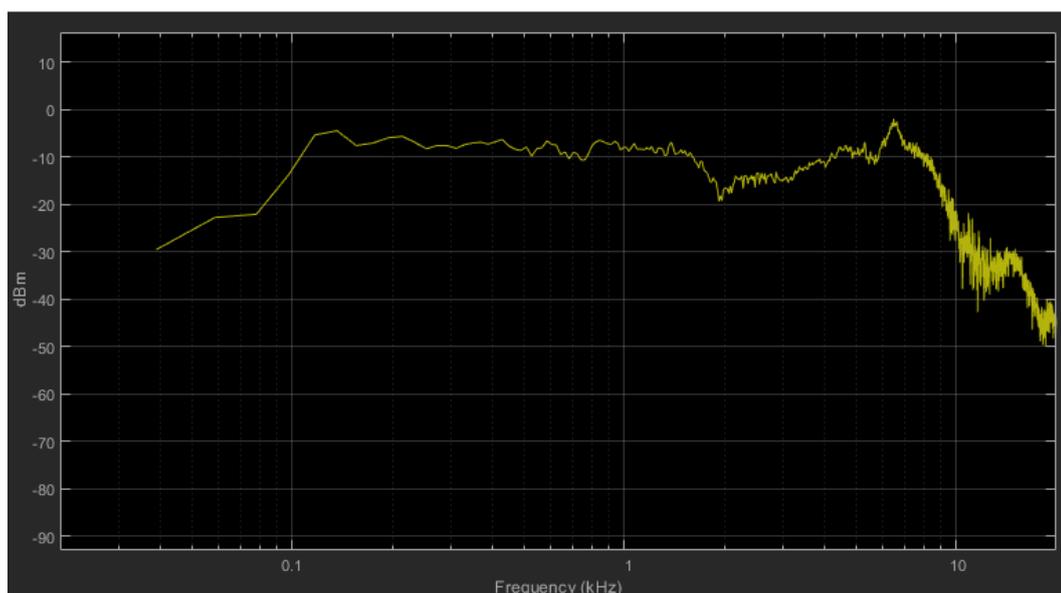


Figura 35 – Resposta do microfone WM-61A para varredura de frequências entre 40Hz e 22kHz. Fonte: Autoria própria

4.2 THD e SNR

Para a obtenção dos valores de THD e SNR, gerou-se uma frequência de 1kHz e mediu-se a amplitude da frequência fundamental e das frequências harmônicas de 2 à 6 e os valores estão dispostos nas tabelas 6 e 7. Nota-se que na frequência fundamental a amplitude do sinal captado pelos dois microfones é praticamente idêntica. Comparando as harmônicas pode-se ver diferenças bem consideráveis. No microfone C01, a harmônica que mais se aproxima da fundamental em amplitude é a de número 3, com diferença de 58,17dB da fundamental. Já no WM-61A a harmônica com maior amplitude foi a de número 2 com 42,58dB de diferença da fundamental. Na prática tem-se diferenças não só de THD e SNR, mas também uma diferença no timbre do microfone.

Os cálculos de THD e SNR foram realizados pelo analisador de espectro do Simulink e os resultados estão apresentados na tabela 8. O microfone projetado teve THD de

Tabela 6 – Harmônicos C01

# Harmônico	Frequência(Hz)	Potencia(dBm)
1	1000	17,75
# Harmônico	Frequência(Hz)	Potencia(dBc)
2	2000	-64,83
3	3000	-58,18
4	4000	-91,94
5	5000	-69,03
6	6000	-93,84

Tabela 7 – Harmônicos WM-61A

# Harmônico	Frequência(Hz)	Potencia(dBm)
1	1000	17,45
# Harmônico	Frequência(Hz)	Potencia(dBc)
2	2000	-42,58
3	3000	-55,40
4	4000	-83,27
5	5000	-68,10
6	6000	-90,33

Tabela 8 – THD e SNR para C01 e WM-61A.

Microfone	THD	SNR
C01	-57,04dBc (0,1405%)	60,63dBc
WM-61A	-42,35dBc (0,7629%)	57,23dBc

0,7629% contra 0,1405% do C01. Essa diferença de um pouco mais que 5 vezes pode ser significativa a depender da aplicação, porém é uma diferença praticamente inaldível. Se tratando de SNR a diferença dessa medida entre o C01 e o WM-61A foi de aproximadamente 3dB, que dadas as proporções, é uma diferença muito pequena e inaldível. Alguns testes foram realizados para melhorar esses parâmetros, como mudanças nas tensões de alimentação do microfone e amplificador operacional e mudanças nos valores dos componentes, porém empiricamente esses resultados parecem ser uma limitação do microfone de eletreto utilizado.

Considerações finais

Tendo em vista que o objetivo principal deste projeto era o de desenvolver um circuito analógico para condicionamento do sinal proveniente de um microfone de eletreto, pode-se considerar que o objetivo foi alcançado com sucesso. O circuito desenvolvido utiliza um sistema de amplificação diferencial para suprimir o ruído em que os cabos de transmissão estão submetidos, garantindo SNR de 57,23dBc e THD de 0,76%. O microfone projetado obteve experimentalmente resposta em frequência muito aproximada do microfone Samson C01.

O microfone desenvolvido pode ser considerado como uma alternativa de baixo custo para gravações ou até mesmo medições onde o mensurando não é parte crítica de algum processo. Para utilização do microfone projetado em aplicações com maior criticidade, recomenda-se recorrer a outros métodos de ajuste e calibração que garantam maior precisão do instrumento. Além disso o circuito amplificador desenvolvido pode ser facilmente adaptado para o uso em outros microfones e até mesmo outros tipos de transdutores em aplicações de instrumentação.

A placa de circuito impresso foi projetada e disponibilizada no Apêndice A, porém devido a limitações de prazo não foi confeccionada, ficando essa tarefa como recomendação para futuros trabalhos, já que isso pode trazer melhorias na utilização e características do microfone como SNR e THD. Outra sugestão para trabalhos futuros é a adaptação do circuito para a utilização de outros modelos de microfones além do microfone de eletreto WM-61A utilizado, como por exemplo um microfone capacitivo. Também recomenda-se o teste final em câmara anecoica para evitar interferências nos testes como reflexões do som e ruídos do ambiente, garantindo maior confiabilidade nos resultados.

Referências

- BOYLESTAD, Robert; NASHESKY, Louis. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 15, 28, 29, 31, 32, 35.
- COSTA, Denio G. MICROFONES CARACTERÍSTICAS E aplicações. *Música e Tecnologia*, São Paulo, v. 135, p. 142–155, 2002. Citado 7 vezes nas páginas 15, 19, 24–26.
- DAVIS, Don; PATRONIS, Eugene; BROWN, Pat. *Sound System Engineering 4e*. Routledge, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 20, 21, 23–27.
- DE MARCHI, Leonardo. A angústia do formato: uma história dos formatos fonográficos. In: E-COMPÓS. 2005. v. 2. Citado 1 vez na página 15.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de física, volume 2 : gravitação, ondas e termodinâmica*. 10. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2016. Citado 2 vezes na página 18.
- HOROWITZ, Paul; HILL, Winfield. *The Art of Electronics*. 3rd. USA: Cambridge University Press, 2015. ISBN 0521809266. Citado 4 vezes nas páginas 27, 28, 31, 36.
- JUSTEN, Adriel Liamar. Aplicação de técnicas de emissão acústica na caracterização de dano em estruturas, 2012. Citado 1 vez na página 15.
- LOPES, Renato Vilela et al. Desenvolvimento de uma plataforma experimental de baixo custo para implementação de controle ativo de ruído em dutos acústicos. *Brazilian Applied Science Review*, v. 4, n. 6, p. 3752–3771, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 15, 34, 35.
- MALVINO, Albert Paul; BATES, David J. *Eletrônica*. AMGH, 2011. Citado 1 vez na página 29.
- PAIXÃO FERREIRA, Andréia da. A invenção do rádio: um importante instrumento no contexto da disseminação da informação e do entretenimento. *Múltiplos Olhares em Ciência da Informação*, v. 3, n. 1, 2013. Citado 1 vez na página 15.
- PONTA GROSSA, PR. AVALIAÇÃO DA CAMADA DE RECOBRIMENTO EM AÇO ATRAVÉS DA TÉCNICA FOTOACÚSTICA, 2010. Citado 1 vez na página 15.
- RUI, Laura Rita; STEFFANI, Maria Helena. Física: Som e audição humana. *Simpósio Nacional de Ensino de Física (17.: 2007 jan. 29/fev. 02: São Luís, MA).[Anais]*. São Luis: SBF, 2007., 2007. Citado 1 vez na página 19.
- SELF, Douglas. *Small signal audio design*. Focal Press, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 16, 33.

SPADA, Adriano Luiz. *Microfones, Compilado por: Eng. Adriano Luiz Spada*. Attack do Brasil, 2013. <https://www.attack.com.br/artigos-tecnicos> acessado em junho de 2022. Citado 6 vezes nas páginas 15, 20–23, 26.

TOKHEIM, Roger. *Fundamentos de Eletrônica Digital-Vol. 1: Sistemas Combinacionais*. AMGH Editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 30, 31.

VALLE, Sólton do. *Microfones*. Rio de Janeiro: Música e Tecnologia, 2002. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 24.

VUOLO, J.H.; FRANCO, H. *Audição Humana*. 2004. Apostila. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19.

WISNIK, José Miguel. *O som e o sentido. Uma outra história das músicas*. 2. ed. São Paulo: Editora Schwarcz, 1999. Citado 1 vez na página 18.

Apêndices

APÊNDICE A – Layout da placa de circuito impresso

