

FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Mecatrônica Industrial

Gustavo Grotti Dévora
Luciano Pereira Neves

Redutor Ativo de Ruído

Santo André

2018

Gustavo Grotti Dévora

Luciano Pereira Neves

Redutor Ativo de Ruído

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Tecnológico em Mecatrônica Industrial da FATEC Santo André, orientado pelo Prof. Me. Francisco José de Oliveira Maia, como requisito parcial para obtenção do título de tecnólogo em Mecatrônica Industrial.

Santo André

2018

D988r

Dévora, Gustavo Grotti

Redutor ativo de ruído / Gustavo Grotti Dévora, Luciano Pereira Neves. - Santo André, 2018. – 102f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 2018.

Orientador: Prof. Francisco José de Oliveira Maia

1. Mecatrônica. 2. Ruídos. 3. Industrias. 4. Eliminação. 5. Redução.
6. Sistema auditivo. 7. Danos. I. Neves, Luciano Pereira. II Redutor
ativo de ruído.

629.8

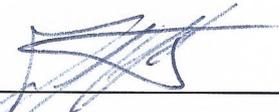
LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 10 de Julho de 2018

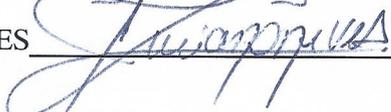
LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:
“REDUTOR ATIVO DE RUÍDO ” DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE
DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. FRANCISCO JOSÉ DE OLIVEIRA MAIA 

MEMBROS:

PROF. FABIO DELATORE PROF. MURILO ZANINI DE CARVALHO **ALUNOS:**GUSTAVO GROTTI DÉVORA LUCIANO PEREIRA NEVES 

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao nosso Orientador Prof. Me. Francisco José de Oliveira Maia que nos guiou na execução do Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradecemos principalmente aos professores Fernando Garup Dalbo, Murilo Zanini de Carvalho, Fábio Delatore e a todos os mestres da FATEC Santo André por nos fornecerem suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecemos as nossas famílias e a todos os colegas que fizeram parte da nossa jornada durante o curso de Mecatrônica Industrial.

RESUMO

O ruído sonoro é um conjunto de sons que podem causar sensações desagradáveis ao ouvido. Em excesso podem causar danos ao sistema auditivo que muitas vezes são irreversíveis, provocando problemas sociais e ocupacionais. Os estudos acerca de eliminação ou redução do ruído por métodos ativos vem crescendo cada vez mais com os avanços da tecnologia. Pensar em sua aplicação dentro da indústria é uma abordagem diferente da que vem comumente sendo aplicada, onde grande parte dos dispositivos de cancelamento ativo de ruído são utilizados para uso pessoal na forma de fones de ouvido. Este trabalho apresenta o estudo elaborado para o desenvolvimento de um dispositivo capaz de realizar o cancelamento de um ruído através do princípio da superposição de ondas, apresentando os circuitos, componentes e métodos que foram utilizados bem como os resultados positivos e negativos obtidos com o decorrer do experimento.

Palavras-chave: Ruído. Cancelamento ativo de ruído. Superposição de ondas.

ABSTRACT

Sound Noise is a set of sounds that can cause unpleasant sensations to the ear. In excess they can cause irreversible damage to the auditory system, causing social and occupational problems. Studies of noise elimination or reduction by active methods have been increasing with advances in technology. Thinking about its application within the industry is a different approach from that which is commonly being applied, where much of the active noise cancellation devices are used for personal use in the form of headphones. This work presents the study for the development of a device capable of canceling a noise through the principle of wave overlay, presenting the circuits, components and methods that were used as well as the positive and negative results obtained during the experiment.

Key words: Noise. Active noise cancellation. Wave Overlay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Propagação de uma onda transversal.....	18
Figura 2: Propagação de uma onda longitudinal.	19
Figura 3: Representação do comprimento de onda.	21
Figura 4: Frequência sonora: em azul uma onda de alta frequência, em verde uma onda de baixa frequência.	21
Figura 5: Amplitude de duas ondas diferentes.	22
Figura 6: Caminho do som no ouvido.....	27
Figura 7: Limite de tolerância para ruído contínuo ou intermitente.....	29
Figura 8: Os malefícios de diversas intensidades de ruídos.	33
Figura 9: Dosímetro de ruído.....	35
Figura 10: Representação do cancelamento passivo de ruído com a utilização de protetor de ouvido em forma de concha.....	37
Figura 11: Diagrama da patente de Paul Lueg.....	39
Figura 12: Superposição de ondas.....	41
Figura 13: Cancelamento de ruído por feedback.	43
Figura 14: Modelo físico de um sistema de controle de ruído por feedback.	43
Figura 15: Esquema de um sistema de cancelamento de ruído por <i>feedforward</i>	44
Figura 16: Modelo físico de um sistema de controle de ruído por <i>feedforward</i>	44
Figura 17: Fonte geradora de funções.	48
Figura 18: Representação do microfone condensador.....	49
Figura 19: Módulo microfone utilizado.....	50
Figura 20: Menor tensão produzida pela fonte geradora de funções.	55
Figura 21: Maior tensão produzida pela fonte geradora de funções.	55
Figura 22: Deformação do sinal.	56
Figura 23: Circuito de ganho de corrente.	57
Figura 24: Resultado da utilização do circuito de ganho de corrente.	58
Figura 25: Medição do nível sonoro ambiente.....	59
Figura 26: Ligação elétrica do microfone.	60
Figura 27: Leitura do sinal sonoro pelo microfone.....	61
Figura 28: Amplificador LM741, montagem não inversora	63

Figura 29: Circuito utilizando com o LM741.	64
Figura 30: Comparação entre a entrada e a saída do circuito montado utilizando o LM741.	64
Figura 31: Esquema de montagem do teste do pré-amplificador.	65
Figura 32: Microfone ligado ao circuito do LM741.	66
Figura 33: Circuito com o NE5532.	67
Figura 34: Circuito montado com o NE5532.	68
Figura 35: Comparação entre a entrada e a saída do circuito montado utilizando o NE5532.	69
Figura 36: Comparação entre a entrada e a saída do circuito montado utilizando o NE5532 com maior valor de tensão.	70
Figura 37: Pré-amplificador com o LM833.	71
Figura 38: Circuito do LM833 com ganho 1.	72
Figura 39: Microfone captando sinal e conectado ao LM833.	72
Figura 40: Circuito típico de montagem do TDA2004.	73
Figura 41: Lista de componentes necessários para a construção do circuito.	74
Figura 42: Circuito do TDA2004 desenvolvido em <i>software</i>	75
Figura 43: Montagem final da placa.	75
Figura 44: TDA2004 amplificando onda de baixa amplitude.	76
Figura 45: TDA2004 no limite de amplificação.	77
Figura 46: Ficha técnica do TDA2004, tensão de saturação na entrada em destaque.	77
Figura 47: Ficha técnica do TDA2004 versão antiga.	78
Figura 48: Onda senoidal de 20mV aplicada na entrada do amplificador de potência.	79
Figura 49: Microfone conectado ao amplificador de potência sem excitação sonora.	80
Figura 50: Ruído gerado na saída do amplificador de potência.	81
Figura 51: Saída do amplificador após aplicação de capacitores de filtragem do ruído.	82
Figura 52: Pré-amplificador ligado ao amplificador de potência.	83
Figura 53: Pré-amplificador com o NE5532 ligado ao amplificador de potência.	84
Figura 54: Circuito amplificador de potência adquirido.	85
Figura 55: TDA2030 amplificando onda com baixa amplitude.	85

Figura 56: TDA2030 no limite para saturar.	86
Figura 57: TDA2030 amplificando o sinal fornecido pelo microfone.....	86
Figura 58: Alto-falante escolhido para o protótipo.	89
Figura 59: Simulação da calha.	91
Figura 60: Construção da calha em poliestireno.	92
Figura 61: Aplicação de espuma acústica na calha de testes.	93
Figura 62: Montagem final da calha e dos circuitos.	94
Figura 63: Ajuste de ganho dos circuitos para a mesma amplitude do ruído.	94
Figura 64: Comparação entre o sinal emitido pelo alto-falante emissor de ruído e o alto-falante emissor do antirruído.	95
Figura 65: Soma entre as ondas medidas.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS

B	Bel
dB	Decibel
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Direta)
FET	Transistor de efeito de campo
Hz	Hertz
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
LMS	Mínimo Erro Médio Quadrático
m/s	Metros por segundo
MHz	Mega Hertz
mV	Milivolt
OMS	Organização Mundial da Saúde
PAIR	Perda de Audição Induzida por Ruído
s.d.	Sem data
uF	Micro Farad
V	Volt
Vpp	Tensão de pico a pico
W	Watt

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. O som	16
2.1.1. Tipos de ondas.....	17
2.1.2. Fenômenos Ondulatórios	19
2.2. O Ruído.....	23
2.3. Captação do som pelo ser humano	25
2.4. Problemas causados pela exposição.....	28
2.5. Poluição sonora	32
2.6. Medição dos níveis de ruído	34
2.6.1. Dosímetro de ruído.....	34
2.7. Cancelamento de Ruído	36
2.7.1. Cancelamento passivo de ruído	37
2.7.2. Cancelamento ativo de ruído.....	38
2.7.2.1. Origem do cancelamento ativo	39
2.7.2.2. Física do cancelamento ativo de ruído.....	40
2.7.2.3. Cancelamento de ruído por <i>feedback</i>	42
2.7.2.4. Cancelamento de ruído por <i>feedforward</i>	43
2.7.2.5. Filtro adaptativo	45
3. METODOLOGIA	46
3.1. Metodologia de pesquisa	46
3.1.1. Definição do ruído a ser cancelado	47
3.1.2. Captação do ruído.....	48
3.1.3. Amplificação dos sinais	50
3.1.4. Determinação da forma de emissão do sinal secundário	51
3.1.5. Análise do cancelamento	51
3.1.6. Diagrama de blocos do protótipo.....	53
4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	54
4.1. Ruído a ser cancelado	54
4.2. Captação de áudio do microfone	59

4.3.	Tratamento do sinal captado.....	62
4.3.1.	Pré-amplificação.....	62
4.3.2.	Amplificação de potência.....	73
4.4.	Determinação dos alto-falantes do protótipo.....	88
4.5.	Análise do cancelamento	90
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
5.1.	Montagem do protótipo	91
5.2.	Testes práticos.....	92
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
6.1.	Conclusões	97
6.2.	Trabalhos futuros	98
7.	REFERÊNCIAS.....	99

1. INTRODUÇÃO

Conforme será descrito no desenvolvimento deste trabalho, a exposição ao ruído sonoro acarreta diversos males ao ser humano como por exemplo, a perda auditiva, o estresse e a redução de rendimento em tarefas do cotidiano. Altas concentrações de pessoas, o barulho das máquinas e o trânsito são situações às quais estamos expostos diariamente e geram níveis de ruídos muito acima dos níveis seguros para o bom funcionamento do ouvido humano.

Conforme será abordado, as principais soluções que vem sendo aplicadas para a redução dos níveis de ruídos ocorrem através do emprego de materiais que realizam o isolamento acústico. Tais soluções muitas vezes necessitam de grandes mudanças no ambiente onde se deseja a redução e nem sempre essas mudanças são viáveis ou apresentam os resultados esperados.

Existe a possibilidade de se reduzir o ruído sonoro sem a necessidade de mudanças estruturais ou emprego de equipamentos de proteção individual. Através da utilização de dispositivos de cancelamento ativo de ruído obtêm-se resultados satisfatórios. Para isso é necessário um sistema que seja capaz de captar o som que se deseja cancelar, tratá-lo para que sua fase seja invertida e em seguida emití-lo na direção da fonte que o emitiu originalmente com o intuito de realizar a atenuação do som indesejado, utilizando como princípio físico a superposição de ondas.

Tipicamente estes dispositivos são utilizados em fones de ouvido para que haja um grande isolamento do ruído no ambiente ao qual um indivíduo está inserido. A construção desse tipo dispositivo é objeto de estudo de muitas empresas há diversos anos. No decorrer do tempo foram criados muitos dispositivos com o emprego de diversas tecnologias diferentes, obtendo-se resultados satisfatórios, mas não perfeitos. A propagação do ruído é algo extremamente difícil de ser controlado, e os estudos acerca deste tipo de tecnologia devem ser sempre aprimorados visando a obtenção de resultados cada vez mais eficientes.

Pensando na expansão da utilização de tal tecnologia de redução de ruído os estudos realizados neste trabalho visam a sua aplicação futura, uma vez que o dispositivo esteja totalmente funcional e seguindo normas de segurança, dentro de uma indústria, ambiente onde muitas vezes os trabalhadores estão expostos a elevados níveis de ruídos sonoros não utilizam os equipamentos de proteção da maneira adequada.

O resultado que se espera obter na finalização do desenvolvimento é a construção de um dispositivo que possa provar o funcionamento do cancelamento ativo de ruído e abrir novos horizontes para que futuramente esta tecnologia possa ser largamente utilizada dentro do ambiente de trabalho, melhorando assim a produtividade, reduzindo riscos de doenças ocupacionais e melhorando a qualidade de vidas dos trabalhadores.

O presente trabalho trará uma pesquisa sobre os principais tópicos que estão relacionados ao ruído sonoro e ao cancelamento ativo de ruído. Em seguida será discutida a maneira com a qual o dispositivo será construído e serão demonstrados os circuitos, testes e resultados obtidos que impediram a conclusão adequada do projeto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento de um sistema de cancelamento ativo de ruído exige conhecimentos de diversas áreas. Em primeiro lugar devemos entender o que é o som, saber como funciona o sistema auditivo do ser humano, saber os prejuízos que a exposição ao ruído excessivo pode causar e devemos também entender como é a construção básica de um dispositivo de cancelamento. Esses conhecimentos são imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Este capítulo abordará os principais tópicos para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente de maneira generalizada e posteriormente focando na construção desejada.

2.1. O som

“O som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo.” (BISTAFA, 2011, p. 18). O som é um fenômeno mecânico, onde a variação de pressão pode se propagar através de um meio gasoso, líquido ou sólido. As variações na pressão causam vibrações que são mais ou menos rápidas, e recebem o nome de vibração sonora.

Segundo Costa (2003), as vibrações sonoras são transmitidas ao meio que rodeiam uma fonte sonora, produzindo compressões e distensões sucessivas, que se propagam com velocidade uniforme em todas as direções. Deformações transitórias que se movimentam longitudinalmente acontecem no entorno de uma fonte sonora, definindo assim que o som se propaga no meio através de impulsos.

Ao sair da fonte sonora, apenas uma parte da energia é transmitida ao meio como uma vibração sonora, a outra parte se perde com a geração de calor. “As

vibrações recebidas pelo meio são transmitidas para as partículas adjacentes, até que a energia mecânica disponível, diminuindo, não ocasione mais vibrações perceptíveis, e o som a uma distância determinada da sua fonte cessa.” (COSTA, 2003, p. 2).

2.1.1. Tipos de ondas

Young e Freedman (2016) afirmam que no mundo existem diversos tipos de ondas, é possível classificá-las em dois grupos distintos: ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas.

As ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio para se propagarem, como por exemplo as ondas de luz, de rádio, radiação infravermelha, radiação ultravioleta e raios X. Já as ondas mecânicas são perturbações que se propagam através de um meio. Young e Freedman (2016) ressaltam que à medida que a onda se propaga em um meio, as partículas que o constituem sofrem deslocamentos de diversas espécies, dependendo da natureza da onda.

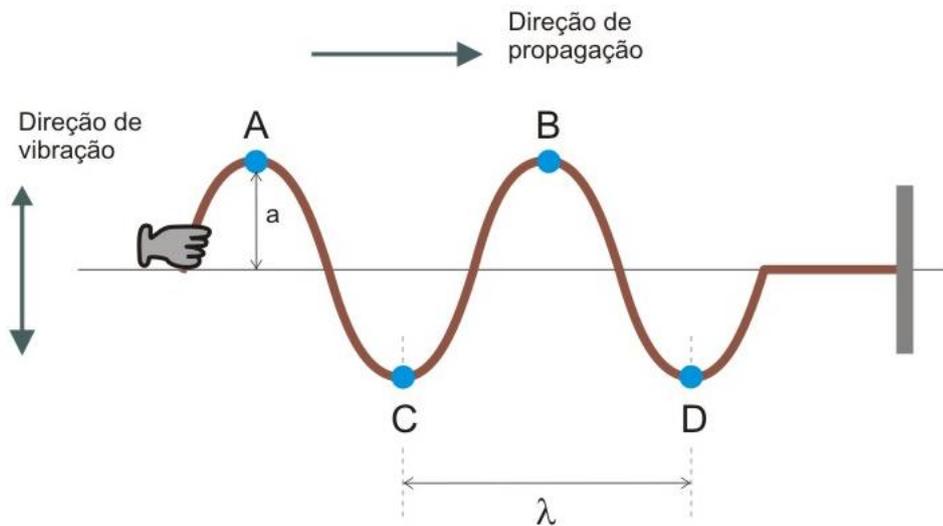
Serway e Jewett (2015) citam que todas as ondas mecânicas necessitam de alguma fonte de perturbação, um meio que possa ser perturbado e algum mecanismo físico pelo qual os elementos do meio possam influenciar uns aos outros. Todo movimento ondulatório possui energia associada a ele e para produzir um movimento é necessário aplicar uma força em uma parte do meio onde a onda irá se propagar. “À medida que a onda se propaga, cada porção do meio exerce uma força e realiza um trabalho sobre a posição adjacente. Dessa forma, a onda pode transportar energia de uma região do espaço para outra.” (YOUNG e FREEDMAN, 2016, p.129).

A propagação de uma onda mecânica pode ocorrer de duas formas: transversalmente e longitudinalmente.

Como em uma onda mecânica é necessário um meio para a sua propagação, uma forma de demonstrar seu funcionamento é através de uma corda longa sob

tensão e que tenha uma de suas extremidades fixa. Quando é empregado um movimento na extremidade livre dessa corda, o movimento é propagado de uma maneira contínua por todo seu comprimento e se repete em momentos posteriores. Serway e Jewett (2015) apontam que uma perturbação como essa, onde os elementos do meio perturbado se movem perpendicularmente à direção de propagação, é chamada de onda transversal, conforme pode ser observado na figura 1.

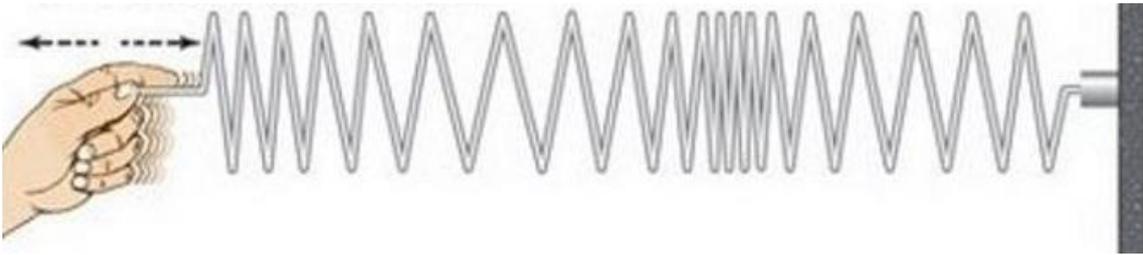
Figura 1: Propagação de uma onda transversal.



Fonte: Borges e Nicolau, 2010.

Serway e Jewett (2015) explicam ainda que em uma onda mecânica longitudinal, os elementos do meio se deslocam paralelos ao sentido de propagação. Para exemplificar uma onda longitudinal, pode-se usar o movimento produzido por uma mola esticada, conforme a figura 2 ilustra. Quando um grupo de espiras em uma extremidade é empurrado para frente e puxado para trás, a ação produz um pulso na forma de uma região comprimida de espiras que se deslocam por todo o comprimento da mola.

Figura 2: Propagação de uma onda longitudinal.



Fonte: Escola Secundária Manuel Arriga, s.d.

2.1.2. Fenômenos Ondulatórios

Todos os tipos de ondas estão sujeitos aos fenômenos ondulatórios e alguns deles são: a reflexão, a difração e a interferência.

Costa (2003) explica que quando uma onda sonora encontra um obstáculo, a energia sonora incidente fica subdividida em duas partes, uma que se reflete, e outra que penetra no segundo meio e que, portanto, pode ser considerada como absorvida pelo mesmo. A reflexão causa um pulso que se move para trás ao longo do meio na direção oposta, ou não, do pulso transmitido anteriormente. Utilizando a terceira lei de Newton, pode-se explicar que a força que o obstáculo exerce na onda sonora que está se propagando é uma força de reação no sentido oposto do meio.

A difração sonora tem relação com a capacidade que as ondas sonoras têm de contornar obstáculos. Bistafa (2011) exemplifica o fenômeno considerando a passagem do som por uma abertura de pequenas dimensões em relação ao comprimento da onda sonora, a porção da onda que passa por essa abertura se comportará como se a abertura fosse uma nova fonte sonora, onde a onda continuará a se propagar.

Segundo Costa (2003), uma interferência sonora ocorre quando duas ondas sonoras se encontram. Quando os dois sons possuem a mesma frequência, a sua superposição dá origem a um movimento vibratório de frequência igual, e amplitude

diferente. A amplitude de duas ondas sonoras quando são confrontadas pode resultar em uma soma ou uma subtração das amplitudes independentes, dependendo da fase das ondas.

Costa (2003) destaca ainda que as ondas sonoras são pulsos energéticos que se propagam através do espaço ou através de um meio, seja ele líquido, sólido ou gasoso. Fisicamente as ondas são caracterizadas pelo comprimento de onda, frequência, amplitude, período e velocidade de propagação.

O comprimento de onda é definido como a distância a partir de qualquer valor de pressão sonora, para que um ciclo se complete na curva pressão por distância, conforme apresentado na figura 3; “representa a distância que separa dois pontos consecutivos que se encontram na mesma posição de vibração.” (EXPLICATORIUM, s.d.).

A relação entre o comprimento de onda e a frequência, através da velocidade do som no meio é dada pela expressão 1:

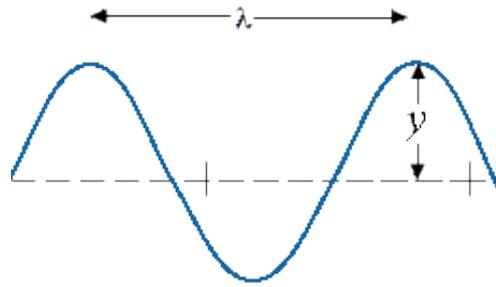
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Onde:

c é a velocidade do som em metros por segundo;

f é a frequência em hertz.

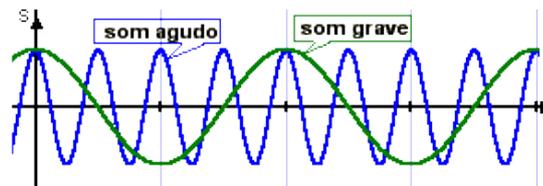
Figura 3: Representação do comprimento de onda.



Fonte: Eletrônica-pt, s.d.

Como dito por Lima (2011), a frequência está relacionada com a quantidade de ciclos completos de uma onda sonora que ocorrem em um período de 1 segundo. A frequência é a característica através da qual o ouvido percebe se um som é agudo ou grave, diferentes frequências podem ser observadas na figura 4.

Figura 4: Frequência sonora: em azul uma onda de alta frequência, em verde uma onda de baixa frequência.



Fonte: Adaptado de UNESP, s.d.

A frequência sonora em Hz pode ser calculada através da equação 2:

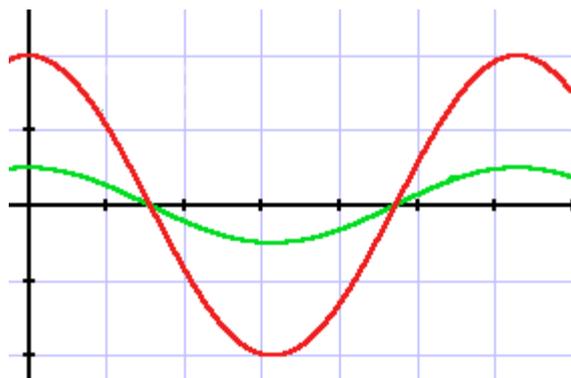
$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

Onde:

T é o período em segundos.

“A amplitude é a característica que nos permite distinguir um som fraco de um som forte. Esta característica está relacionada com a quantidade de energia transportada pela onda sonora e é medida em dB (decibéis).” (LIMA, 2011). Um exemplo da diferença entre amplitudes pode ser observado na figura 5.

Figura 5: Amplitude de duas ondas diferentes.



Fonte: **Áudio Conexo, 2009.**

O período de uma onda tem relação com o comprimento de um ciclo, que é o tempo gasto para se produzir uma oscilação completa e gerar um ciclo de subida e descida. O período pode ser calculado através da equação 2 apenas alterando a ordem dos fatores.

A velocidade com que uma onda sonora se propaga é denominada de velocidade do som. “Por ser uma onda mecânica longitudinal, o som se propaga por meio de pequenas variações do meio material, ou seja, são microscópicas contrações e expansões dos materiais que provocam a onda.” (Petrin, s.d.). Portanto, o meio, a temperatura e a pressão alteram a velocidade com que o som se propaga.

2.2. O Ruído

Segundo uma das definições do dicionário *online* Houaiss (2018) ruído é qualquer som indistinto, sem harmonia; som produzido por vibrações irregulares. O ruído é caracterizado como o conjunto de sons indesejados que possuem caráter desagradável. O som é caracterizado por ser uma grandeza física e as sensações são caracterizadas por grandezas psicoacústicas. O sistema auditivo transforma os sons em sensações psíquicas.

A sensação auditiva é a maior ou menor impressão causada em nosso ouvido pelo som. Para cada frequência, ao aumentar a pressão sonora, cresce a sensação auditiva, desde zero na linha limite da audibilidade até o máximo da linha limite de dor.

Costa (2003) indica que a sensação auditiva é baseada na lei de Fechner Weber, que diz que para todas as sensações a mínima variação do estímulo necessário para produzir uma sensação perceptível é proporcional ao estímulo já existente.

A escala de medição da sensação auditiva é o bel (B) e o decibel (dB), submúltiplo de bel que normalmente é o mais utilizado, sendo que 1 bel equivale a 10 decibéis.

Costa (2003) aponta ainda que o ouvido do ser humano é capaz de perceber variações de 10% a 12% da intensidade energética do som, permitindo perceber variações de $\frac{1}{2}$ dB.

Bistafa (2011) relata que sons que muitas vezes são qualificados como ruído podem, no entanto, transmitir diversas informações úteis, tais como: a velocidade que um automóvel está transitando, se um disco rígido está funcionando corretamente, revelar algum problema mecânico, se uma ferramenta operatriz precisa ser afiada, etc. Existem aplicações ainda onde o ruído é utilizado para mascarar outro ainda mais incômodo.

No entanto, na maioria das vezes o ruído gera efeitos negativos, podendo causar perda de audição, aumento da pressão arterial, estresse, perturbação do sono, queda de desempenho, entre muitos outros males.

A percepção de um ruído varia de pessoa para pessoa, pois depende da noção de audibilidade do ouvinte, do grau de aceitação do ruído, do seu potencial intrusivo e a perturbação que ele causa.

A eliminação total de um ruído nem sempre é um objetivo. Além de apresentar alto custo, o silêncio total pode ser extremamente perturbador. Como explicado em Bistafa (2011), alguns minutos em um ambiente isolado de ruídos as sensações auditivas se tornam mais aguçadas, chegando ao ponto de ser possível ouvir a própria corrente sanguínea do interior do ouvido, barulhos gerados pelo sistema digestivo e até as batidas do coração.

Geralmente a eliminação do ruído é interpretada de maneira equivocada, pois o que realmente se procura é o controle do ruído, eliminando o ruído que com frequência se sobrepõe às fontes de ruído secundárias, denominadas de ruído de fundo. Bistafa (2011) relata que, portanto, na maioria dos projetos de eliminação de ruído o objetivo não é gerar uma zona de silêncio absoluto, mas sim uma zona onde haja conforto mesmo com certo nível de ruído ambiente.

2.3. Captação do som pelo ser humano

O ouvido é o órgão responsável pela captação das vibrações no ar e pela transformação dessas vibrações em impulsos nervosos que o cérebro irá codificar.

Costa (2003) diz que a energia sonora é transmitida através do ar por um movimento molecular, por isso no vácuo não existe som. Quando algo vibra na atmosfera, as partículas ao seu redor se movem. Estas, por sua vez, movem outras ao redor delas, carregando a vibração pelo ar.

Quando um corpo qualquer está vibrando, o ar que está em volta também vibra. Como escrito por Bistafa (2011) essas vibrações são percebidas pelo ouvido humano, que é capaz de captar ondas com vibrações compreendidas entre 20 Hz e 20.000 Hz aproximadamente (ondas que se repetem de 20 a 20.000 vezes por segundo).

“A orelha codifica as informações contidas no som para serem interpretadas pelo cérebro. O estudo do processamento do som pelo sistema auditivo requer a subdivisão da orelha em três subsistemas: orelha externa, média e interna.” (BISTAFA, 2011, p. 43). A função básica dessas três regiões é transformar a energia das ondas sonoras em vibrações mais potentes a fim de serem captadas pelo sistema nervoso auditivo.

Como explicado pela empresa fabricante de aparelhos auditivos Direito de Ouvir (2016) a orelha, parte externa do ouvido, tem a função de captar as ondas sonoras do meio e exercer funções acústicas e não acústicas. O ouvido externo é virado para frente e tem diversas curvas, as quais ajudam a determinar a direção de um som e propiciam uma eficiente transmissão sonora para o tímpano, realizando assim sua função acústica. O cérebro consegue determinar a posição horizontal de um som pelo acompanhamento das informações que vêm dos dois ouvidos. As funções não acústicas atribuídas à orelha tem relação com a proteção do tímpano e a manutenção de uma trajetória sem obstruções para o som.

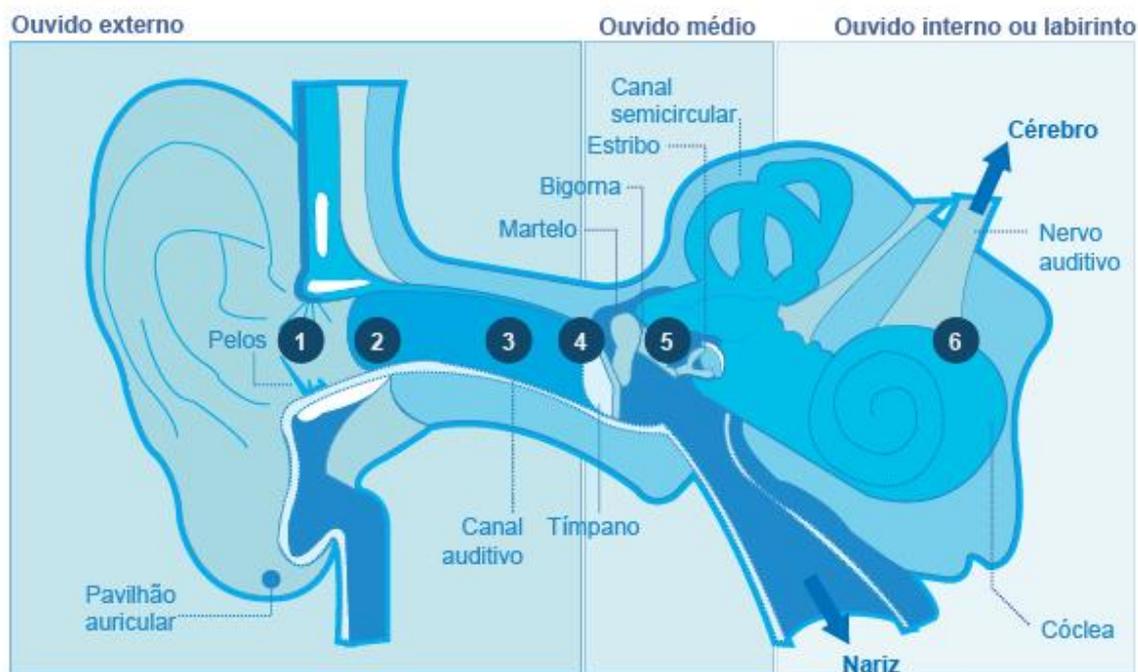
Assim que as ondas sonoras entram no canal auditivo, elas vibram uma membrana fina que fica entre o canal auditivo e o ouvido médio, o tímpano.

“A orelha média consiste no tímpano e em três ossículos: martelo, bigorna e estribo.” (BISTAFA, 2011, p. 46). O tímpano é rígido e muito sensível, separa a orelha externa da orelha média, vibrando em resposta a sons que nele incidem. “Ele é conectado ao músculo tensor timpânico, que constantemente o puxa para dentro, mantendo a membrana tensa por inteiro, vibrando quando qualquer parte de sua superfície é tocada pela onda sonora.” (DIREITO DE OUVIR, 2016).

A empresa Direito de ouvir (2016) explica ainda que essa pequena camada de pele funciona como o diafragma em um microfone, as variações da pressão da onda sonora empurram a membrana para frente e para trás. O tímpano pode servir também para proteger o ouvido interno de exposições prolongadas a ruídos altos e graves.

Na orelha interna estão localizados o labirinto ósseo e o labirinto membranáceo. Como explicado por Bistafa (2011), o som é conduzido por um fluido e não pelo ar. Esse fluido tem uma inércia muito mais alta que o ar, isto é, é mais difícil de se mover. A pequena força sentida no tímpano não é suficiente para mover esse fluido. Antes do som passar para o ouvido interno, a pressão total (força por unidade de área) deve ser amplificada. Essa é a função dos ossículos localizados na orelha média. Quando a compressão pela pressão do ar empurra o tímpano, os ossículos se movem, de maneira que a placa do estribo empurra o líquido perilinfa. Quando a rarefação puxa o tímpano, os ossículos se movem de maneira que a placa puxa o líquido. Essencialmente, o estribo age como um pistão, criando ondas no fluido do ouvido interno para representar as flutuações da pressão do ar da onda sonora. A figura 6 ilustra uma representação completa do funcionamento do sistema auditivo.

Figura 6: Caminho do som no ouvido.



- | | | |
|---|--|--|
| <p>1 Pelos
Formam uma teia que protege o ouvido da entrada de insetos e corpos estranhos</p> | <p>2 Canal auditivo
É o duto que leva o som até o tímpano. Também serve para proteger a membrana</p> | <p>3 Cera
Protege a pele, impermeabiliza o canal auditivo, impede a reprodução de fungos e bactérias e evita doenças como micoses e otites. Não deve ser removida</p> |
| <p>4 Tímpano
É uma membrana delicada e mais fina que uma folha de papel e serve para separar o ouvido externo do médio. Se perfurado, pode haver perda de até 60% da audição e mais risco de infecções</p> | <p>5 Ossos do ouvido
São três: martelo, bigorna e estribo. Fazem a comunicação do tímpano com a cóclea e transmitem o som</p> | <p>6 Cóclea
Dentro dela, há um líquido e, em seu revestimento interno, diversos cílios (pelos) que captam o som pelo movimento desse líquido</p> |

Fonte: Globo, 2012.

2.4. Problemas causados pela exposição

A exposição continuada a níveis elevados de pressão sonora pode causar perda de audição. Níveis elevados de pressão sonora são comumente gerados por ruídos intensos.

“A perda de audição é a doença ocupacional mais comum pelo fato do ruído ser o agente nocivo presente em grande parte dos ambientes de trabalho nos mais diversos ramos das atividades industriais e em diversas áreas do setor de serviços”. (SANTOS e SANTOS, 2000, p.5). Pode interferir na percepção do som desejado e causar uma sensação auditiva desagradável.

Em pesquisa divulgada pela OMS - Organização Mundial da Saúde - (2017) são apontados dados de que cerca de 1,1 bilhão de pessoas entre 12 e 35 anos de idade correm o risco de terem perdas auditivas irreversíveis por escutarem música com fones de ouvido em volume elevado e por estarem presentes em ambientes com barulho demasiado.

Dados coletados na pesquisa apontam que o custo anual por perda de produtividade causada pelo desemprego ou pela aposentadoria precoce pode bater valores de 105 bilhões de dólares. Isso sem contar os prejuízos causados por dificuldades de comunicação, isolamento social e estigma associados às dificuldades de audição que somam mais 573 bilhões de dólares anuais.

De acordo com o Ministério de Saúde (2006), o ruído é o risco físico mais comum nos ambientes de trabalho, e a exposição contínua em níveis elevados pode acarretar consequências como a Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR).

Existem dois tipos de perdas de audição causadas por ruído intenso: a temporária e a permanente.

“A perda de audição temporária, como o próprio nome indica, tem como característica a recuperação da audição normal após a exposição a ruído intenso.” (BISTAFA, 2011, p. 61). Nesse tipo de perda auditiva, as células ciliadas no interior da orelha recuperam-se ao estado normal delas. Já a perda de audição permanente tem como causa a lesão dessas células ciliadas, podendo até ocorrer o desaparecimento delas.

Segundo a Norma de Higiene Ocupacional (2001) uma pessoa com audição normal refere-se a alguém que é capaz de ouvir sons de até 25 decibéis ou mais baixo nos dois ouvidos. O limite de segurança definido pela OMS é de sons com volume de 85 dB que podem ser ouvidos por no máximo oito horas consecutivas, e conforme o volume aumenta, o tempo de exposição cai. Para exemplificar, a relação entre volume e tempo de exposição pode ser observada na figura 7:

Figura 7: Limite de tolerância para ruído contínuo ou intermitente.

NÍVEL DE RUÍDO DB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte: Guia do Trabalhista, s.d.

Ainda de acordo com a norma, para avaliar a exposição de um trabalhador ao ruído podem ser utilizados alguns cálculos (3 e 4) para a determinação do nível de exposição e a dose diária a qual o mesmo está submetido. Esses cálculos são:

$$NE = 10 \times \log \left(\frac{480}{T_E} \times \frac{D}{100} \right) + 85 \quad (3)$$

$$D = \frac{T_E}{480} \times 100 \times 2^{\left(\frac{NE-85}{3}\right)} \quad (4)$$

Onde:

NE = nível de exposição;

D = dose diária de ruído em porcentagem;

T_E = tempo de duração em minutos da jornada diária de trabalho.

A norma diz também que apesar de a surdez não ser considerada uma doença grave ou letal, ela diminui a capacidade de milhões de trabalhadores para realizar suas atividades do cotidiano, comprometendo a qualidade de vida do indivíduo e daqueles que com ele convivem.

Sempre que uma pessoa se expõe a níveis sonoros acima de 85 dB, podem ocorrer lesões reversíveis aos ouvidos desde que o tempo de exposição não seja prolongado ou repetitivo. Santos e Santos (2000) dizem que se entre os períodos de exposição houver um intervalo de pelo menos 14 horas com exposições inferiores a 80 dB o organismo é capaz de reparar os danos. Contudo se o indivíduo voltar a se expor ao barulho elevado em um período menor do que o necessário para a ouvido se recuperar da exposição anterior, a médio ou longo prazo os danos serão irreversíveis.

Santos e Santos (2000) explicam que para determinar se uma pessoa possui perdas da capacidade auditiva é necessário realizar um exame chamado audiometria. Para uma pessoa que trabalha em local com excesso de barulho, esse exame deverá ser realizado no primeiro dia de trabalho da semana e antes do turno de trabalho. O mesmo exame deverá ser realizado ao término do turno e na manhã do dia seguinte. A comparação dos resultados mostrará se o ruído ao qual a pessoa está sendo exposta está sendo prejudicial à saúde da mesma e se o tempo de descanso entre as jornadas de trabalho é suficiente para a recuperação do órgão auditivo.

Com o intuito de diminuir a exposição do trabalhador à ruídos elevados, algumas medidas podem ser tomadas, tais como: emprego do uso de protetores auditivos, alterar o posicionamento das fontes de ruído e diminuir a concentração de máquinas, realizar o isolamento acústico de determinados equipamentos, redução da jornada de trabalho para funcionários expostos a altos níveis de ruído, substituição de máquinas ou peças que possam causar ruídos entre outras medidas.

2.5. Poluição sonora

“A poluição sonora é o excesso de ruído que afeta a saúde física e mental da população em determinado local.” (TODA MATÉRIA, 2017). É um tipo de poluição que muitas vezes passa despercebida por fazer parte do cotidiano das pessoas e ao contrário do que se pensa, a poluição sonora não é apenas um problema de desconforto acústico.

A Associação Brasileira para a Qualidade Acústica diz que a poluição sonora é capaz de causar danos ao meio ambiente e à saúde humana. É fato comprovado pela ciência médica que o barulho causa malefícios à saúde afetando gravemente a qualidade de vida. Dados da OMS apontam que pelo menos 10% da população mundial está exposta a níveis de ruídos que podem causar a perda auditiva. Tal tipo de poluição é o conjunto de todos os ruídos provenientes de uma ou mais fontes sonoras que estão se manifestando ao mesmo tempo.

Conforme a publicação feita pela Associação, em locais onde o ruído é muito alto é comum que as pessoas tenham dificuldades para relaxar, apresentem *stress*, angústia, dores de cabeça, agitação e dificuldades para dormir. Quando exposto a ruídos acima de 70 decibéis, o corpo permanece em estado de alerta constante, mesmo enquanto dorme, o que provoca a liberação de hormônios que podem acarretar doenças cardiovasculares e hipertensão.

A OMS estipula que os níveis de ruídos não devem ultrapassar o valor de 50 dB quando a exposição é contínua, caso contrário, os efeitos negativos já começam a ser percebidos. A figura 8 apresenta as consequências que determinados níveis de ruídos causam.

Figura 8: Os malefícios de diversas intensidades de ruídos.

RUIDO (dB)	COMEÇA A SENTIR-SE ESTES EFEITOS NEGATIVOS
30	Dificuldade em conciliar o sono
40	Dificuldade na comunicação oral
45	Provável interrupção do sono/Perda de qualidade do sono
50	Incômodo diurno
55	Incômodo diurno forte
65	Comunicação verbal extremamente difícil
75	Perda de audição a longo prazo
110-140	Perda de audição a curto prazo

Fonte: Silêncio negado, s.d.

2.6. Medição dos níveis de ruído

Para o controle ou monitoramento dos ruídos em um ambiente, faz-se necessário a utilização de aparelhos eletrônicos específicos. Medições acústicas fornecem informações de amplitude, frequência e fase dos sons em geral. O dosímetro de ruído é um dos dispositivos utilizados para tais medições.

2.6.1. Dosímetro de ruído

Bistafa (2011) diz que o nível de pressão sonora é a grandeza acústica determinante da sensação subjetiva da intensidade dos sons. Todo aparelho utilizado para medições acústicas utiliza um sensor de pressão sonora, que transforma a pressão sonora em um sinal elétrico.

O dosímetro é utilizado para medir a dose de ruído ao qual as pessoas estão expostas ao longo de um período. O equipamento pode ser visto na figura 9.

Esse aparelho era mais comumente encontrado em empresas e locais de construção civil, mas devido à grande oferta de aparelhos no mercado, é comum encontrá-lo em diversos setores.

“Ele opera com um circuito interno que ao receber do meio externo determinada frequência, vibra em ressonância, sendo o aparelho capaz de medir a influência externa pelo sistema interno que possui.” (SANCHES, 2012). O dosímetro de ruído conta com um microfone e sua amostragem é feita automaticamente pelo aparelho.

O dispositivo precisa ser calibrado, pois alguns fatores externos podem alterar a sensibilidade de seu microfone, como:

- Grandes mudanças na temperatura;
- Grandes mudanças na pressão do ar;
- Envelhecimento da membrana do microfone;
- Queda ou colisão do microfone.

Também é possível que ocorram falhas nos amplificadores e filtros, todos muito sensíveis. A calibração do aparelho garante a precisão dos valores obtidos.

Neto (2017) ressalta que com emprego do dosímetro de ruído é possível fazer uma avaliação da exposição ao ruído de toda a jornada de trabalho de um empregado, e não apenas de momentos específicos. O equipamento fica instalado próximo à orelha e faz medições reais da média de ruído ao qual o mesmo está exposto.

Figura 9: Dosímetro de ruído.



Fonte: Thermodin, 2017.

2.7. Cancelamento de Ruído

Visando melhorar o bem-estar das pessoas, independente do ambiente em que se encontram, os estudos acerca da eliminação ou redução de ruído sonoro vem sendo trabalhado há muitos anos, inicialmente pelos métodos passivos e mais recentemente com o avanço da eletrônica e da computação, através do método ativo que será descrito em seguida.

Segundo um estudo realizado e publicado pelo fundo de proteção aos trabalhadores suecos (*Arbetarskyddsfonden*) (1986), foram determinados 4 passos que um projeto de redução de ruído deve seguir, são eles:

- 1- Deve ser realizado um mapa do ruído no ambiente através de medições em todas as áreas;
- 2- Definir o nível de ruído aceitável para todas as áreas;
- 3- Descrever todas as medidas planejadas para a redução e realizar uma análise dos custos com a atenuação esperada;
- 4- Definir prioridades para atingir o resultado esperado e determinar prazos para a realização do projeto.

“O controle do ruído visa obter um nível de ruído aceitável em determinado ambiente, consistente com os aspectos econômicos, operacionais, legais, médicos, psicológicos e culturais.” (BISTAFA, 2011, p.315).

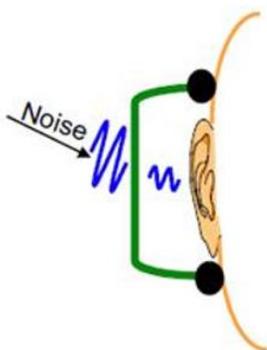
Todo problema de controle de ruído envolve uma fonte sonora, a trajetória de transmissão e o receptor.

A fim de compreender os dois tipos de redução de ruídos existentes (passivo e ativo), serão apresentadas as características de cada um, dando um foco maior para o cancelamento ativo, que é o objetivo principal deste trabalho.

2.7.1. Cancelamento passivo de ruído

O cancelamento passivo de ruído é a forma mais simples e barata de se realizar o bloqueio de um ruído ambiente. Tal sistema baseia-se na utilização de materiais com uma boa acústica que dificultam a entrada de sons externos através de painéis e coberturas que impedem a propagação direta das ondas sonoras, como exemplificado na figura 10.

Figura 10: Representação do cancelamento passivo de ruído com a utilização de protetor de ouvido em forma de concha.



Fonte: Adaptado de Departamento de Engenharia Elétrica e Sistema da Universidade de Washington, s.d.

Como Costa (2003) diz, o que define se um material é um bom ou mau isolante é o seu coeficiente de absorção, quanto maior o número, maior será a redução do ruído que ele poderá proporcionar. Dentre os materiais normalmente empregados nesse tipo de sistema encontram-se: espumas, couro, lã de rocha, lã de vidro, feltros, plásticos porosos, madeira aglomerada, etc. Estes materiais possuem alto poder de bloquear fisicamente as ondas sonoras, isso porque todos eles são porosos, e “esses poros são suficientemente pequenos de tal forma que a resistência oferecida ao movimento vibratório da onda sonora, em vista da própria inércia do ar contido nos mesmos, seja desprezável.” (COSTA, 2003, p. 33).

Conforme citado por Costa (2003), os materiais porosos podem absorver de 50 a 90% da energia sonora, dependendo da frequência da mesma. Teoricamente, o coeficiente de absorção pode ser demonstrado pelas equações 5 e 6:

$$a = 1 - \frac{2m^2 - 2m^2 + 1}{2m^2 + 2m + 1} \quad (5)$$

$$m = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi f\rho}} \quad (6)$$

Onde:

R é o raio;

μ é o coeficiente de viscosidade do ar (kg/ms);

f é a frequência (Hz);

ρ é a massa específica (kg/m³).

O método de cancelamento passivo não funciona bem para ondas sonoras de baixa frequência. Isso acontece porque ondas de baixa frequência possuem um alto comprimento de onda, necessitando assim de isolamento com elevado tamanho, o que torna um projeto do tipo inviável financeiramente.

2.7.2. Cancelamento ativo de ruído

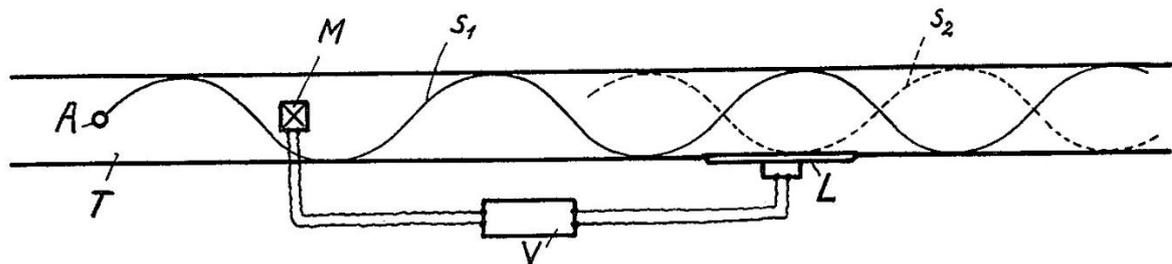
O cancelamento ativo de ruído é bem mais complexo que o passivo, ele pode usar a combinação de materiais isolantes com um arranjo eletrônico para bloquear eletricamente o ruído.

2.7.2.1. Origem do cancelamento ativo

Conforme artigo publicado por P.A. Nelson e S.J. Elliott (1994), esse tipo de cancelamento funciona através do princípio da interferência destrutiva, onde o som gerado por uma fonte primária é destruído pelo som gerado em uma fonte secundária.

Embora pareça recente os estudos sobre o controle ativo do ruído, desde os anos 30 esse tipo de assunto já é discutido. Em 1936, uma patente registrada por Paul Lueg descrevia a ideia básica de um sistema desse tipo. Em sua patente era utilizado um microfone para captar o som ambiente (fonte primária), em seguida o som captado era manipulado eletricamente e o resultado alimentaria um alto-falante (fonte secundária) para realizar o cancelamento, conforme pode ser observado na figura 11

Figura 11: Diagrama da patente de Paul Lueg.



Fonte: Adaptado de *United States Patent*, 1936.

Conforme citado por Nelson e Elliott (1994), o objetivo desta patente seria de utilizar um alto-falante para produzir uma onda sonora que possua a fase totalmente invertida com a fase da onda sonora original, produzindo uma interferência destrutiva, criando assim uma zona de silêncio bem próxima à fonte secundária.

Inicialmente os estudos sobre o controle ativo de ruído tinha a finalidade de reduzir a propagação de ondas sonoras de baixa frequência em dutos de ventilação, e posteriormente os estudos se estenderam para a tentativa de redução do ruído interno na cabine de um avião e de um carro.

Em 1953, Herry Olson e Everet May publicaram um artigo onde era descrito um sistema de controle ativo com a utilização de um microfone próximo a fonte secundária de ruído. Esse tipo de montagem era capaz de gerar uma zona de silêncio em volta deste microfone. O estudo de Harry e Everet foi importante, pois a partir dele surgiu a ideia do controle ativo de ruído por realimentação (ou também conhecido por *feedback*), que significa que o sinal de referência passa a ser captado de perto do alto-falante secundário e não mais da fonte primária, que será explicado mais detalhadamente adiante.

Após a publicação do sistema por realimentação, alguns outros tipos de dispositivos foram construídos, porém nenhum deles conseguia alcançar os objetivos esperados por conta da falta de tecnologia disponível na época. A maior dificuldade era fazer com que o sistema conseguisse se adaptar rapidamente a mudanças do aspecto do ruído, e os circuitos analógicos não eram capazes de realizar tal tarefa.

2.7.2.2. Física do cancelamento ativo de ruído

“Quando uma onda atinge as fronteiras de um meio, ocorre uma reflexão da onda inteira ou de uma parte dela.” (YOUNG e FREEDMAN, 2016, p.132). Quando há um encontro entre a onda incidente e a refletida acontece um fenômeno de superposição denominado de interferência, que se refere ao que acontece quando duas ou mais ondas passam por uma mesma região em um mesmo instante de tempo.

Todo controle ativo de ruído baseia-se no princípio da superposição de ondas. “Esse princípio é válido para qualquer sistema linear, e a propagação de uma onda acústica de amplitude abaixo de 140 dB pode ser considerada um processo linear.” (NELSON e ELLIOTT, 1994, p.78, tradução nossa).

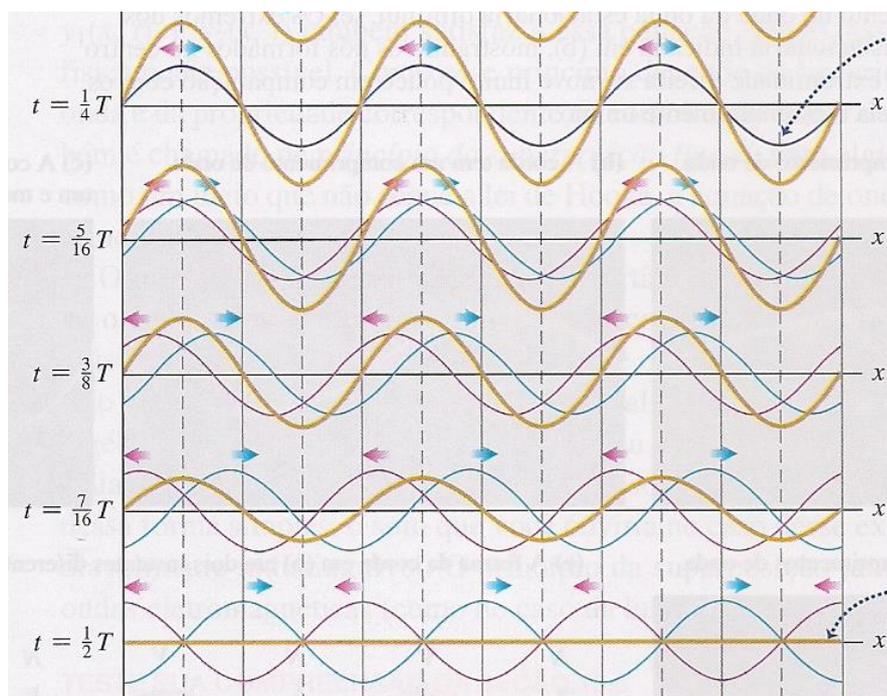
Duas ondas sonoras separadas, quando combinadas em um mesmo instante de tempo para obter um deslocamento resultante é um exemplo do princípio da

superposição. Como dito por Young e Freedman (2016), quando duas ondas se sobrepõem, o deslocamento resultante em qualquer ponto do espaço e em um instante qualquer de tempo é obtido somando-se os deslocamentos individuais que cada ponto deveria ter caso o outro deslocamento não existisse.

O princípio da superposição explica como ondas incidentes e refletidas se combinam formando uma onda estacionária. Assim, na ilustração apresentada por Young e Freedman (2016), pode ser observado na figura 12 que no instante de tempo $t=1/4$ as ondas rosa e azul estão superpostas, ou seja, estão em fase, resultando em uma curva senoidal com amplitude igual ao dobro da amplitude de cada uma das ondas individuais, criando assim uma interferência construtiva.

Já no instante de tempo $t=1/2$ as duas ondas estão completamente defasadas entre si, e nesse instante a superposição fornece uma onda resultante igual a zero. Em cada nó, o deslocamento das duas ondas, rosa e azul, são sempre iguais e opostos, portanto a soma é igual a zero, denominando, assim, uma interferência destrutiva.

Figura 12: Superposição de ondas.



Fonte: Adaptado de Young e Freedman, 2016.

A falta de linearidade em um sistema de controle ativo de ruído está relacionada com os alto-falantes utilizados na fonte secundária. Ela pode surgir quando os alto-falantes são forçados a reproduzir um sinal de baixa frequência e alta amplitude e pode ser resolvida com uma boa modelagem do sistema.

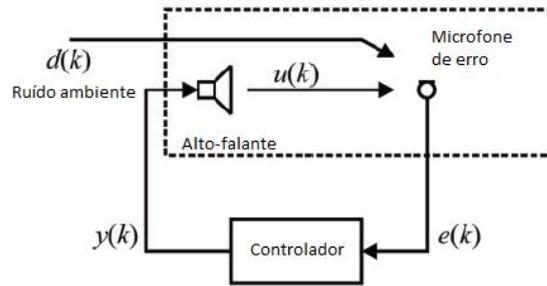
A ideia de utilizar a superposição de ondas para realizar interferências destrutivas surgiu de um experimento realizado por Thomas Young com ondas ópticas. “Se a amplitude e a fase de um sinal sonoro saindo de um alto-falante for ajustada em relação a outro alto-falante, a pressão acústica sentida em determinada região do espaço será próxima de zero.” (NELSON e ELLIOTT, 1994, p.78, tradução nossa). Tal experimento mostrou também que em outros pontos do espaço, as duas ondas sonoras podem acabar se somando e resultando em uma onda sonora construtiva com amplitude maior do que a original.

Este problema pode ser solucionado utilizando-se da ideia proposta por Herry Olson e Everet May (1953), posicionando o microfone de referência (microfone de *feedback*) muito próximo à fonte secundária, a onda necessária para realizar o cancelamento será muito menor, o que diminui o efeito em outros pontos do espaço.

2.7.2.3. Cancelamento de ruído por *feedback*

Conforme o trabalho produzido por Höber, Pape e Reithmeier (2016), a ideia por cima de um sistema de cancelamento por feedback é estimar o ruído a ser cancelado e usá-lo como um sinal de referência de entrada para um filtro digital. O sinal de referência do ambiente com ruído e do alto-falante secundário é medido por um microfone dentro do sistema e enviado ao controlador após haver a interferência entre o ruído primário e o antirruído. A figura 13 apresenta uma representação deste tipo de sistema; onde o objetivo é atenuar o ruído ambiente $d(k)$ dentro de um espaço fechado onde está contido o microfone de erro. Para isso, um ruído com a fase invertida ou antirruído $u(k)$ é emitido por um alto-falante para causar uma interferência destrutiva.

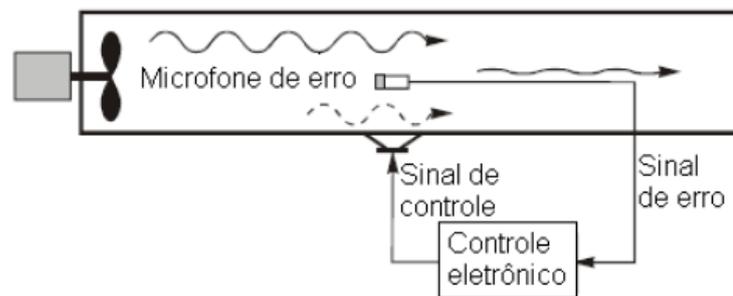
Figura 13: Cancelamento de ruído por feedback.



Fonte: *Inter-Noise*, 2016.

Um modelo desse tipo de sistema pode ser observado na figura 14.

Figura 14: Modelo físico de um sistema de controle de ruído por feedback.



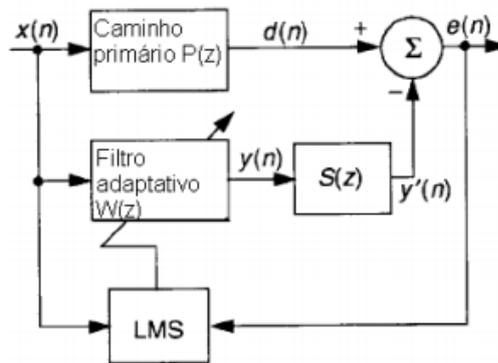
Fonte: Luiz Gustavo Del Bianchi da Silva Lima, s.d.

2.7.2.4. Cancelamento de ruído por *feedforward*

Conforme explicado por Lima (s.d.), o sistema de controle de ruído por *feedforward* utiliza um filtro adaptativo para estimar a resposta acústica entre o microfone de referência e o microfone de erro na região a qual se pretende controlar o ruído. Nesse tipo de sistema o sinal de referência é obtido diretamente na fonte de ruído e o microfone que capta o sinal acústico após a interferência entre o ruído e o antirruído é chamado de microfone de erro.

Esse tipo de sistema tenta minimizar o ruído captado pelo microfone de erro em conjunto com o filtro adaptativo. Um exemplo desse tipo de sistema pode ser observado na figura 15, onde $e(n)$ é o sinal de erro captado, $P(z)$ é a resposta acústica que interfere no ruído primário (caminho primário), $S(z)$ é o caminho secundário, $W(z)$ é o filtro adaptativo e $x(n)$ é o ruído primário.

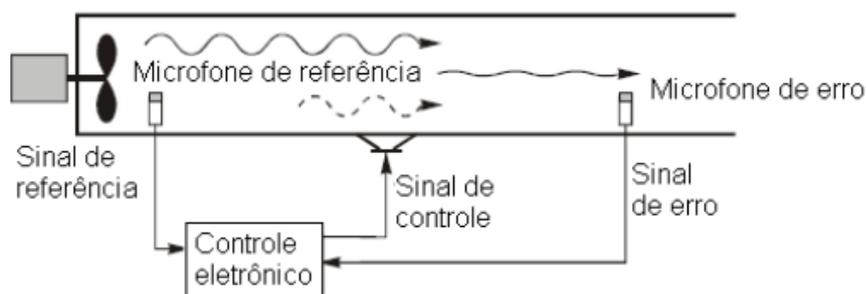
Figura 15: Esquema de um sistema de cancelamento de ruído por *feedforward*.



Fonte: Luiz Gustavo Del Bianchi da Silva Lima, s.d.

Um modelo desse tipo de sistema pode ser observado na figura 16.

Figura 16: Modelo físico de um sistema de controle de ruído por *feedforward*.



Fonte: Luiz Gustavo Del Bianchi da Silva Lima, s.d.

Segundo Lima (s.d.), os sistemas de controle de ruído por *feedforward* são utilizados sempre que possível para substituir os sistemas por *feedback*. Isso acontece porque a eficiência desse tipo de sistema é muito maior. Os dispositivos construídos baseados em sistemas de *feedforward* se tornam estáveis muito mais rápido do que os sistemas por *feedback*, pois este emite um antirruído de forma

instantânea assim que iniciado por conta da captação do sinal de referência direto da fonte.

2.7.2.5. Filtro adaptativo

Os filtros eletrônicos podem ser analógicos ou digitais, e possuem a função de remover partes não desejadas de um sinal, extraíndo apenas partes úteis do sinal. “O filtro adaptativo é a parte do sistema de controle responsável por ajustar os coeficientes do filtro digital de modo que a atenuação seja a maior possível.” (LIMA, s.d., p.3).

Segundo o trabalho realizado por Takayama, Pereira, Camargo e Abrão (2011), filtros convencionais geralmente assumem que os parâmetros do processo são conhecidos e tais parâmetros determinam as características de um sinal de entrada. No entanto em muitos problemas práticos esses parâmetros podem mudar ou o sistema pode não conhecer o comportamento deles, fazendo-se necessário a utilização de um filtro que possa ter um auto aprendizado, de maneira a ajustar-se automaticamente de acordo com cada situação.

Os filtros adaptativos são utilizados em aplicações onde algumas características não são conhecidas, sendo altamente adequados para aplicações onde as condições do sinal de entrada ou os parâmetros do sistema variam lentamente, auto ajustando-se para compensar as mudanças. Grande parte destes filtros calculam seus valores em um instante ‘n+1’ adicionando ao valor do filtro em um instante ‘n’ uma pequena porcentagem de um certo erro calculado em função do valor do sinal de erro ao quadrado, conhecido como LMS (*least mean square* – mínimo erro médio quadrático).

O algoritmo LMS é um dos mais conhecidos quando se fala em filtro adaptativos, ele realiza o ajuste contínuo dos valores dos coeficientes do filtro, tendo como objetivo a minimização do erro sentido da média quadrada.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para o desenvolvimento do protótipo. Eles tiveram como principal foco a construção de um dispositivo capaz de provar o princípio físico da superposição de ondas e assim mostrar como o cancelamento ativo de ruído pode ser utilizado.

3.1. Metodologia de pesquisa

A construção de um protótipo funcional que possa provar o funcionamento do cancelamento ativo de ruído envolve a pesquisa e a aquisição de diversos conhecimentos dentro das áreas da eletrônica e da acústica. O método de pesquisa utilizado foi o exploratório, onde a partir de conhecimentos básicos e com o auxílio dos mestres da FATEC Santo André foi elaborada uma ordem sequencial de passos que deveriam ser executados.

Os estudos para a elaboração do protótipo e sua montagem foram divididos em tópicos para serem trabalhados separadamente em um primeiro momento. Após a conclusão da etapa de testes cada um dos tópicos foi integrado para a realização de testes e ajustes necessários.

Para o desenvolvimento do protótipo os seguintes tópicos foram escolhidos para serem trabalhados individualmente:

- Definição do ruído a ser cancelado;
- Captação do ruído;

- Amplificação dos sinais;
- Determinação da forma de emissão do sinal secundário;
- Análise do cancelamento.

3.1.1. Definição do ruído a ser cancelado

Antes de iniciar o desenvolvimento técnico do projeto foi necessário definir qual seria o objetivo de cancelamento de ruído e quais seriam as limitações do dispositivo.

Tendo em vista que realizar o cancelamento ativo de um ruído sonoro em um ambiente não controlado exige uma complexidade relativamente grande entre o sistema eletrônico, a captação e emissão do ruído, foi definido que o dispositivo funcionaria em uma determinada faixa de frequência, que deveria ser a faixa ideal de funcionamento dos alto-falantes e dos microfones que serão posteriormente abordados. Com isso, o objetivo do trabalho ganha uma maior especificidade, tendo em conta que uma área delimitada será trabalhada.

Para a geração do ruído sonoro a ser cancelado optou-se pelo uso de um gerador de funções. Tal escolha permite o controle da faixa de frequência e amplitude da onda que será trabalhada, visto que a utilização de um equipamento como motor elétrico, compressor de ar, gerador a combustão ou diversos outros equipamentos apresentariam um nível de complexidade sonora elevado devido às várias frequências, amplitudes e direções que o ruído gerado possuiria.

A fonte geradora de funções disponível nos laboratórios da FATEC Santo André é fabricada pela *Scientech* sendo o modelo utilizado o ST4062, apresentada na figura 17. Consultando manuais e informações *online* foi levantado que o equipamento possui as seguintes especificações:

- Faixa de frequência de até 2Hz a 20 Mhz;
- Possibilidade de ondas senoidais, quadradas, triangulares ou pulsativas;
- Tensão de saída de até 20 Vpp.

Figura 17: Fonte geradora de funções.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

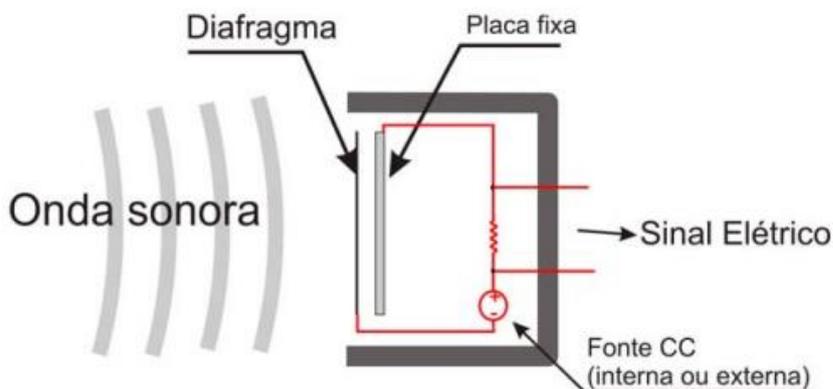
3.1.2. Captação do ruído

A captação do ruído tem um papel importantíssimo no bom decorrer do cancelamento. Para isso foram realizadas pesquisas para se obter maiores informações sobre os diversos tipos de microfones disponíveis no mercado.

Conforme dito por Oliveira (2010), os microfones condensadores possuem alta sensibilidade e boa resposta de frequência quando comparados aos microfones dinâmicos, que são normalmente empregados para uso profissional e não possuem uma resposta totalmente linear de frequência dentro do espectro audível.

O microfone condensador utiliza em seu funcionamento o princípio capacitivo. Um capacitor é formado por duas placas metálicas, uma fixa e outra fina e móvel que atua como um diafragma. Esse microfone (ou capacitor) é alimentado por uma fonte contínua e quando sob pressão sonora, o diafragma se movimenta alterando a capacitância e a corrente no circuito, conforme demonstrado na figura 18.

Figura 18: Representação do microfone condensador.



Fonte: José Raimundo de Oliveira – Unicamp, 2014.

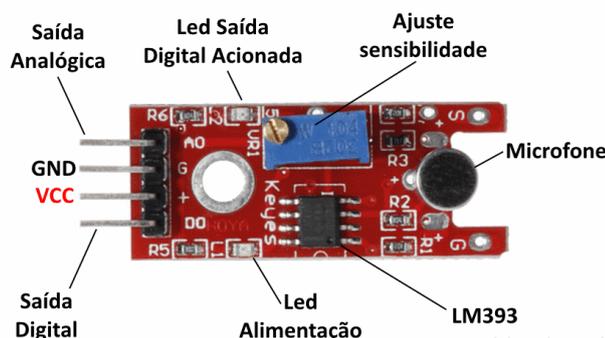
Atualmente o microfone condensador de eletreto é largamente utilizado em celulares, computadores e câmeras de vídeo devido a sua simplicidade de construção e baixo custo. Esse modelo de microfone elimina a necessidade de uma fonte de tensão para realizar a polarização, visto que são construídos utilizando-se de materiais quase permanentemente carregados no dipolo do capacitor. Materiais como fluorpolímeros, polipropileno e polietileno tereftalato garantem a carga elétrica nesses microfones por períodos entre 30 a 100 anos.

Os microfones de eletreto possuem internamente um pré-amplificador integrado e de baixa potência do tipo transistor de efeito de campo (FET) que deve ser alimentado externamente.

Conforme dito por Braga (s.d.), quando as ondas sonoras atingem o diafragma do microfone, as deformações recebidas no eletreto fazem com que as cargas elétricas variem, e com isso a tensão aplicada no transistor também varia, tendo como resultado uma corrente no transistor que oscila exatamente conforme a onda sonora incidente.

Com tais informações, a decisão sobre qual microfone utilizar tornou-se evidente. Portanto, optou-se por utilizar um módulo integrado, contendo o circuito de alimentação necessário e um chip comparador de tensão LM393. O modelo do módulo escolhido é o KY-037 que é representado na figura 19.

Figura 19: Módulo microfone utilizado.



Fonte: LIG Imports, 2016.

3.1.3. Amplificação dos sinais

O sinal na saída do módulo do microfone possui um nível de tensão e corrente relativamente baixo para ser aplicado diretamente a um alto-falante.

Para tratar o sinal captado foi definida uma etapa de pré-amplificação da saída do microfone. Em seguida, o sinal já tratado é novamente amplificado por um amplificador de potência, que é responsável por permitir que o som seja reemitido por um alto-falante.

Na etapa de pré-amplificação o amplificador operacional LM741 foi escolhido. A escolha deste modelo de operacional se deve ao fato de que este componente é largamente utilizado em diversos tipos de projetos, conforme foi constatado após pesquisas sobre como realizar tal etapa do projeto.

Para o amplificador de potência, conforme indicado pelo professor orientador, foi determinada a utilização do componente TDA2004, que é um amplificador com até 10W de potência e montagem simplificada, não necessitando de alimentação simétrica.

3.1.4. Determinação da forma de emissão do sinal secundário

Tanto para a emissão do ruído quanto para a emissão do antirruído, alto-falantes iguais foram escolhidos para atender aos requisitos do projeto.

Os dois alto-falantes utilizados devem ser preferencialmente idênticos e ter a sua faixa de funcionamento dentro dos limites que foram estipulados na etapa de definição do ruído a ser cancelado. Os mesmos foram dispostos um de frente para o outro de tal modo que ao centro poderá ser averiguado o nível sonoro resultante do encontro das duas ondas sonoras.

3.1.5. Análise do cancelamento

Através da utilização de um segundo módulo de microfone foi realizada a leitura do sinal resultante em um ponto intermediário entre os alto-falantes para comprovar o funcionamento do cancelamento.

Esse microfone tem a função também de atuar na realimentação do sistema, servindo como uma verificação de erro. Esse sinal de erro deve ter um circuito dedicado a ele, onde o resultado deve ser reaplicado ao sistema emissor do antirruído como forma de ajuste da emissão, visando obter o melhor cancelamento possível.

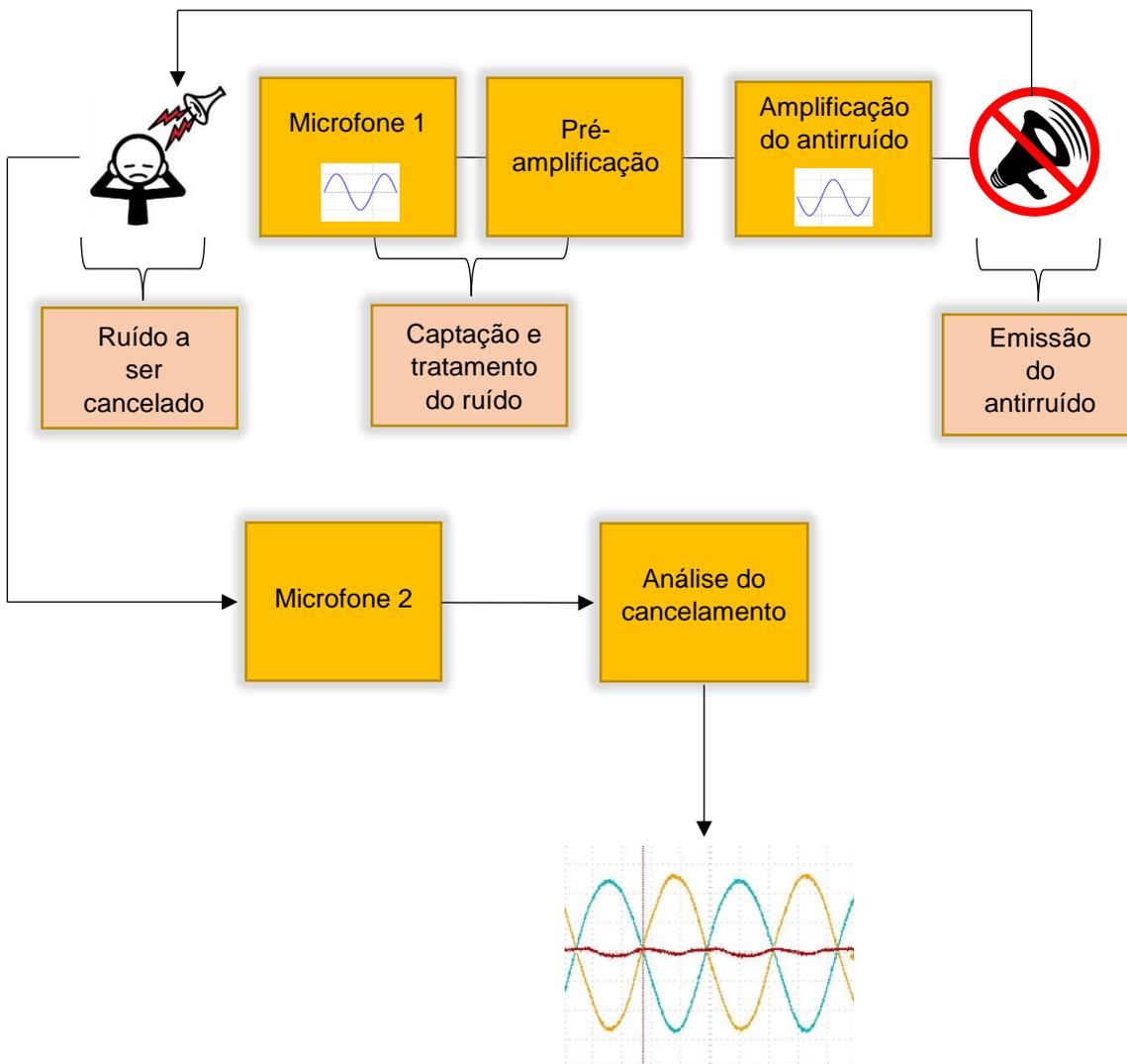
A saída deste segundo módulo deverá ser ligada juntamente com a do primeiro ao osciloscópio, em canais diferentes, para ser realizada a averiguação do funcionamento do sistema.

O resultado que se espera obter ao fim da montagem do protótipo é que o cancelamento possa ser percebido mesmo sem a utilização de qualquer equipamento de medição, ou seja, quando o protótipo estiver em funcionamento, as pessoas que

estiverem próximas poderão, com seus próprios ouvidos, perceber a diferença do nível sonoro antes e após o cancelamento.

3.1.6. Diagrama de blocos do protótipo

Para melhor visualização das etapas envolvidas no protótipo foi elaborado um diagrama de blocos com a finalidade de identificar os tópicos a serem estudados.



4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Neste capítulo serão descritos os passos realizados para a construção do protótipo de cancelamento ativo de ruído, bem como os componentes e circuitos utilizados.

4.1. Ruído a ser cancelado

Como determinado no capítulo anterior, o ruído a ser cancelado foi controlado e produzido por uma fonte geradora de funções.

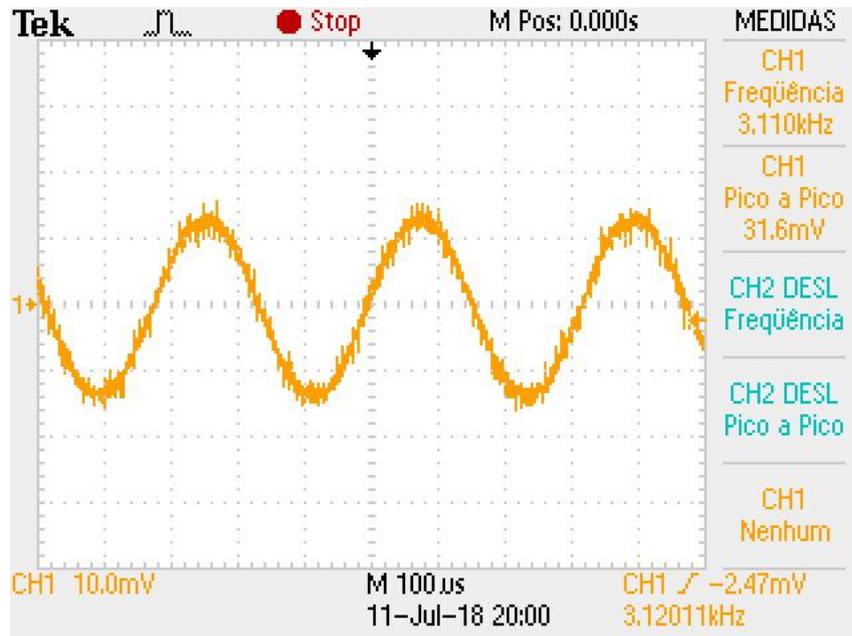
Foi definido que a frequência a ser trabalhada para o cancelamento ativo será na faixa de 3kHz, tendo em vista que frequências muito menores não possuem resultados satisfatórios quando são atenuadas por métodos ativos e que frequências muito altas são mais complexas de serem trabalhadas e aumentam as possibilidades de problemas com ruídos. Para a definição de tal frequência foi levado em conta, também, a faixa de frequência audível do ser humano, onde os 3kHz encontram-se dentro dos seus limiares e fora dos extremos.

Para averiguar se a fonte geradora de funções disponível no FATEC teria seu uso viável no projeto, o primeiro teste foi realizado utilizando o osciloscópio para determinar o comportamento do equipamento.

Realizando a configuração do equipamento para gerar uma onda senoidal com uma frequência de 3kHz, foram realizados testes alterando a tensão de pico a pico para se obter os valores máximos e mínimos reais de tensão.

Os resultados podem ser observados nas figuras 20 e 21.

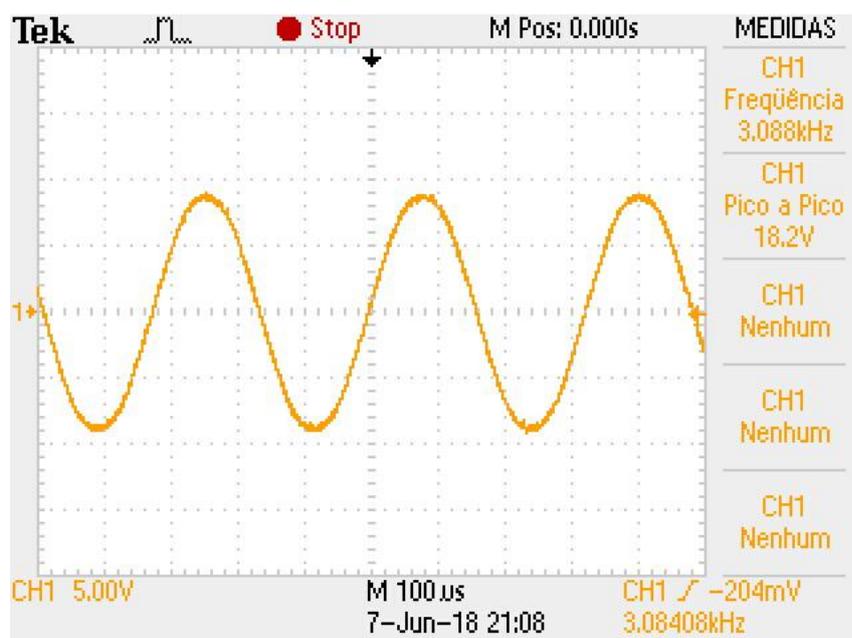
Figura 20: Menor tensão produzida pela fonte geradora de funções.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

A menor tensão de pico a pico fornecida pela geradora de funções possui o valor de 31,6mV.

Figura 21: Maior tensão produzida pela fonte geradora de funções.

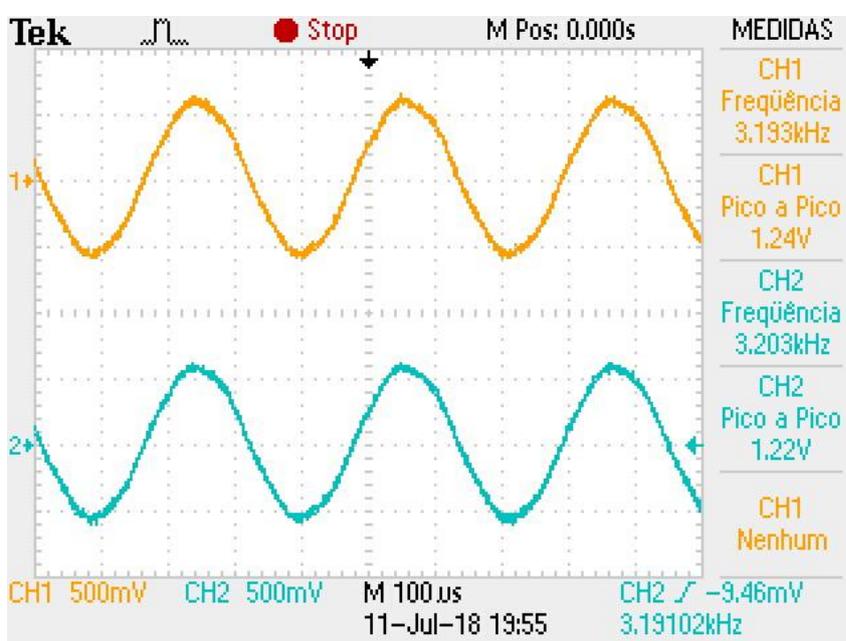


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O maior resultado obtido é de 18,2V de pico a pico, comprovando assim que o equipamento pode ser utilizado para gerar uma grande quantidade de variações de amplitudes do sinal de ruído.

Ao realizar a ligação de um alto-falante na saída do equipamento pôde-se perceber que havia uma deformação no sinal emitido, onde a onda em amarelo representa a saída da geradora de funções e a onda em azul representa o sinal no alto-falante, conforme ilustrado na figura 22.

Figura 22: Deformação do sinal.

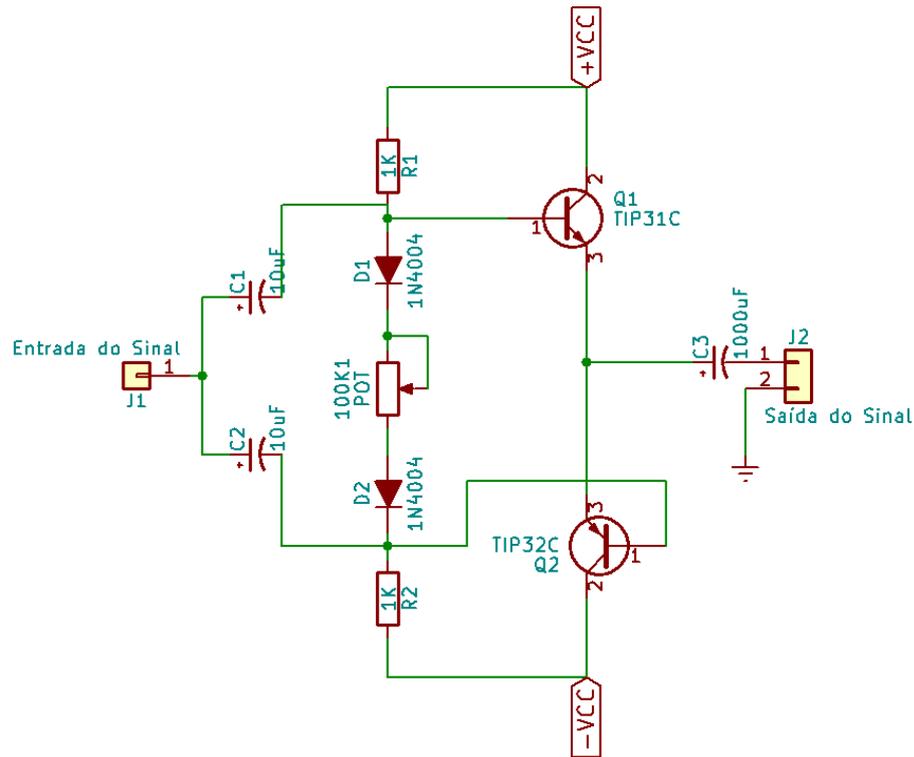


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

A ocorrência dessa deformação se deu pelo fato do equipamento não possuir características para fornecer corrente suficiente para realizar o perfeito funcionamento de um alto-falante. A solução desse problema foi então a aplicação de um circuito para realizar o ganho de corrente necessário.

Para a construção deste circuito foi tomada como base a utilização de transistores de potência. Os modelos escolhidos foram o TIP31 e o TIP32. O diagrama do circuito pode ser observado na figura 23.

Figura 23: Circuito de ganho de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

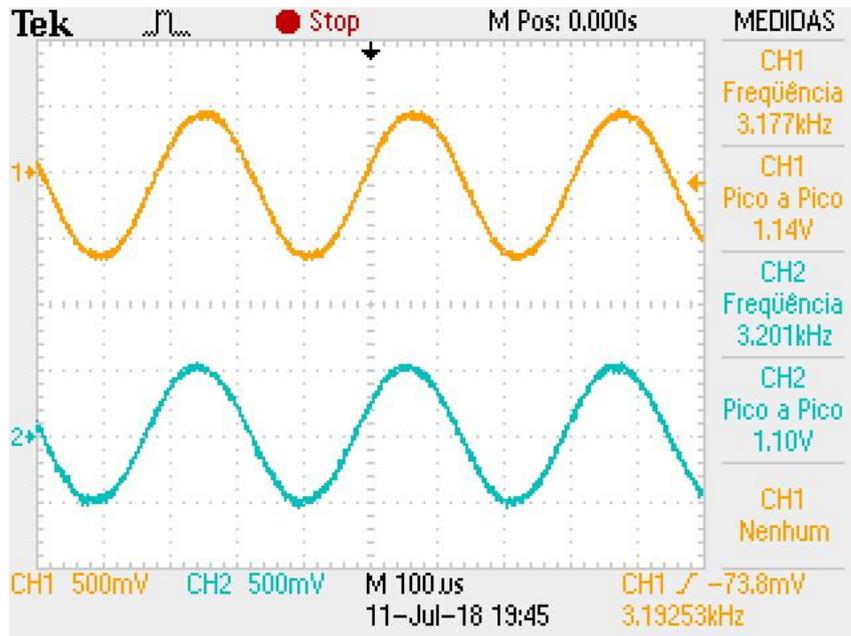
A saída deste circuito apresenta um filtro do tipo passa alta, onde a partir da equação 7 foi possível calcular qual seria a faixa de frequência que seria emitida.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (7)$$

A aplicação do capacitor com o valor de 1000uF se deu pelo fato da adoção de uma frequência de corte próxima do início do espectro da audição humana, que se encontra entre 20Hz e 20.000Hz.

Ao realizar novos testes com a aplicação deste circuito o resultado da figura 24 foi obtido.

Figura 24: Resultado da utilização do circuito de ganho de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Realizando o teste com as mesmas condições do teste realizado na figura 22 não houve mais a deformação do sinal fornecido pela geradora de funções.

4.2. Captação de áudio do microfone

Antes de iniciar a construção de qualquer circuito eletrônico do protótipo foi necessário averiguar o funcionamento do microfone para saber se o componente era capaz de captar de forma eficiente o sinal gerado. Para isso, com o auxílio do osciloscópio foram feitas simulações para obter os resultados na saída do microfone.

Os testes foram feitos em uma sala vazia com a menor presença possível de sons. Para constatar a quantidade de ruídos sonoros presentes foi realizada uma medição através do aplicativo para sistemas Android Decibelímetro (*Sound Meter*), onde o resultado da figura 25 foi encontrado.

Figura 25: Medição do nível sonoro ambiente.



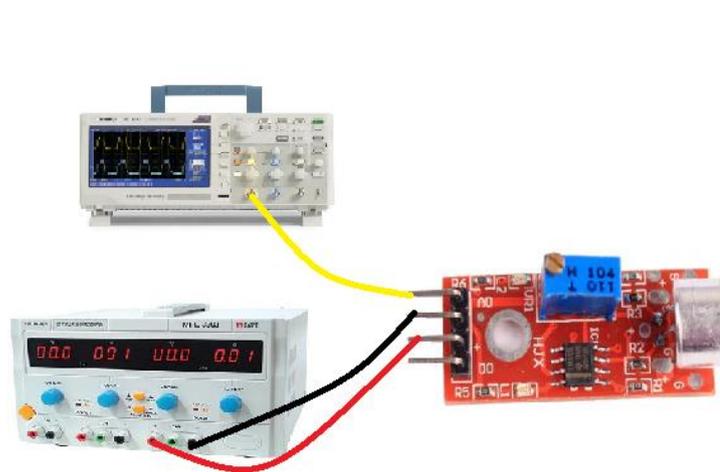
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O módulo do microfone possui 4 pinos, sendo dois deles destinados à alimentação, um que é destinado a alterar o seu nível lógico entre 0 e 1 quando há

alguma perturbação sonora, que não foi utilizado, e o outro que é a saída analógica do sinal captado pelo microfone.

A ligação elétrica realizada é apresentada na figura 26.

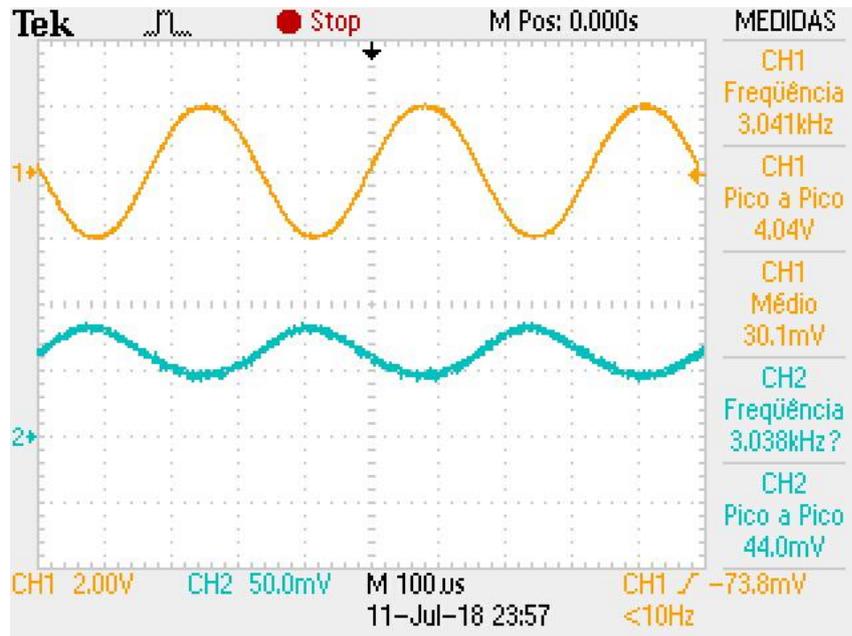
Figura 26: Ligação elétrica do microfone.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Com um alto-falante emitindo uma onda senoidal de 3kHz e 4V de pico a pico, a uma distância de aproximadamente 40 milímetros do microfone foi realizada a captura apresentada na figura 27

Figura 27: Leitura do sinal sonoro pelo microfone.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Conforme pode ser observado, o microfone foi capaz de realizar a leitura do sinal emitido pelo alto-falante, inclusive realizando a inversão do sinal, contudo foi constatado também que o sinal fornecido pelo módulo do microfone apresenta um nível de tensão média elevado de aproximadamente 50mV.

Esta medição teve extrema importância pois a partir dela foi definida a necessidade de se filtrar a componente DC presente no sinal, que conforme pode ser observado na figura 27, foi responsável pelo deslocamento positivo da onda em azul.

4.3. Tratamento do sinal captado

A etapa de tratamento do sinal captado pelo microfone envolve a pré-amplificação e a amplificação por um amplificador de potência.

Esta etapa do desenvolvimento do protótipo foi dividida em duas etapas, a elaboração do circuito pré-amplificador e a elaboração do circuito amplificador de potência. Ambas foram elaboradas simultaneamente, contudo só foram integradas ao final dos testes de cada uma.

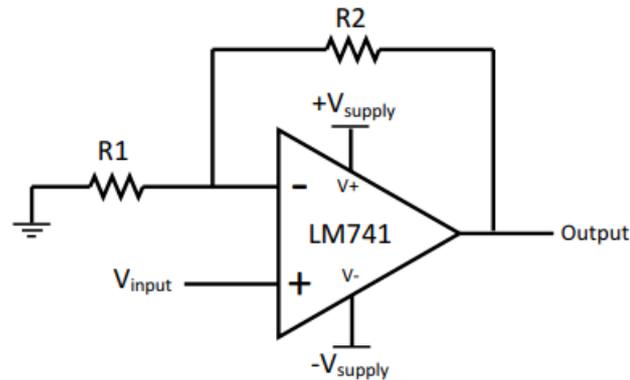
4.3.1. Pré-amplificação

A etapa de pré-amplificação foi responsável por realizar o ganho necessário do sinal captado pelo módulo do microfone e elevar este valor para um patamar de tensão maior, pois como já foi constatado pelos testes realizados anteriormente apenas com o módulo do microfone, o nível de tensão produzida é baixa, sendo necessário aumentar esse nível antes de realizar a etapa da amplificação de potência.

O circuito desenvolvido para realizar esta etapa do tratamento do sinal captado utiliza como componente principal o amplificador operacional LM741.

O LM741 é um amplificador operacional que possui aplicações em diversos tipos de circuitos, podendo operar com tensões de 10 a 22V. O circuito básico de montagem deste amplificador pode ser retirado do próprio catálogo de informações do componente, e é apresentado a seguir:

Figura 28: Amplificador LM741, montagem não inversora



Fonte: Adaptado de Texas Instruments, 2015.

Para calcular o ganho que este circuito possui, deve-se seguir as seguintes equações:

- Amplificador Não Inversor:

$$Ganho = 1 + \frac{R2}{R1} \quad (8)$$

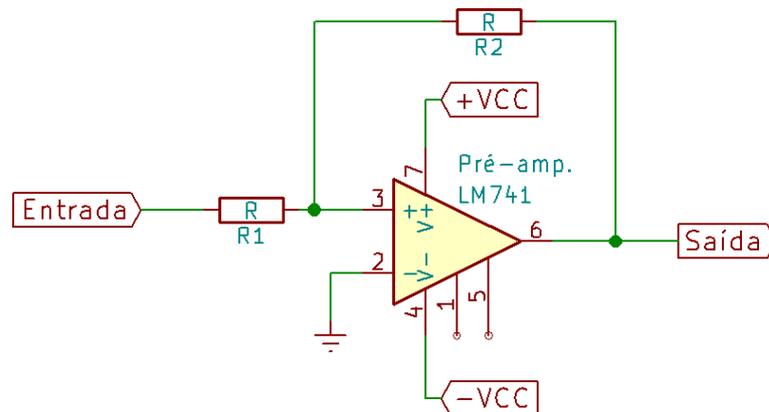
- Amplificador Inversor:

$$Ganho = -\frac{R2}{R1} \quad (9)$$

Como o objetivo desta etapa da construção do protótipo é realizar o ganho de tensão, o LM741 foi utilizado na sua forma não-inversora, uma vez que o sinal fornecido pelo microfone já está invertido. Apenas para fins de testes e para averiguar se o componente atende às necessidades foi determinado um ganho de uma vez o sinal de entrada, ou seja, R1 e R2 deverão ter os mesmos valores, não sendo estes os valores finais que serão utilizados no projeto.

Com essas definições, o seguinte circuito foi montado e testado:

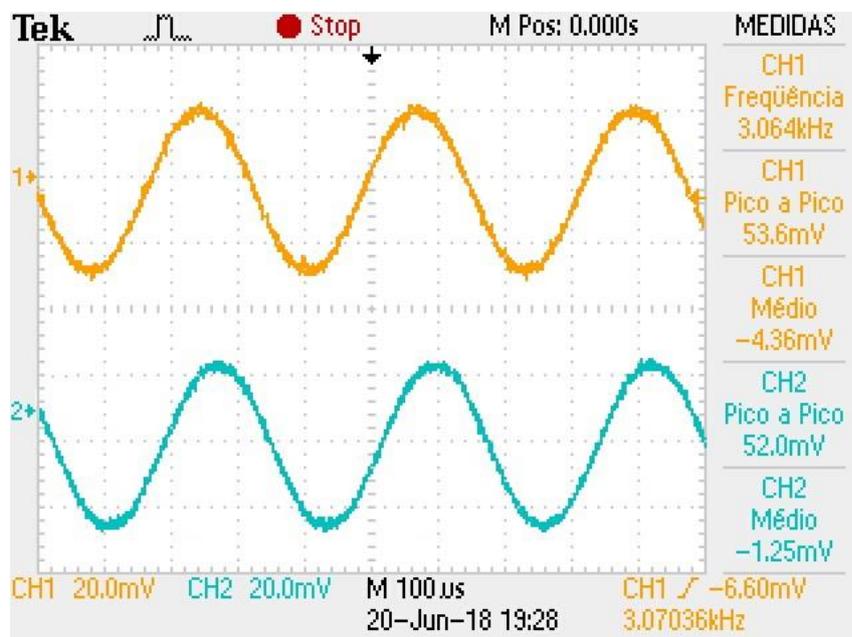
Figura 29: Circuito utilizando com o LM741.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Aplicando na entrada do circuito uma onda senoidal de 3kHz, com uma tensão de pico a pico de aproximadamente 50mV produzida pela geradora de funções, sem a utilização do microfone, o resultado pode ser observado na figura 30.

Figura 30: Comparação entre a entrada e a saída do circuito montado utilizando o LM741.

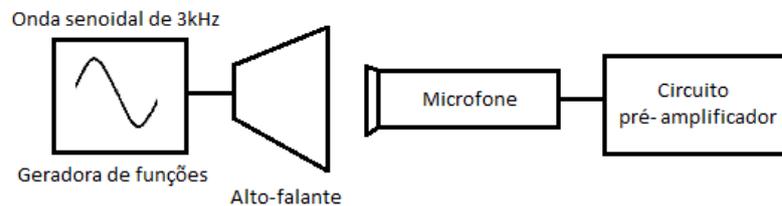


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A onda apresentada em amarelo representa o sinal controlado produzido pela geradora de funções, a onda em azul é a resultante da passagem pelo LM741.

Analisando os resultados obtidos verificou-se que o pré-amplificador estava funcionando de acordo com o esperado. A próxima etapa de teste foi alimentar a entrada do amplificador com o sinal captado pelo microfone. Para esse teste foi utilizado um alto-falante emitindo uma onda sonora senoidal de 3kHz como fonte de ruído sonoro. O microfone foi posicionado a frente deste alto-falante e a sua saída foi ligada ao circuito pré-amplificador, conforme pode ser observado no diagrama da figura 31.

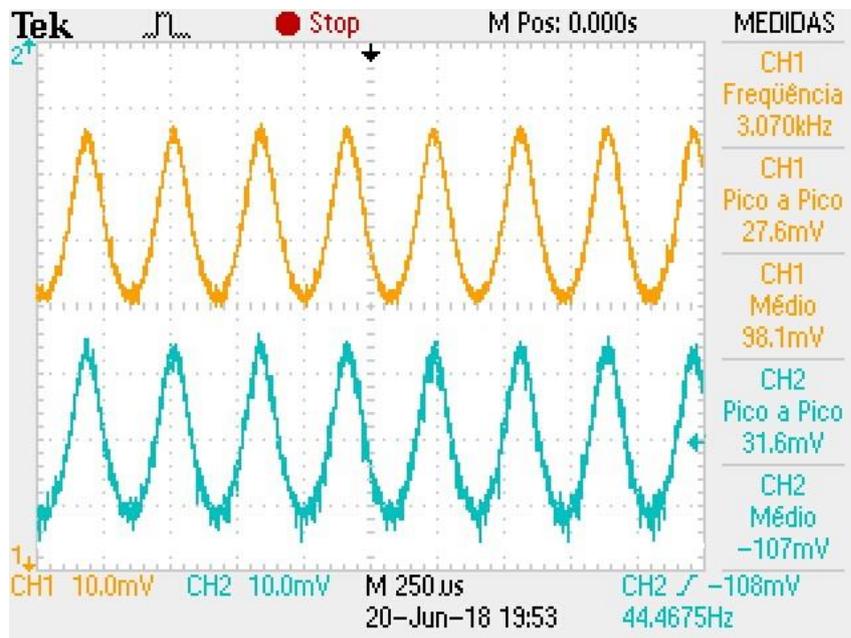
Figura 31: Esquema de montagem do teste do pré-amplificador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

É importante salientar que para este teste o circuito de ganho de corrente apresentado na figura 23 não estava sendo utilizado ainda, portando esta pode ser a justificativa da distorção do sinal. Com isso, o resultado da figura 32 foi obtido.

Figura 32: Microfone ligado ao circuito do LM741.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Conforme pode ser observado na figura 32, houve o surgimento de ruídos no sinal da saída do pré-amplificador (onda em azul) quando comparamos ambas as ondas. O resultado obtido levantou a questão se o circuito montado iria gerar resultados satisfatórios quando aplicado ao amplificador de potência.

Como o amplificador de potência foi desenvolvido simultaneamente ao circuito do pré-amplificador foi possível realizar novos testes, onde ficou comprovado que os ruídos gerados atrapalharam a amplificação do sinal, resultados estes, que serão demonstrados mais adiante quando for apresentado o circuito do amplificador de potência.

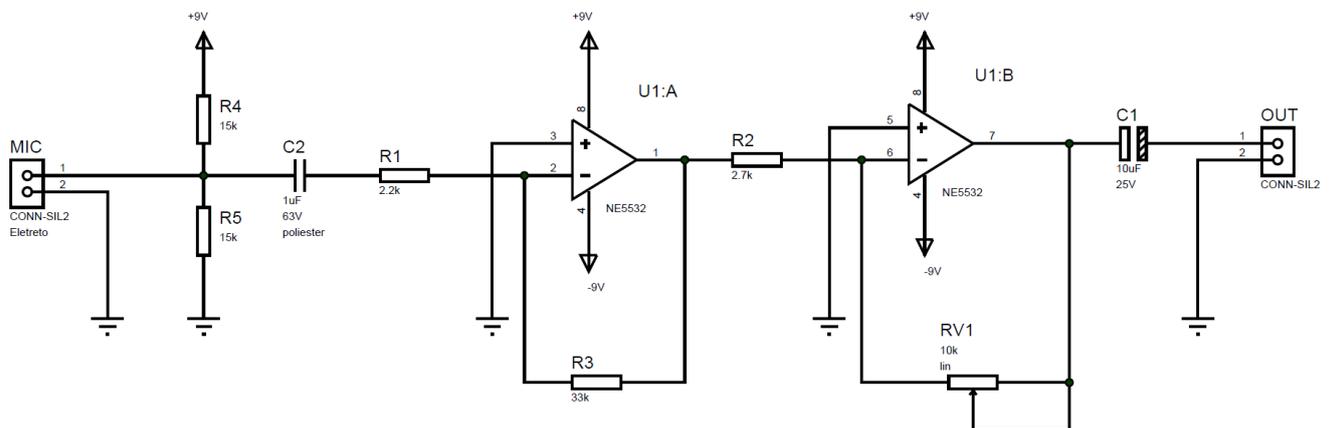
Descartada então a utilização do amplificador operacional LM741, começaram novas pesquisas para encontrar outro componente que pudesse ser utilizado nesta etapa do projeto.

O novo amplificador escolhido para serem realizados testes foi o NE5532. A escolha deste componente teve como fator determinante o seu bom desempenho em circuito desenvolvido e disponibilizado *online*, onde o componente foi utilizado para pré-amplificação de um microfone de eletreto.

O circuito original tinha como princípio duas etapas de amplificação, sendo a primeira e a segunda utilizando as portas inversoras do componente, produzindo assim um alto ganho sem inversão de fase.

O circuito original pode ser encontrado na figura 33.

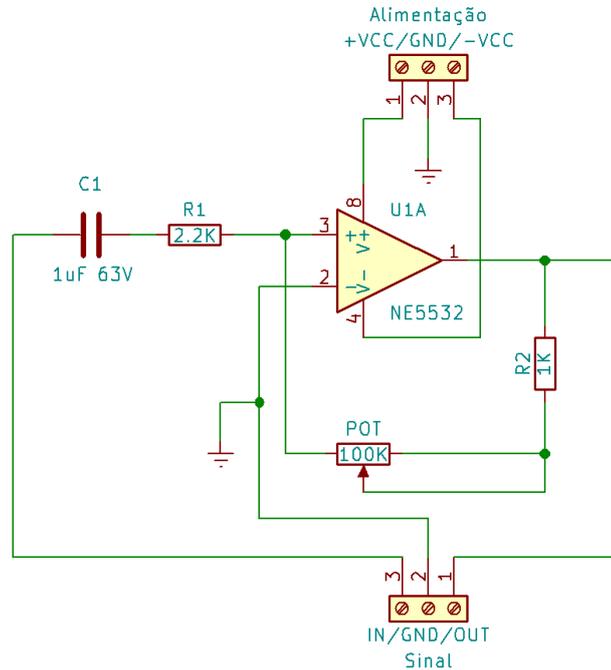
Figura 33: Circuito com o NE5532.



Fonte: WR Kits, 2017.

Para a construção do projeto não necessitamos de inversão do sinal nem de ganhos elevados, portanto optamos por utilizar apenas metade do circuito apresentado na figura 33. O circuito montado para testes pode ser visto na figura 34.

Figura 34: Circuito montado com o NE5532.

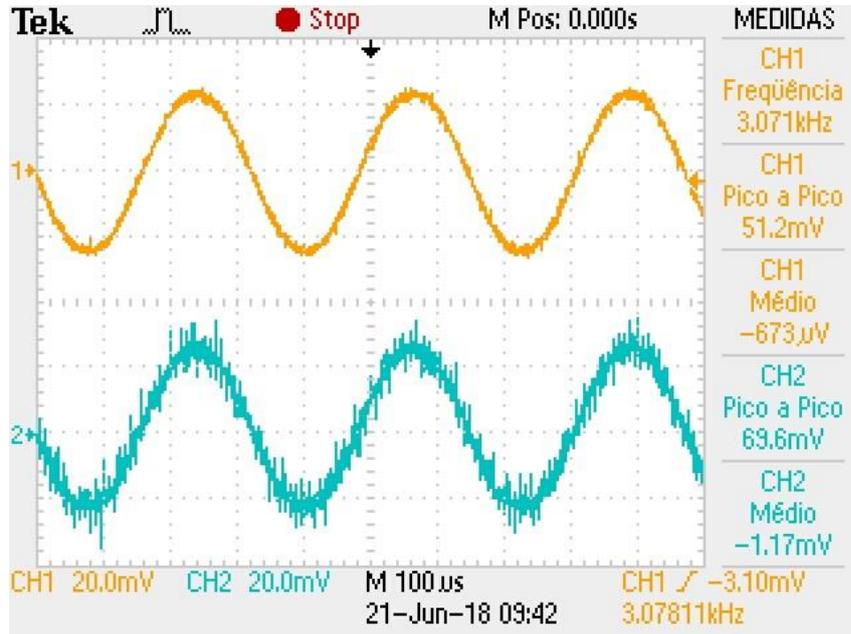


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Algumas alterações foram feitas no circuito, como o acréscimo de um potenciômetro para um ajuste variável de ganho do circuito e a eliminação da etapa de polarização do microfone, visto que esta parte do circuito já está presente no módulo do microfone.

Os mesmos testes realizados com o LM741 foram realizados com o NE5532, primeiramente ligando um sinal conhecido e gerado pelo gerador de funções na entrada do circuito para analisar o resultado em sua saída. Aplicando uma onda senoidal de 3kHz e aproximadamente 50mV de pico a pico, obtivemos o resultado apresentado na figura 35.

Figura 35: Comparação entre a entrada e a saída do circuito montado utilizando o NE5532.

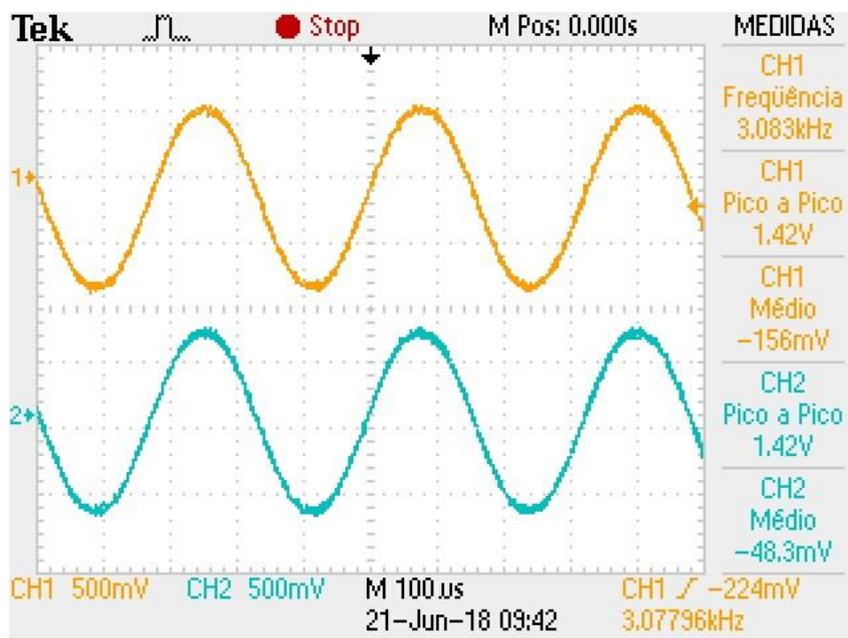


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Como pode ser observado na figura 35, houve um acréscimo considerável de ruídos no sinal de saída do circuito (onda em azul).

Alterando as condições de testes para valores maiores, aumentamos a tensão de entrada do circuito para um valor de aproximadamente 1,4V de pico a pico, e o resultado pode ser observado na figura 36, um sinal de saída limpo, sem ruídos ou distorções.

Figura 36: Comparação entre a entrada e a saída do circuito montado utilizando o NE5532 com maior valor de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Procurando melhorar os resultados com o NE5532, realizamos a compra de outro componente, montamos novamente o circuito e realizamos novos testes, porém não houveram resultados satisfatórios.

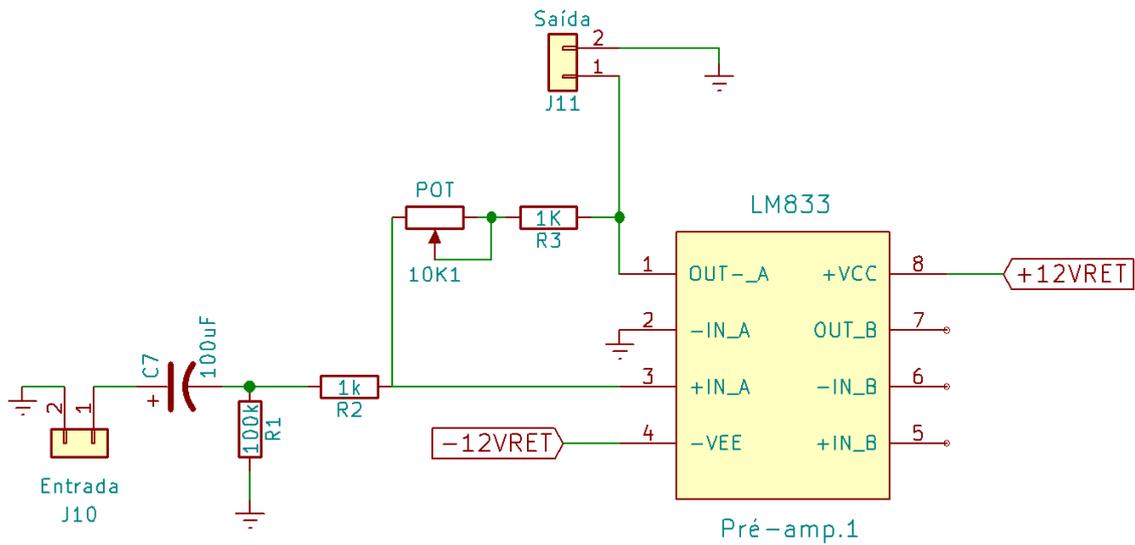
Apenas para uma constatação final, este circuito foi também ligado ao amplificador de potência. O resultado desse teste poderá ser encontrado mais adiante quando o circuito do amplificador de potência for apresentado.

Como a adoção de componentes triviais para a etapa de pré-amplificação não estava apresentando resultados positivos, foi necessário partir para a utilização de um componente com maior confiabilidade para obter-se resultados satisfatórios.

O componente escolhido foi o LM833, que é um amplificador de áudio que possui características mais robustas para a redução de ruídos.

O circuito que foi construído é apresentado na figura 37 e os testes realizados nas figuras 38 e 39.

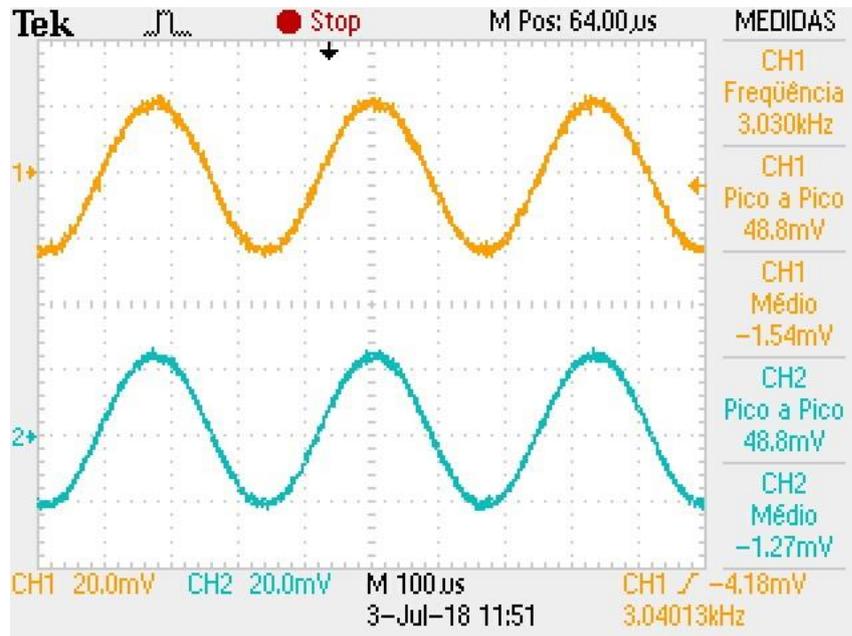
Figura 37: Pré-amplificador com o LM833.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

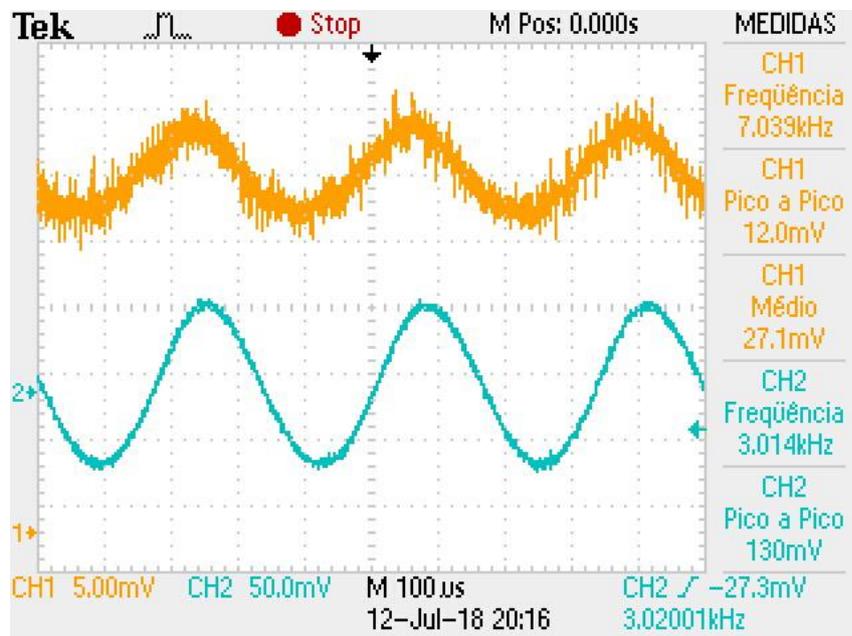
Dentre as características da montagem deste circuito estão o potenciômetro para controle do ganho e a utilização de um capacitor de desacoplamento na entrada do circuito para eliminar a componente DC apresentada na figura 27.

Figura 38: Circuito do LM833 com ganho 1.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 39: Microfone captando sinal e conectado ao LM833.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Como os testes apresentaram resultados positivos e sem ruídos este componente foi adotado para ser utilizado no projeto.

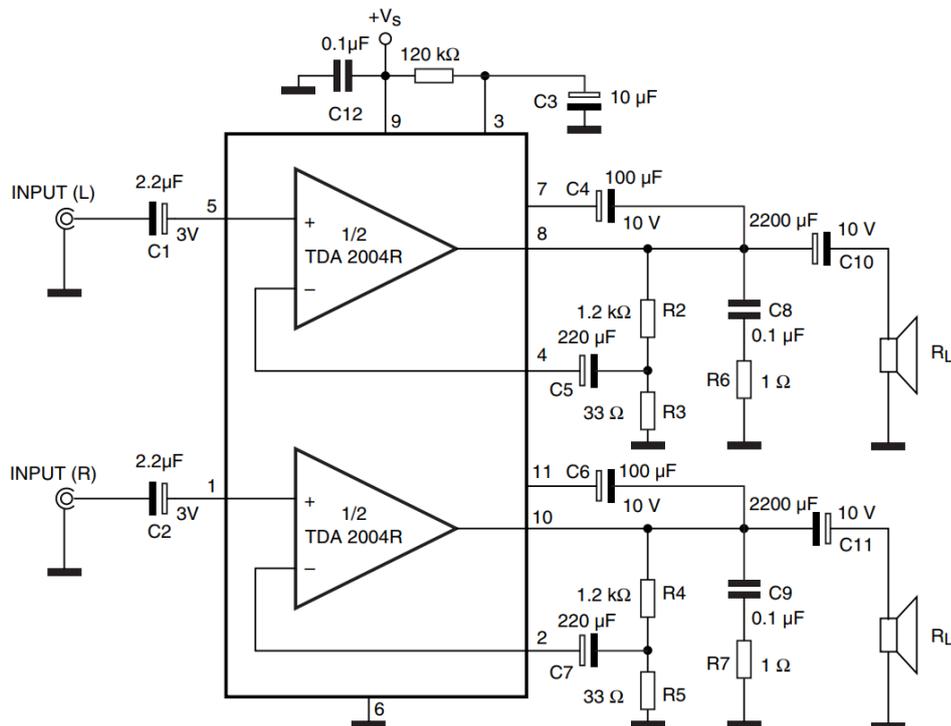
4.3.2. Amplificação de potência

Para a etapa da amplificação de potência foi definido a utilização do componente eletrônico TDA2004.

O TDA2004 é um amplificador de 20W de potência dividida em dois canais, ou seja, é um amplificador estéreo de 10W.

Para a construção do circuito do amplificador de potência a ficha técnica do componente foi consultada, onde foi encontrado o esquemático típico de montagem e a lista de componentes necessários, ambos apresentados nas figuras 40 e 41.

Figura 40: Circuito típico de montagem do TDA2004.



Fonte: STMicroelectronics, 2013.

Figura 41: Lista de componentes necessários para a construção do circuito.

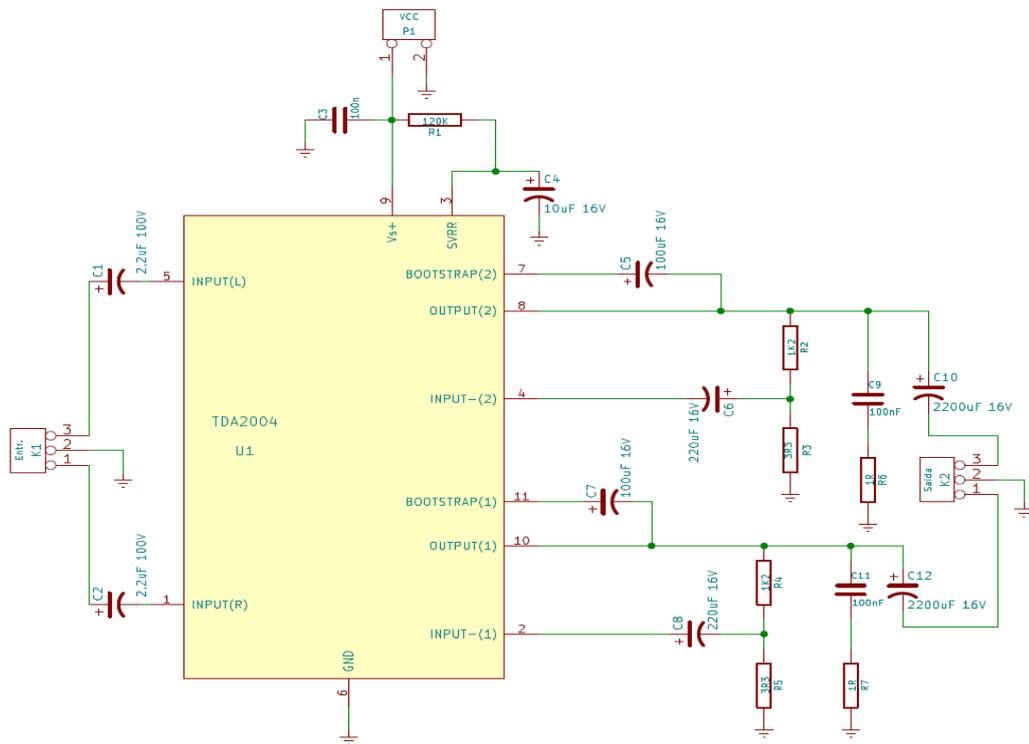
Component	Recommended value	Purpose	Larger than	Smaller than r
R1	120 k Ω	Optimization of the output signal symmetry	Smaller P _{omax}	Smaller P _{omax}
R2, R4	1 k Ω	Closed loop gain setting ⁽¹⁾	Increase of gain	Decrease of gain
R3, R5	3.3 Ω		Decrease of gain	Increase of gain
R6, R7	1 Ω	Frequency stability	Danger of oscillation at high frequency with inductive load	
C1, C2	2.2 μ F	Input DC decoupling	High turn-on delay	High turn-on pop, higher low frequency cutoff. Increase of noise
C3	10 μ F	Ripple rejection	Increase of SVR, Increase of the switch-on time	Degradation of SVR
C4, C6	100 μ F	Bootstrapping	-	Increase of distortion at low frequency
C5, C7	100 μ F	Feedback input DC decoupling	-	-
C8, C9	0.1 μ F	Frequency stability	-	Danger of oscillation
C10, C11	1000 to 2200 μ F	Output DC decoupling	-	Higher low-frequency cut-off

Fonte: STMicroelectronics, 2013.

Com estas informações e com o auxílio do *software* “KiCad” para desenvolvimento de circuitos eletrônicos e placas de circuito impresso, redesenhamos o circuito típico com o intuito de criar um layout para uma placa de circuito impresso, conforme apresentado na figura 42. A decisão de construir o circuito para realizar os testes e não utilizar a *proto-board* (placa de ensaios) foi tomada pelo fato de que o circuito contém muitos componentes, e isso tornariam a montagem na placa de testes extremamente complexa.

Para a confecção da placa foi utilizado o método de transferência térmica. Por se tratar de um processo desconhecido o esforço empregado nesta etapa do projeto foi muito maior do que o esperado para se obter resultados positivos.

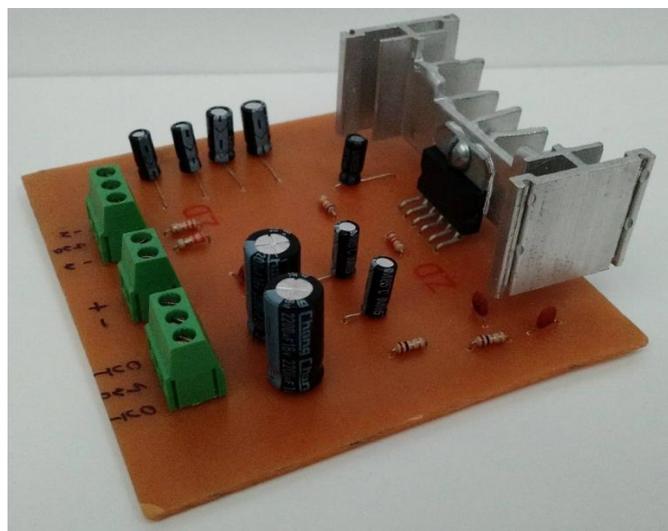
Figura 42: Circuito do TDA2004 desenvolvido em software.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O resultado da confecção da placa de circuito impressa pode ser observado na figura 43.

Figura 43: Montagem final da placa.

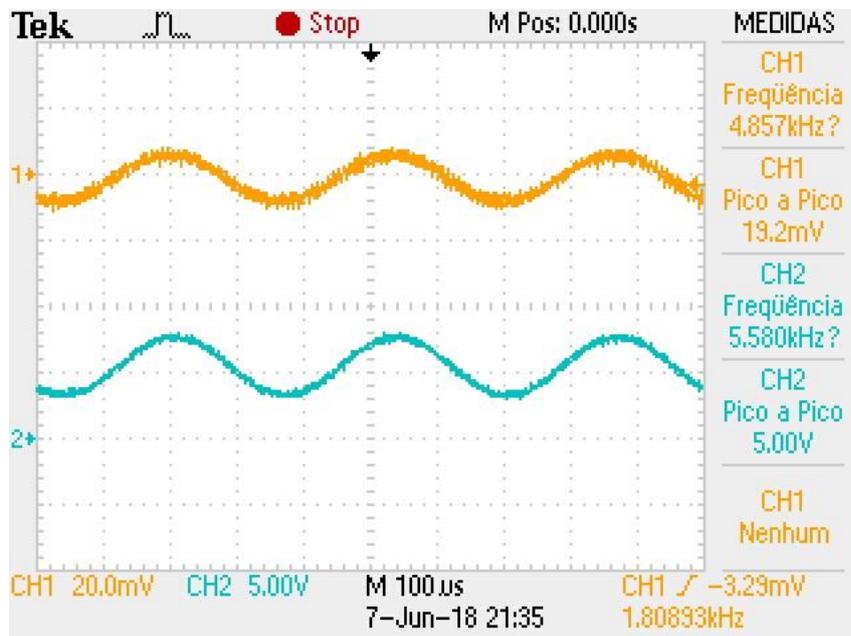


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Com a construção do circuito amplificador de potência finalizada foi possível iniciar a etapa de testes. O primeiro teste realizado foi para determinar na prática os limites de amplificação do circuito.

Aplicando na entrada do circuito uma onda senoidal de 3kHz com aproximadamente 20mV de pico a pico o resultado da figura 44 foi obtido.

Figura 44: TDA2004 amplificando onda de baixa amplitude.

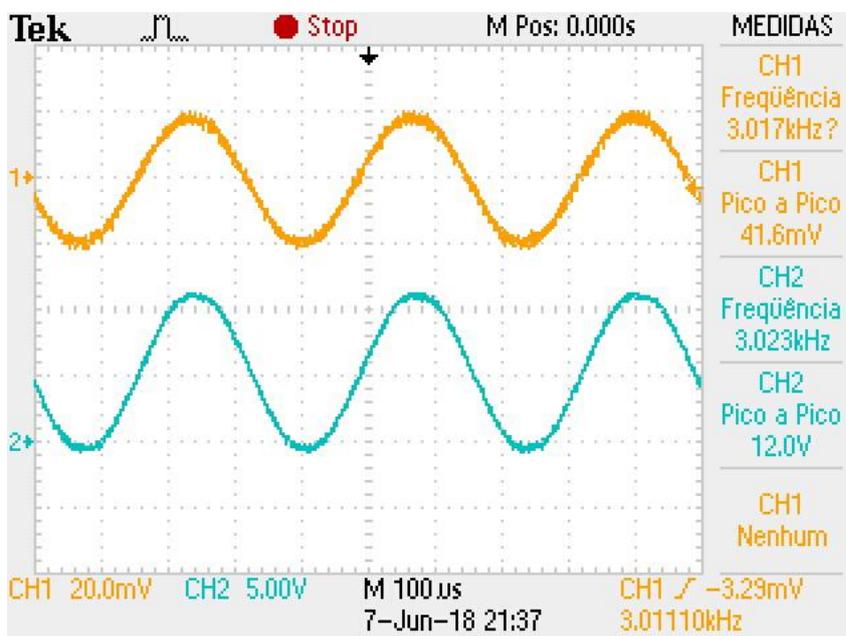


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Conforme pode ser observado a amplificação ocorreu da maneira esperada. A tensão de entrada do circuito foi amplificada em 260 vezes.

Aumentando o valor da tensão de pico a pico até o momento de saturação do amplificador (limite máximo do sinal de entrada) obtivemos o resultado da figura 45:

Figura 45: TDA2004 no limite de amplificação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Com no máximo 41,6mV de pico a pico na entrada, o circuito com o TDA2004 já entra na sua faixa de saturação, valor muito abaixo do declarado na ficha técnica do componente, como pode constatar na figura 46.

Figura 46: Ficha técnica do TDA2004, tensão de saturação na entrada em destaque.

CT	Cross talk	$V_S = 14.4 \text{ V}; V_o = 4 \text{ V}_{\text{RMS}};$ $R_g = 5 \text{ k}\Omega; R_L = 4 \Omega;$ $f = 1 \text{ kHz}$ $f = 10 \text{ kHz}$	50 40	60 45	-	mW mW
V_i	Input saturation voltage	-	300	-	-	mW
R_i	Input resistance	$f = 1 \text{ kHz}$	70	200	-	$\text{k}\Omega$
f_L	Low frequency roll off (-3 dB)	$R_L = 4 \Omega$ $R_L = 2 \Omega$ $R_L = 3.2 \Omega$ $R_L = 1.6 \Omega$	-	-	35 50 40 55	Hz
f_H	High frequency roll off (-3 dB)	$R_L = 1.6 \Omega \text{ to } 4 \Omega$	15	-	-	kHz

Fonte: Adaptado de *STMicroelectronics*, 2013.

Observando a ficha técnica do componente pudemos ainda constatar um erro cometido pelo fabricante, onde a tensão de saturação na entrada do amplificador foi informada em *Watts*. Procurando em uma versão mais antiga do documento encontramos o valor informado corretamente, que é demonstrado na figura 47.

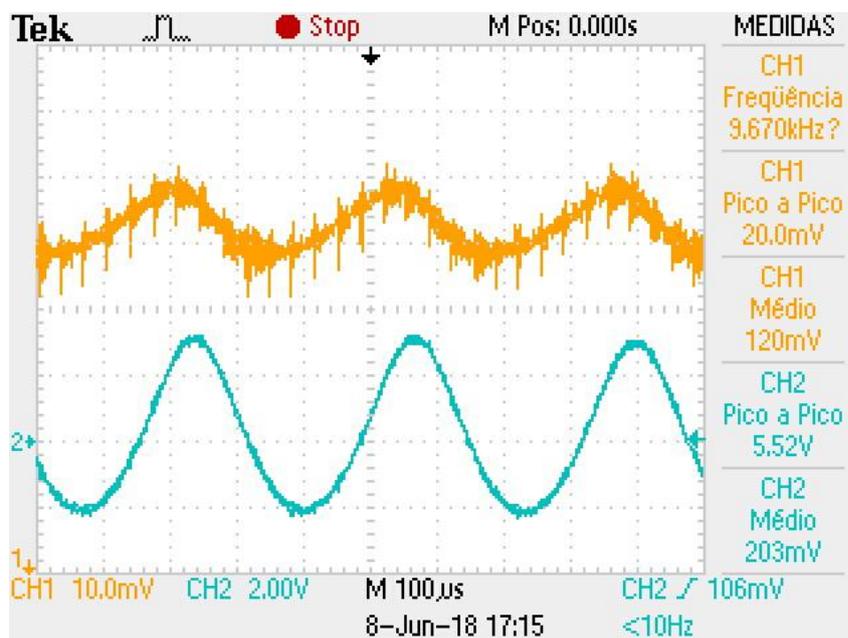
Figura 47: Ficha técnica do TDA2004 versão antiga.

d	Distortion (each channel)	f = 1KHz V _S = 14.4V; R _L = 4Ω P _O = 50mW to 4W V _S = 14.4V; R _L = 2Ω P _O = 50mW to 6W V _S = 13.2V; R _L = 3.2Ω P _O = 50mW to 3W V _S = 13.2V; R _L = 1.6Ω P _O = 50mW to 6W		0.2 0.3 0.2 0.3	1 1 1 1	% % % %
CT	Cross Talk	V _S = 14.4V V _O = 4Vrms R _L = 4Ω f = 1KHz f = 10KHz R _o = 5KΩ	50 40	60 45		dB dB
V _i	Input Saturation Voltage		300			mV

Fonte: Adaptado de STMicroelectronics, 1995.

Mesmo com o problema da saturação do amplificador de potência prosseguimos com a bateria de testes para analisar se o uso deste amplificador se tornaria inviável na execução do projeto. Para isso realizamos a ligação do módulo do microfone diretamente na entrada do circuito do amplificador de potência para analisar seu funcionamento, conforme mostra a figura 48.

Figura 48: Onda senoidal de 20mV aplicada na entrada do amplificador de potência.

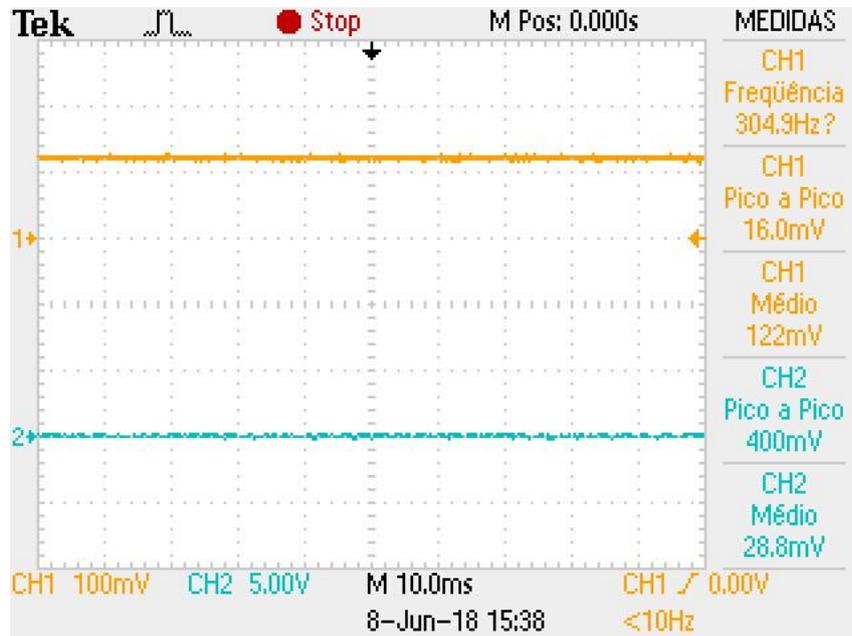


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Como pode ser observado na figura 48, excitando o microfone com o auxílio de um alto-falante emitindo uma onda sonora senoidal de 3kHz, o resultado da amplificação ocorreu da maneira esperada.

Em seguida deixamos o microfone conectado à placa, mas não geramos nenhum sinal, apenas o ruído sonoro desconhecido e presente no ambiente, obtendo assim o resultado da figura 49.

Figura 49: Microfone conectado ao amplificador de potência sem excitação sonora.



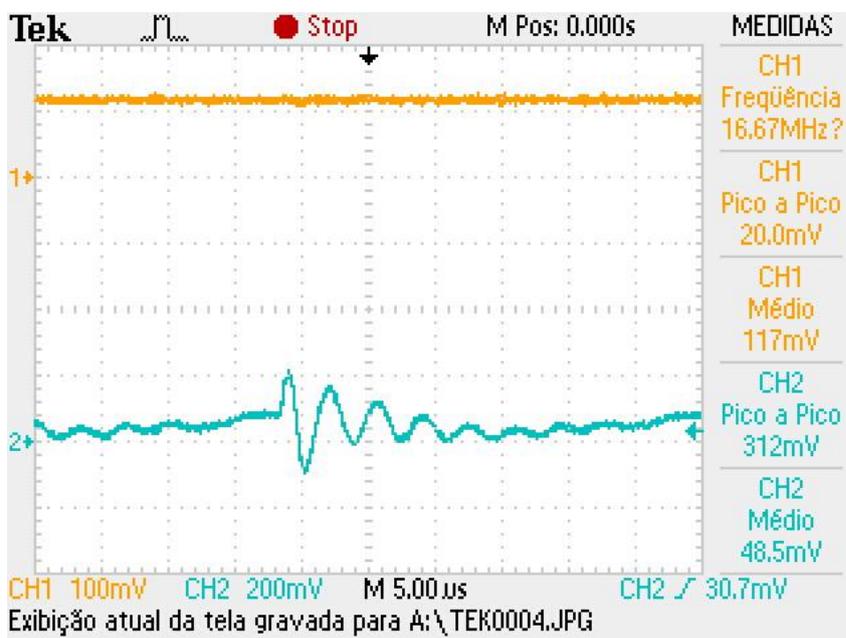
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Conforme pode ser analisado, o sinal em amarelo representa a saída do microfone antes da amplificação e sinal em azul é a resultante da amplificação.

Quando substituímos as pontas de provas do osciloscópio na saída do amplificador de potência por um alto-falante, constatamos a presença de um chiado audível relativamente alto. Procurando entender a origem deste problema voltamos a analisar os resultados no osciloscópio.

Diminuindo a escala de visualização no equipamento encontramos o resultado apresentado na figura 50 na saída do amplificador:

Figura 50: Ruído gerado na saída do amplificador de potência.



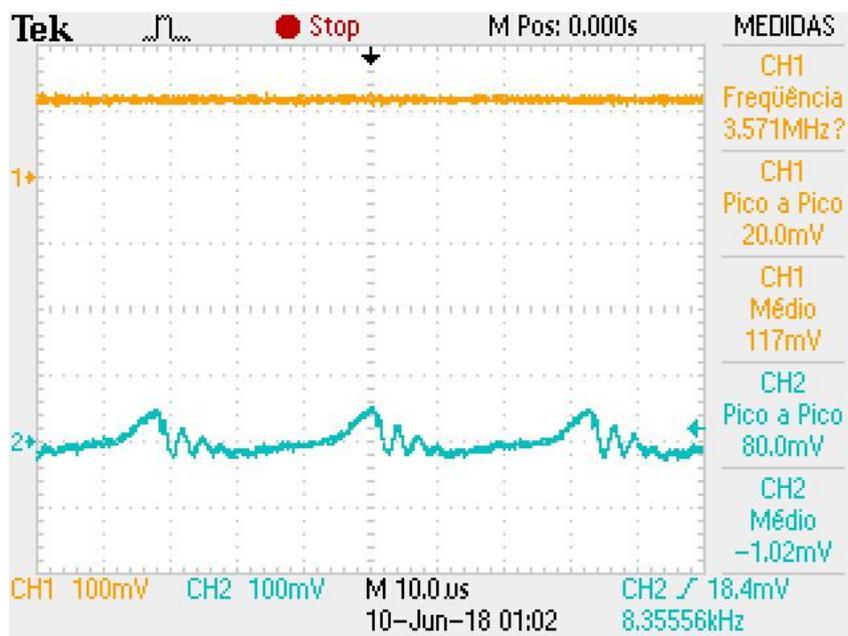
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Conforme a figura 50 mostra, um sinal de origem desconhecida estava sendo induzido na saída do amplificador. Tal sinal não havia sido percebido anteriormente pois a escala de medição adotada pelo osciloscópio era muito maior do que o valor do ruído.

Procurando uma solução para este problema realizamos a aplicação de capacitores na alimentação do circuito, que iriam ter a função de filtragem de ruídos produzidos pela fonte de alimentação em consequência da variação da tensão de *Ripple*. Para o dimensionamento dos capacitores seguimos a regra apresentada por Braga (2013), onde para cada 1 *ampère* utiliza-se 1000uF de capacitância. A base para determinação da corrente no circuito foi a corrente máxima de pico que o TDA2004 pode atingir, informação encontrada no catálogo do componente.

Aplicando os capacitores e realizando novas medições, o resultado da figura 51 foi encontrado.

Figura 51: Saída do amplificador após aplicação de capacitores de filtragem do ruído.

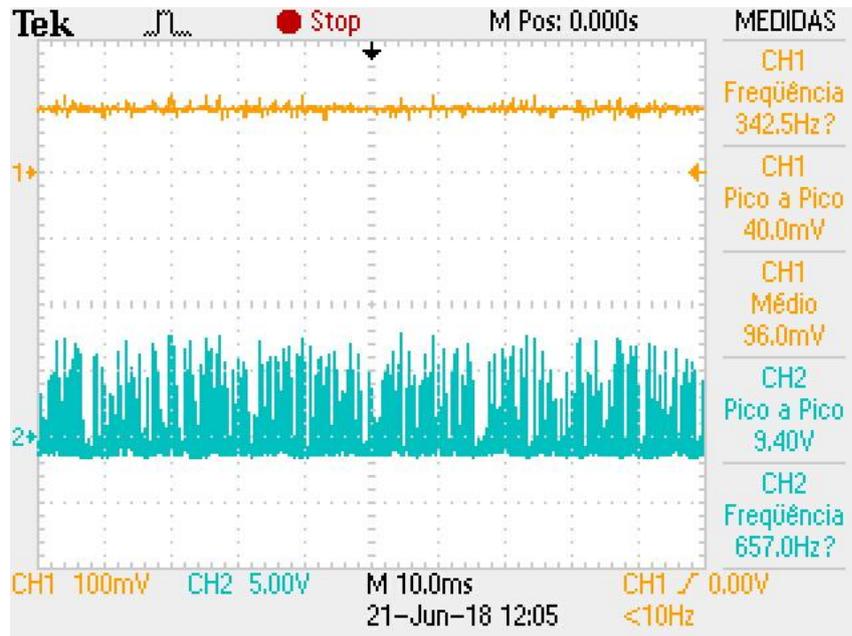


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A aplicação do filtro surtiu efeito sobre o ruído, diminuindo consideravelmente o seu valor e deixando de produzir o ruído audível no alto-falante, permanecendo apenas uma leve vibração.

Prosseguindo a etapa de testes, realizamos a ligação do circuito pré-amplificador utilizando o amplificador operacional LM741, que estava captando apenas o ruído sonoro do ambiente do local das medições, ajustado para o ganho um ao amplificador de potência e obtivemos os resultados da figura 52.

Figura 52: Pré-amplificador ligado ao amplificador de potência.

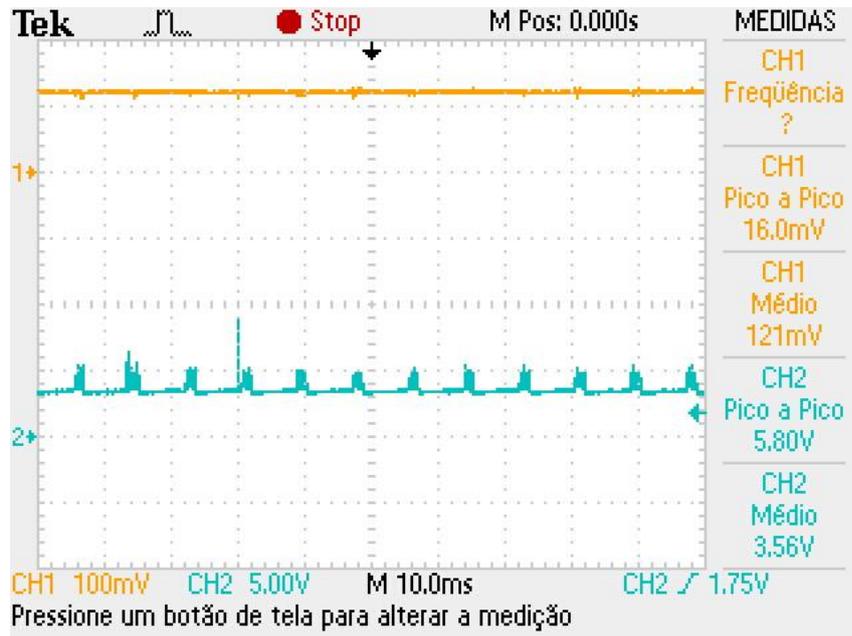


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Como pode ser visto, a saída do amplificador de potência ficou com uma enorme quantidade de ruídos mesmo o microfone não estando sendo forçado a captar algum som em específico, inviabilizando totalmente o uso do circuito montado com o LM741.

Conforme citado anteriormente, outro circuito de pré amplificação já havia sido construído e o mesmo teste foi aplicado a ele, onde o resultado é apresentado na figura 53:

Figura 53: Pré-amplificador com o NE5532 ligado ao amplificador de potência.



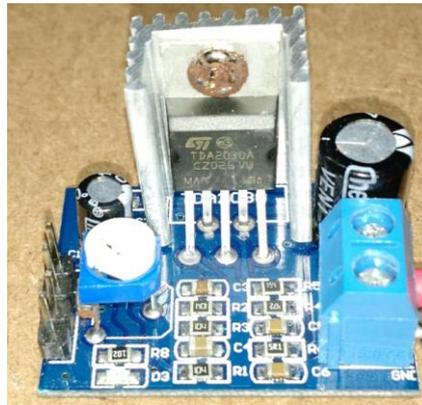
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Como pode ser observado o mesmo problema ocorrido com o LM741 ocorreu com o NE5532.

Procurando sanar todos os problemas de ruídos nos circuitos, tomamos a medida de substituição do amplificador de potência e a aplicação do filtro capacitivo na alimentação de todos os circuitos.

Para substituir o TDA2004 recorreremos à uma solução pronta encontrada no mercado. Um circuito contendo o TDA2030 foi adquirido para fazer parte do projeto conforme a figura 54 mostra.

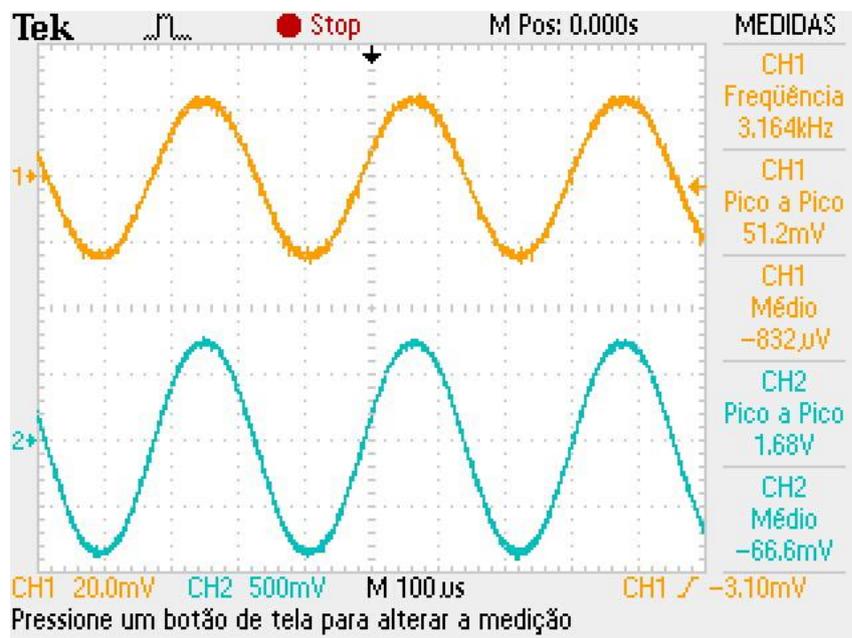
Figura 54: Circuito amplificador de potência adquirido.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

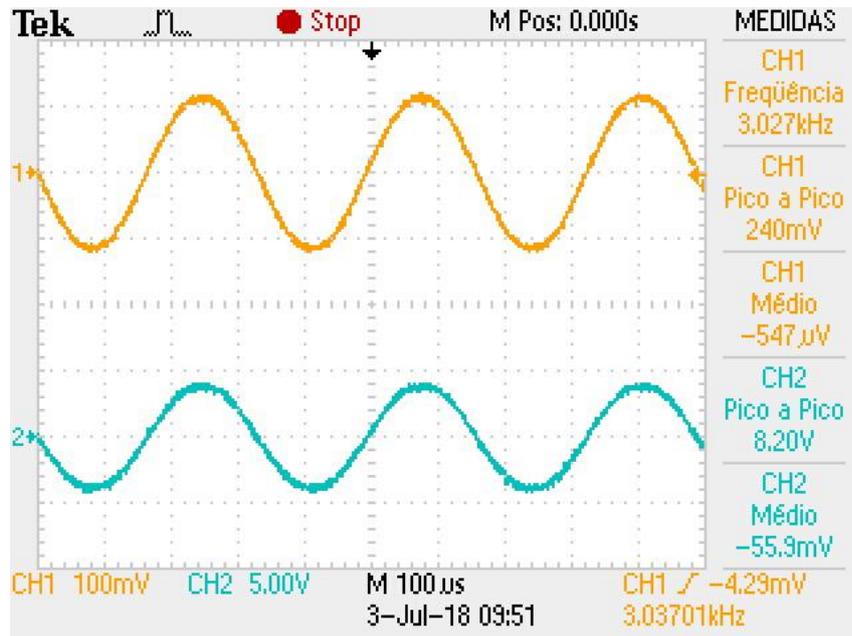
Para testar o novo componente os mesmos testes realizados no antigo amplificador de potência foram realizados, conforme ilustra as figuras 55 e 56.

Figura 55: TDA2030 amplificando onda com baixa amplitude.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

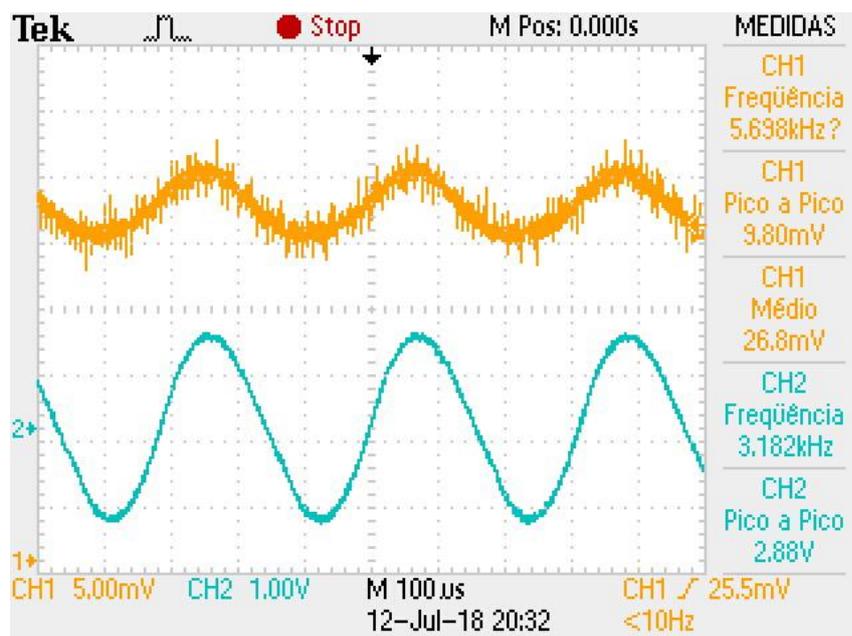
Figura 56: TDA2030 no limite para saturar.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Substituindo a geradora de funções pelo microfone captando a onda sonora produzida pelo alto-falante o resultado da figura 56 foi obtido.

Figura 57: TDA2030 amplificando o sinal fornecido pelo microfone.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O amplificador de potência se mostrou eficiente na sua função e livre da produção de ruídos.

4.4. Determinação dos alto-falantes do protótipo

Como o ruído a ser cancelado foi previamente determinado, tornou-se necessário realizar a escolha dos alto-falantes que foram utilizados para emitir o ruído e o antirruído.

Como a faixa de frequência foi previamente estabelecida, os alto-falantes escolhidos teriam que ter sua faixa de funcionamento compatíveis com os 3kHz.

Os tipos mais comuns de alto-falantes disponíveis no mercado são:

- *Woofers*: Indicado para sons graves e médios, sua faixa de operação normalmente encontra-se entre 50Hz e 5kHz.
- *Subwoofers*: Indicado principalmente para frequências baixas, não se enquadrando nos requisitos para o projeto;
- *Mid-range*: Utilizado para reproduzir frequências médias entre 300Hz e 5kHz, modelo este que se enquadra na necessidade do projeto.

Existem ainda alguns outros tipos de alto-falantes, mas na sua maioria eles englobam mais de uma funcionalidade dos acima listados.

Com o tipo de alto-falante definido, fomos em busca do modelo que mais se adequasse levando em consideração o seu tamanho físico, que não deveria ser muito grande, e a faixa de operação que deveria estar dentro de 3kHz. O modelo escolhido possui as seguintes especificações:

- Faixa de frequência: 180 a 7kHz;
- Potências: 40w RMS;
- Impedância: 4 Ohms.

Figura 58: Alto-falante escolhido para o protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.5. Análise do cancelamento

A ideia inicial para a análise do cancelamento era de realizá-la com a utilização de um segundo microfone em um ponto intermediário entre os dois alto-falantes. O mesmo, ligado a um circuito seria responsável pela realimentação do sistema de cancelamento.

Por se tratar da parte mais complexa do trabalho e por uma questão de prazo de entrega a função da realimentação não foi executada, porém foi colocada como proposta futura de melhoria ao projeto.

Para a verificação do cancelamento foi utilizado um segundo microfone ligado ao osciloscópio e posicionado em um ponto intermediário entre os alto-falantes. A leitura realizada pelo osciloscópio será o modo visual de comparar o sinal antes e depois do cancelamento, onde a resultante deverá ter uma amplitude menor do que o ruído sonoro gerado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o término da etapa de testes com os circuitos montados e equipamentos adquiridos foi realizada a montagem do protótipo.

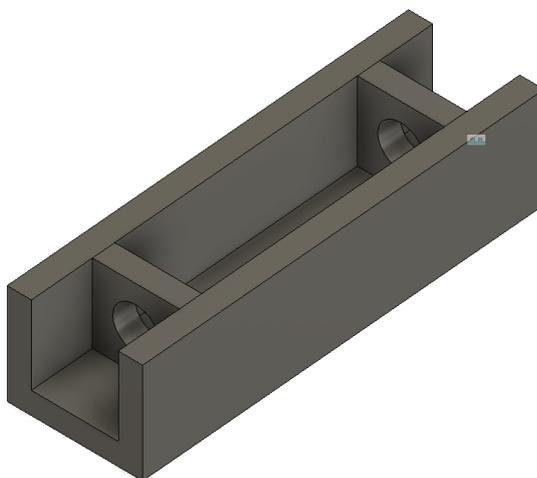
Neste capítulo serão abordados os resultados dos testes da montagem do projeto de cancelamento ativo de ruído.

5.1. Montagem do protótipo

Visando criar uma estrutura para abrigar os alto-falantes, microfones e circuitos, elaboramos uma “calha” construída utilizando espuma de poliestireno, que entre suas propriedades, encontra-se o isolamento acústico.

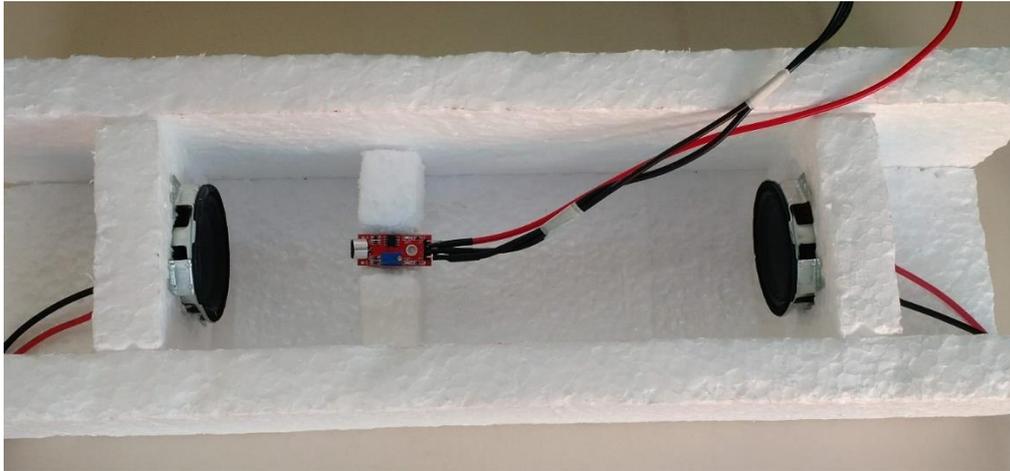
Primeiramente foi realizada a construção da calha com a ajuda de um software de desenho 3D, e após a determinação das dimensões, a calha foi construída fisicamente.

Figura 59: Simulação da calha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 60: Construção da calha em poliestireno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

5.2. Testes práticos

Com todos os componentes montados na calha iniciou-se a etapa de testes. O alto-falante responsável por emitir o ruído foi ligado à fonte geradora de funções e seu circuito de ganho de corrente, o microfone de captação do ruído foi posicionado à frente deste alto-falante e o alto-falante de emissão do antirruído foi posicionado contra o primeiro alto-falante.

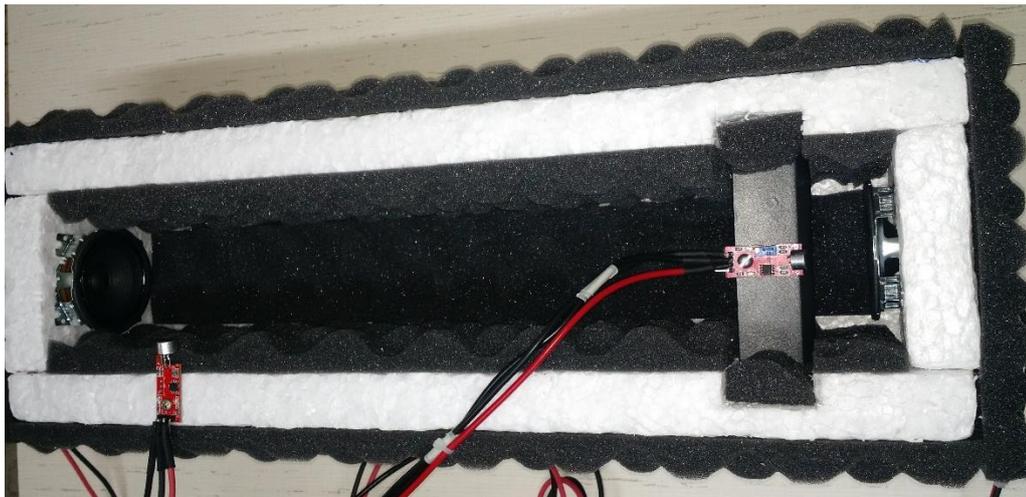
Ao alimentar os circuitos a primeira coisa que ocorreu foi um alto apito agudo gerado pelo alto-falante emissor do antirruído. Este apito podia ser cessado alterando a posição deste alto-falante contra o microfone de captação do ruído.

Analisando a ocorrência deste fato chegamos à conclusão que estava havendo uma microfonia no sistema. Observando mais atentamente o fenômeno ocorrido foi percebido que o mesmo só ocorria em virtude de alguma barreira à frente do alto-falante emissor do antirruído. Com isso ficou constatado que o nosso sistema estava sofrendo um efeito da reverberação. A reverberação acontece quando uma onda sonora bate em algum obstáculo e é refletida de volta em um curto intervalo de tempo, inferior a 0,1 segundos.

Diversas tentativas se sucederam para encontrar um posicionamento entre os alto-falantes e o microfone para que a microfonia pudesse ser anulada.

A solução adotada foi a utilização de espuma acústica no entorno da calha, tanto na parte interna quanto na externa, como apresentado na figura 61.

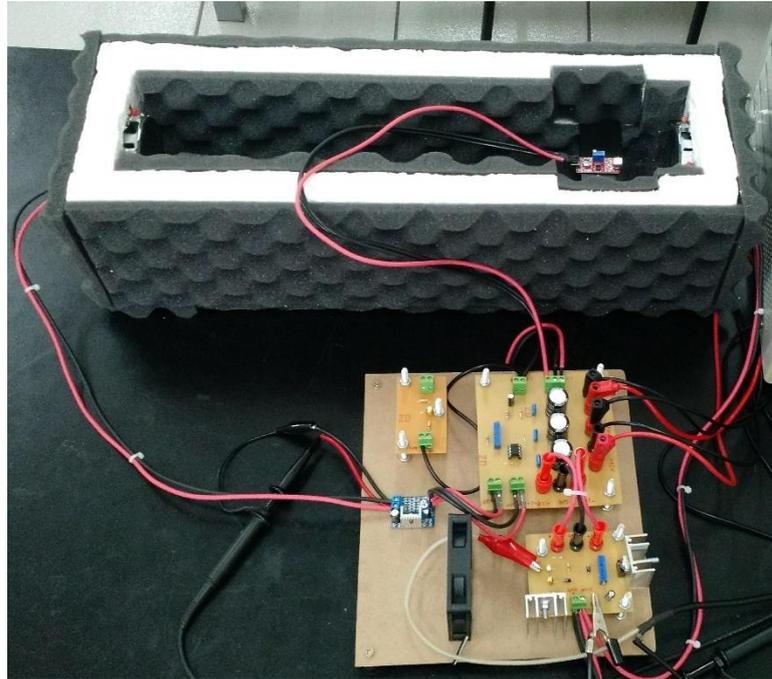
Figura 61: Aplicação de espuma acústica na calha de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

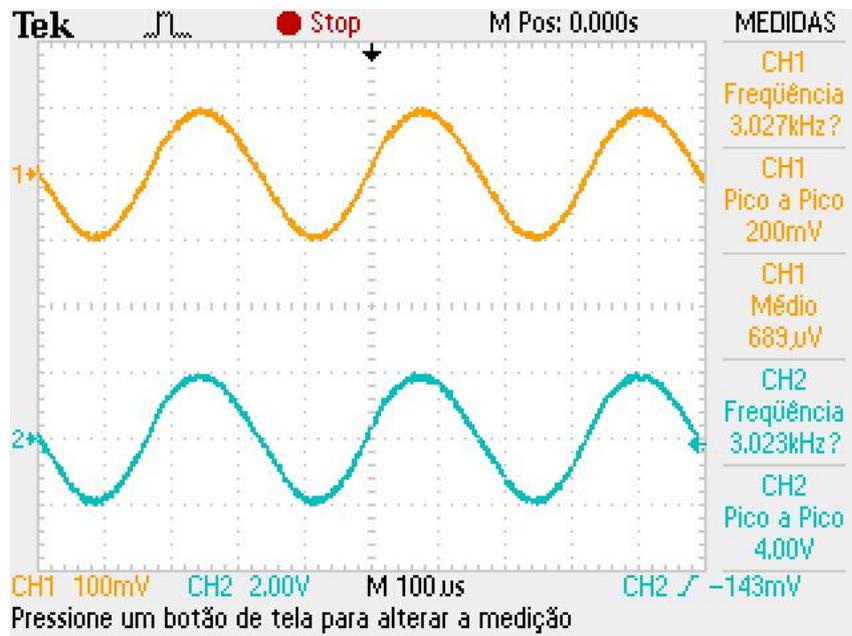
Retornando os testes com a calha devidamente finalizada, alguns outros ajustes foram realizados, como um melhor posicionamento dos circuitos e consequente diminuição dos fios, como pode ser visto na figura 62. Também regulamos o ganho do circuito pré-amplificador e do amplificador de potência para obter no alto-falante emissor do antirruído sonoro (apresentado na figura 63) a mesma amplitude ajustada no alto-falante emissor do ruído, apresentado na figura 64.

Figura 62: Montagem final da calha e dos circuitos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

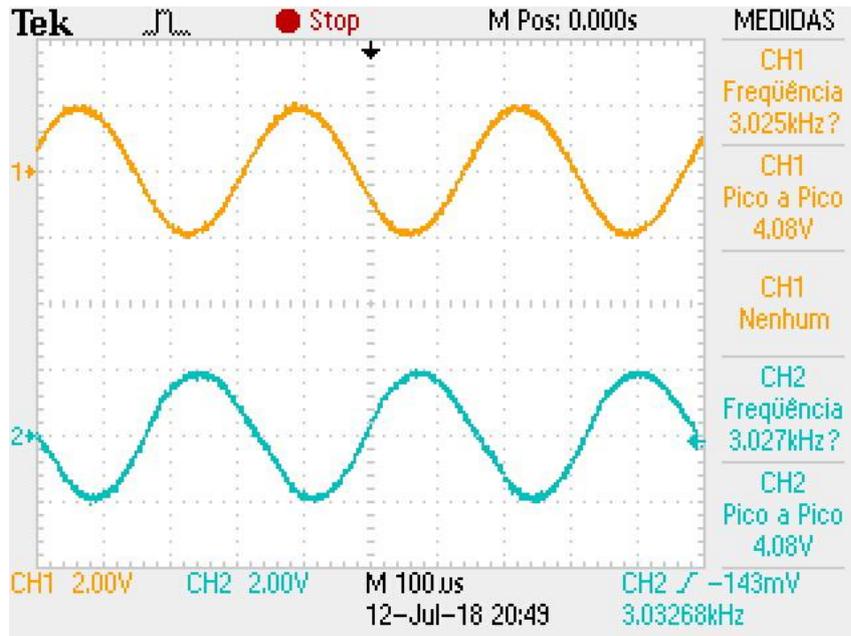
Figura 63: Ajuste de ganho dos circuitos para a mesma amplitude do ruído.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A figura 63 mostra em amarelo o valor obtido na saída do pré-amplificador após receber o sinal captado pelo microfone, e em azul a saída no amplificador de potência ajustada para 4V de pico a pico.

Figura 64: Comparação entre o sinal emitido pelo alto-falante emissor de ruído e o alto-falante emissor do antirruído.

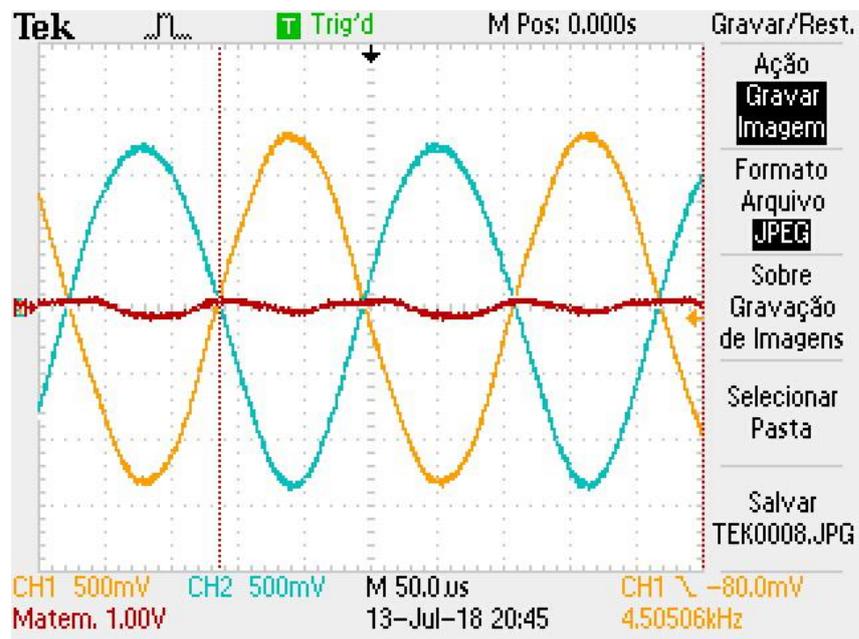


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Na figura 64, em amarelo está representado o sinal que está sendo gerado pela geradora de funções e emitido no alto-falante emissor do ruído sonoro. Em azul está representada a saída do amplificador de potência, e consequentemente o sinal que está sendo emitido pelo alto-falante emissor do antirruído.

A partir do teste apresentado na figura 64, utilizando a ferramenta *Math* presente no osciloscópio realizamos a soma dos sinais que estavam sendo medidos, gerando o resultado apresentado na figura 65.

Figura 65: Soma entre as ondas medidas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Como pode ser observado, a onda em vermelho é a resultante da soma da onda sonora do ruído e da onda do antirruído.

Analisando os resultados chegamos à conclusão de que antes de realizar da emissão do antirruído necessitaríamos realizar a inversão do sinal que entra no amplificador de potência, para assim obter o resultado apresentado na figura 65. Sendo assim, o circuito pré-amplificador foi alterado para que o sinal de saída fosse invertido em comparação com o sinal de entrada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo estão incluídas as considerações finais em relação aos resultados obtidos no desenvolvimento do protótipo e as sugestões para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

Realizar o presente trabalho de pesquisa e elaboração de um dispositivo de cancelamento ativo de ruído foi de suma importância para ampliar os conhecimentos dos autores sobre um tema que está em constante desenvolvimento e pode possuir diversas aplicações em diversas áreas. Analisar e discutir a maneira com a qual o ruído está tão presente na vida de todos e muitas vezes sendo ignorado sem ser dada a devida importância para todos os malefícios que ele pode causar, é muito importante para que cada vez menos as pessoas sofram de doenças que poderiam ter sido evitadas.

Dentro de um ambiente de trabalho existem inúmeras fontes de ruídos que podem ultrapassar os níveis aceitáveis de exposição de um trabalhador. Realizar alterações estruturais, confinar máquinas ou ter a plena confiança de que um trabalhador fará a utilização dos equipamentos de proteção individual nem sempre é a melhor solução para os problemas causados pelo ruído. Além dos prejuízos pessoais, as empresas perdem muito dinheiro com pagamentos indenizatórios à funcionários que sofreram danos dentro do ambiente de trabalho.

Partindo do objetivo de provar o funcionamento do cancelamento ativo de ruído, elaborou-se a construção dos circuitos eletrônicos que foram empregados ao final do projeto. O dimensionamento dos componentes teve como foco a construção de um modelo onde testes práticos pudessem ser desenvolvidos.

Os resultados obtidos mostraram que o circuito eletrônico construído foi capaz de captar, inverter e emitir o sinal de cancelamento.

Embora uma das propostas do projeto de que o cancelamento do ruído pudesse ser percebido por uma pessoa próxima ao dispositivo não tenha sido plenamente provada, foi constatado que em diversos pontos dentro da sala onde os testes foram realizados é possível perceber uma atenuação significativa do ruído, tornando assim a utilização do segundo microfone para a constatação do cancelamento inutilizada.

6.2. Trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos e nas observações realizadas pelo grupo, os encaminhamentos futuros para o projeto são os seguintes:

- Melhorar a construção da calha e o posicionamento do alto-falante;
- Elaborar o circuito de realimentação da análise do cancelamento;
- Ajustar os capacitores do circuito de ganho de corrente para a frequência de corte determinada.
- Utilização do protótipo com diversos tipos de ruídos, sem delimitar um em específico;
- Realizar estudos para a implementação do cancelamento ativo de ruído em ambientes não controlados;
- Realizar estudos sobre regras e normas para a implementação de dispositivos de cancelamento ativo de ruído dentro da indústria.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA. **Organização Mundial da Saúde considera a poluição sonora um problema de saúde pública** [internet]. Disponível em: <<http://www.proacustica.org.br/publicacoes/artigos-sobre-acustica-e-temas-relacionados/oms-considera-poluicao-sonora-problema-de-saude-publica.html>>. Acesso em: 8 de setembro de 2017.

BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2011, 380 p.

BRAGA, Newton de Carvalho. **Como Funcionam os Microfones de Eletreto** [internet]. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/14075-como-funcionam-os-microfones-de-eletreto-art1639>>. Acesso em: 14 de abril de 2018.

BRAGA, Newton de Carvalho. **Filtragem e Ripple** [internet]. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/5389>>. Acesso em 5 de maio de 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Perda auditiva induzida por ruído (Pair)**. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **NR15 - Atividades e Operações Insalubres** [internet]. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/>>. Acesso em: 12 de outubro de 2017.

COSTA, Ennio Cruz. **Acústica Técnica**. 1ª edição. São Paulo: Blucher, 2003. 127 p.

DIREITO DE OUVIR. **Como o nosso ouvido funciona?** [internet]. Disponível em: <<https://www.direitodeouvir.com.br/blog/como-ouvido-funciona>>. Acesso em: 28 de agosto de 2017.

EXPLICATORIUM. **Características das ondas** [internet]. Disponível em: <<http://www.explicatorium.com/cfq-8/caracteristicas-das-ondas.html>>. Acesso em: 26 de novembro de 2017.

GIAMPAOLI, Eduardo; SAAD, Irene Ferreira de Souza Duarte; Cunha, Irlon de Ângelo. **Norma de Higiene Ocupacional**. Fundacentro, 2001. 40p.

HEAR-IT. **Quase 30 milhões de brasileiros sofrem de deficiência auditiva** [internet]. Disponível em: <<https://www.hear-it.org/pt/quase-30-milhoes-de-brasileiros-sofrem-de-deficiencia-auditiva>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

HÖBER, Sven, PAPE, Christian, REITHMEIER, Eduard. **Automatic Stabilization of an Adaptive Feedback Control Noise Cancelling In-Ear Headphones**. 2016. 9 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Congresso Internacional e Exposição sobre Engenharia de Controle de Ruído). Universidade de Hanôver, Alemanha, 2016.

LIMA, Luiz Gustavo Del Bianchi da Silva. **Controle Ativo de Ruído em uma Cabine de Automóvel**. 9 f. Trabalho de Conclusão de Curso.

LIMA, Raquel. **Característica do som: frequência, amplitude e timbre** [internet]. Disponível em: <<https://raquellima16.wordpress.com/2011/01/27/caracteristicas-do-som-frequencia-amplitude-e-timbre/>>. Acesso em: 26 de novembro de 2017.

MELDAU, Débora Carvalho. **Ouvido – externo, médio e interno** [internet]. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/audicao/ouvido>>. Acesso em: 28 de agosto de 2017.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **OMS: 1,1 bilhão de pessoas podem ter perdas auditivas porque escutam música alta** [internet]. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/oms-11-bilhao-de-pessoas-podem-ter-perdas-auditivas-porque-escutam-musica-alta/>>. Acesso em: 15 outubro 2017.

NETO, Nestor Waldhelm. **Crítérios mínimos a observar para a compra de decibélimetro e dosímetro** [internet]. Disponível em:

<<https://segurancadotrabalhonwn.com/criterios-minimos-observar-compra-decibelmetro-dosimetro/>>. Acesso em: 3 de novembro de 2017.

NOISE CONTROL. 1986, 164 p.

OLIVEIRA, José Raimundo. **A aplicação de microfones em projetos digitais**. 2010. 7 f. Dissertação (Laboratório de Micro e Minicomputadores) – Departamento de Engenharia da Computação e Automação Industrial da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de Campinas, Campinas, 2010.

PETRIN, Natália. **A velocidade do som** [internet]. Disponível em: <<https://www.estudopratico.com.br/a-velocidade-do-som/>>. Acesso em: 3 de novembro de 2017.

RAMBO, Wagner. **Pré-amplificador para microfone de eletreto – Vídeo aula 171** [internet]. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bSA2CGWFQds&t=115s>>. Acesso em 25 de abril de 2018.

S.J. Elliott e P.A. Nelson. Active Noise Control. **Noise News International**, Yokohama, JP, v. 2, n. 2, p. 75 – 98, junho, 1994.

SANCHES, Sonia. **Entenda como funciona o dosímetro de ruído** [internet]. Disponível em: <<http://otudo.com/entenda-como-funciona-o-dosimetro-de-ruído/>>. Acesso em: 3 de novembro de 2017.

SANTOS, Ubiratan de Paula; SANTOS, Marcos Paiva. **Cadernos de saúde do trabalhador**. São Paulo, 2000. 31p.

SATHLER, Cleber Souza Faria. **Controle Ativo de Ruído**. 2009. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. Jr. **Princípios da Física Volume 2 – Oscilações, ondas e termodinâmica**. 5ª edição. São Paulo: Cengage Learning, 2015. 230 p.

TAKAYAMA, Diogo et al. **Implementação eficiente de filtros adaptativos utilizando a plataforma TMS320C6713**. Londrina: 2011, 16 p.

TODA MATÉRIA. **Poluição sonora** [internet]. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/poluicao-sonora/>>. Acesso em: 1 de novembro de 2017.

YOUNG, Hugh David; FREEDMAN, Roger. **Física II – Termodinâmica e Ondas**. 14ª edição. São Paulo: Pearson, 2016. 374 p.