

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARCELLO AUGUSTO PASSOS II

**TRANSFORMAÇÃO DE SONS DE POLÍCIA E AMBULÂNCIA EM SINAIS
LUMINOSOS**

CURITIBA

2025

MARCELLO AUGUSTO PASSOS II

**TRANSFORMAÇÃO DE SONS DE POLÍCIA E AMBULÂNCIA EM SINAIS
LUMINOSOS**

Transformation of Police and Ambulance Sounds into Light Signals

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso
de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Renata Borges Coelho.

CURITIBA

2025



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

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

MARCELLO AUGUSTO PASSOS II

**TRANSFORMAÇÃO DE SONS DE POLÍCIA E AMBULÂNCIA EM SINAIS
LUMINOSOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso
de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 16/Outubro/2025

Renata Borges Coelho
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fábio Pires Itturiet
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cícero Fritzen
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2025**

RESUMO

A percepção de sons é essencial para uma boa direção no trânsito. A ausência dessa capacidade, não é considerada um impeditivo para a obtenção da licença para dirigir (CNH). Em momentos de urgência, o condutor do veículo precisa estar alerta para sirenes de carros de polícia, bombeiros ou ainda de ambulâncias. Situações como essa são mais desafiadoras para motoristas com deficiência auditiva. Pensando nisso, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver a estratégia da transformação de sinais sonoros em sinais luminosos capazes de auxiliar motoristas surdos na detecção de sirenes e sinais de alerta. Tal técnica baseia-se na implementação de um dispositivo composto por microcontroladores, microfone de eletreto, emissor LED e um filtro passa-faixa, que capta sinais sonoros, filtra ruídos, diferencia tipos de frequência e os converte em luz. Ao final do estudo, os resultados apontaram para a viabilidade de implementação do dispositivo, no entanto, o equipamento desenvolvido apresenta melhor desempenho em ambientes controlados, sendo necessários aprimoramentos para ampla aplicação ou até mesmo para alcançar a viabilidade comercial.

Palavras-chave: Microcontrolador; Deficiência Auditiva; Conversão de Som em Luz; Tecnologia Assistiva.

ABSTRACT

The perception of sounds is essential for safe driving. The absence of this ability is not considered a hindrance to obtaining a driving license. In moments of urgency, a vehicle driver needs to be alert to the sirens of police cars, fire trucks, or ambulances. Such situations pose greater challenges for drivers with hearing impairments. With this in mind, the present study aims to develop the strategy of transforming sound signals into light signals capable of assisting deaf drivers in detecting sirens and warning signals. This technique is based on the implementation of a device composed of microcontrollers, an electret microphone, LED emitter, and a bandpass filter that captures sound signals, filters noise, distinguishes between types of frequencies, and converts them into light. At the end of the study, the results indicated the feasibility of implementing the device; however, the developed equipment performs better in controlled environments. Improvements are necessary for widespread application or even to achieve commercial viability.

Keywords: Microcontrollers; Auditory Impairment; Sound-to-Light Conversion; Assistive Technology

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
1.1	Problemas e premissas.....	7
1.2	Objetivos.....	7
1.2.1	Objetivo Geral.....	7
1.2.2	Objetivos Específicos.....	7
1.3	Organização do trabalho.....	8
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1	Deficiência auditiva no trânsito e a necessidade de soluções.....	9
2.2	Tecnologias assistivas para motoristas com deficiência auditiva.....	10
2.3	Dispositivos de conversão de som em luz.....	10
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
3.1	Acústica e propriedades do som.....	12
3.2	Legislação e normas relacionadas à segurança no trânsito.....	12
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4.1	Composição do dispositivo.....	15
4.2	Coleta de dados.....	17
4.3	Projeto e implementação do dispositivo teórico.....	19
4.4	Testes e validação do dispositivo teórico.....	21
4.5	Projeto e implementação do dispositivo prático.....	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1	Análise dos dados de testes teóricos.....	35
5.2	Avaliação da eficiência do dispositivo prático.....	36
6	CONCLUSÃO.....	37
6.1	Implicações práticas e contribuições da pesquisa.....	37
6.2	Limitações e sugestões para pesquisas futuras.....	38
6.3	Considerações finais.....	38
	REFERÊNCIAS.....	39
	APÊNDICE A - Código para Arduino.....	42

1 INTRODUÇÃO

De acordo com um levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2022, vivem no Brasil cerca de 10 milhões de pessoas com algum nível de surdez, número que representa 5% da população (AGÊNCIA BRASIL, 2022). A nível mundial, estima-se que 360 milhões de pessoas apresentam algum grau de deficiência auditiva (ACADEMIA DE LIBRAS, 2017). Dados como esses reiteram a necessidade de ações inclusivas para essa comunidade, incluindo no trânsito, no qual em contrapartida ao número de pessoas surdas no Brasil, os motoristas surdos somam cerca de apenas 10 mil pessoas.

Muitas são as dificuldades encontradas pelas pessoas surdas desde o processo de obtenção de sua Carteira Nacional de Habilitação (CNH), até o momento de conduzir seus carros efetivamente (ACADEMIA DE LIBRAS, 2016). Depois da visão, a audição é o sentido de maior importância durante o ato de dirigir (MECÂNICA ONLINE, 2016). A percepção de buzinas, barulhos de motores, alarmes e de sirenes de emergência, como de ambulâncias e carros de polícia, faz com que os condutores tomem atitudes mais seguras no trânsito (ACADEMIA DE LIBRAS, 2020). Estes dispositivos sonoros, no entanto, não são identificados pelos motoristas surdos, o que causa desconforto no trânsito, preconceito e os expõe a um maior risco de acidentes (AGÊNCIA BRASIL, 2022). Apesar dessa dificuldade, a obtenção da CNH não é restringida para a comunidade surda, uma vez que, de acordo com os órgãos responsáveis pela emissão do documento, a visão é o principal sentido humano necessário para dirigir (PLANALTO FEDERAL, 1997).

É devido aos fatos supracitados que o presente trabalho de conclusão de curso aborda o desenvolvimento de um sistema de alerta visual para motoristas surdos, que utiliza técnicas de transformação de sons de sirene de polícia e ambulância para sinais luminosos. O objetivo é fornecer uma solução eficaz para que motoristas surdos possam perceber a aproximação de veículos de emergência, garantindo sua segurança e a segurança dos demais usuários da via. O sistema emprega microcontroladores, análise de frequência e dispositivos de iluminação, oferecendo uma alternativa visual para os alertas sonoros tradicionais.

A aplicação desse sistema será inicialmente utilizada para a identificação de sirenes de ambulâncias e carros de polícia, uma vez que esses veículos em

momentos de emergência, no qual acionam suas sirenes, possuem prioridade de passagem no trânsito e precisam atender suas demandas com eficiência.

1.1 Problemas e premissas

A Resolução nº 168 de 2004 do Conselho Nacional de Trânsito assegura à pessoa surda o direito de dirigir. A legislação nacional garante ainda outras condições que possibilitam a formação da pessoa com deficiência auditiva como condutora, como a inserção da Linguagem Brasileira de Sinais - LIBRAS, nos procedimentos de avaliação (PLANALTO FEDERAL, 2015). A presença de motoristas surdos no trânsito, no entanto, representa menos de 1% dessa comunidade no Brasil (AGÊNCIA BRASIL, 2022). Isso ocorre devido ao fato da pessoa com deficiência auditiva ser desestimulada em razão de obstáculos encontrados tanto no processo de habilitação quanto no trânsito propriamente dito. A dificuldade para detectar sons, principalmente de alerta, pode despertar a insegurança da pessoa surda, bem como aumentar o risco de acidentes.

Dessa forma, o desenvolvimento de técnicas que contribuem para a direção segura dos motoristas surdos não só representa a quebra dos obstáculos por eles encontrados, como também o estreitamento da desigualdade social imposta às pessoas com deficiência, possibilitando o maior acesso aos recursos disponíveis para toda a sociedade.

1.2 Objetivos

Este item apresenta o objetivo geral do projeto e os objetivos específicos necessários para alcançar o sucesso no projeto.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de alerta que transforma sons de sirene de viaturas em sinais luminosos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Realizar a análise dos sons característicos de veículos de polícia e ambulância para identificar suas frequências dominantes; Detectar as faixas de frequência utilizadas por sirenes de veículos socorristas; Verificar modelos e valores

para um filtro passa-faixa, garantindo que apenas frequências utilizadas sejam captadas; Implementar microcontroladores para realizar a transformação de sons em luz em tempo real; Realizar testes através de simuladores *online* para a realização de cálculos e aferições para então realizar testes em prática.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho é organizado em capítulos com abordagens na seguinte sequência: No capítulo 1 são apresentados o contexto do trabalho de pesquisa, relevância, premissas e objetivos. Para o capítulo 2 temos a revisão da literatura, exploração de tecnologias disponíveis e pesquisas existentes quanto ao tema abordado. Já no capítulo 3 veremos os princípios teóricos que sustentam os elementos essenciais do projeto, incluindo a análise de conceitos relevantes, teorias subjacentes e ferramentas que embasam a pesquisa. No capítulo 4 iniciaremos o desenvolvimento do projeto, detalhamento da metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos, descrição do processo de concepção e implementação do dispositivo de conversão de som em luz. Para o capítulo 5 teremos a discussão de resultados obtidos durante a execução do projeto, bem como a análise e interpretação dos dados coletados. Por fim, no capítulo 6 temos conclusões, discussão das implicações práticas do resultado alcançado, recomendações para pesquisas futuras e considerações finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura tem como objetivo analisar estudos, leis e equipamentos relacionados aos temas abordados.

2.1 Deficiência auditiva no trânsito e a necessidade de soluções

No dia 15 de março de 2023, o Senado Federal possibilitou mais uma conquista em relação ao direito de pessoas com deficiência auditiva de obter a habilitação para dirigir (SENADO FEDERAL, 2023). A legislação que antes limitava a obtenção da Carteira Nacional de Habilitação (CNH) apenas às categorias A e B, foi alterada para incluir agora as demais categorias possíveis, C, D e E, que correspondem aos veículos de carga, ônibus e caminhões. Segundo a Agência Senado:

Na apresentação do projeto, o Senador Romário lembrou que pessoas surdas ou com deficiência auditiva severa e profunda habilitadas não apresentam mais riscos ao trânsito que os habilitados ouvintes. Para ele, a impossibilidade de concessão nas outras apenas retira direitos, sem que haja ganho algum para a sociedade. O projeto, na sua visão, tornaria clara a discriminação e obrigaria o CONTRAN a rever a decisão (Agência Senado, 2023).

Antes disso, em 2015, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), por meio de sua Resolução nº 558, de 15 de outubro de 2015, tornou obrigatória a disponibilização de intérprete da Língua Brasileira de Sinais (LIBRAS) durante o processo para obtenção da Carteira Nacional de Habilitação para pessoas com deficiência auditiva. Em 2016, o Projeto de Lei nº 4.318-A/16 da Câmara dos Deputados, vetou a prática da cobrança de maiores taxas por parte das instituições formadoras de condutores devido à deficiência auditiva de seus clientes.

No entanto, a discussão ativa sobre os direitos e a inclusão de pessoas surdas no trânsito não reflete ainda resultados na prática. Um estudo realizado por Viana de Amorim, que analisou o processo de educação do trânsito à pessoa surda enquanto elemento contribuinte para a produção da inclusão social, por meio de levantamento de dados e realização de entrevistas, concluiu que: “As leis existentes, não refletem os direitos dos surdos e, portanto, a execução prática deve ser acompanhada pelos órgãos competentes para que ocorra de fato a inclusão” (Viana de Amorim, E. 2019).

O artigo do Departamento de Fonoaudiologia da Universidade Federal da Paraíba, publicado pela revista *CEFAC - Speech, Language, Hearing Sciences and Education Journal* em 2016, que trata sobre a inclusão dos surdos no trânsito, destacou as conclusões de outro estudo realizado por Thorslund e cols (Mendes de Souza, V. et. al. 2016. Apud. Thorslund e cols. 2013), que investigou, em uma perspectiva clínica, a influência da perda auditiva no transporte, segurança e mobilidade de grupos de pessoas divididos por grau de perda auditiva, leve, moderada, severa e profunda. A conclusão que se chegou foi de que: “[...] indivíduos com perda auditiva tem uma menor probabilidade de adquirir a licença para dirigir; [...] a perda auditiva afeta principalmente a atenção durante a condução veicular e os portadores de maior grau de perda auditiva demonstram menor preocupação com os efeitos da perda auditiva na condução veicular o que indicou o uso de estratégias de enfrentamento.” (Mendes de Souza, V. et. al. 2016. Apud. Thorslund e cols. 2013). Um destaque importante realizado no artigo, é para a importância do desenvolvimento de estudos voltados a estratégias e tecnologias que poderiam solucionar ou fortalecer o enfrentamento das dificuldades enfrentadas pela comunidade surda no trânsito.

2.2 Tecnologias assistivas para motoristas com deficiência auditiva

As tecnologias assistivas desempenham um papel crucial na promoção da mobilidade e segurança no trânsito para motoristas com deficiência auditiva. Estas tecnologias incluem sistemas de alerta visual e vibratório para comunicar alertas sonoros, aplicativos de navegação que oferecem direções visuais e táteis, bem como sistemas de comunicação veicular baseados em texto. A integração eficaz dessas tecnologias cria um ambiente rodoviário mais inclusivo e seguro para motoristas com deficiência auditiva, proporcionando-lhes a autonomia e independência desejadas na condução (HAND TALK, 2023).

2.3 Dispositivos de conversão de som em luz

Os dispositivos de conversão de som em luz são tecnologias assistivas cruciais para pessoas com deficiência auditiva, permitindo a transformação de informações sonoras em estímulos visuais (HAND TALK, 2023). Eles funcionam captando sons ambientais por meio de um microfone, processando esses sons e

emitindo sinais visuais, geralmente na forma de luzes LED, correspondentes à intensidade e frequência dos sons. Esses dispositivos têm aplicações diversas, desde alertas de emergência a situações de trânsito e comunicação em grupo.

A principal vantagem desses dispositivos é a melhoria da qualidade de vida das pessoas com deficiência auditiva, proporcionando maior autonomia, segurança e inclusão social. Eles permitem que os usuários acessem informações sonoras que seriam inacessíveis de outra forma, contribuindo para sua segurança e bem-estar. Além disso, esses dispositivos reduzem o isolamento social, possibilitando a participação ativa em situações que requerem comunicação baseada em som. À medida que a tecnologia continua a evoluir, os dispositivos de conversão de som em luz têm o potencial de desempenhar um papel ainda mais crucial na promoção da acessibilidade e na construção de uma sociedade mais inclusiva e equitativa.

Alguns exemplos de tais dispositivos são despertadores com vibração, alarme visuais que piscam ao detectar o toque da campainha ou sensores de som ambientes utilizados para detectar sons importantes como o choro de um recém nascido. No entanto, não existem produtos comerciais específicos para alertar motoristas surdos em tempo real. As soluções encontradas no mercado se limitam a itens básicos do dia a dia.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica tem como objetivo apresentar os conceitos e princípios que embasam o desenvolvimento deste projeto.

3.1 Acústica e propriedades do som

A acústica, sub-área da física dedicada ao estudo do som, analisa as ondas sonoras, fenômeno presente nos diversos estados físicos da matéria (DIAS, 2018). Esse ramo da física aborda características como intensidade, volume, frequência e amplitude do som, valendo-se de fórmulas e conceitos para compreender esse fenômeno ondulatório. Além disso, incorpora cálculos que definem a velocidade e o comportamento dos sons, abrangendo áreas como geradores de som, meios de transmissão, propagação e receptores (DIAS, 2018).

Ao explorar conceitos fundamentais, como ondas, a acústica identifica elementos como cristas, vales e nível médio. A amplitude da onda, comprimento, período e frequência são essenciais para caracterizar as ondas sonoras (INFOESCOLA, s.d.). O som, por sua vez, é uma onda mecânica que necessita de meios materiais para propagação, sendo caracterizado pela intensidade (nível sonoro), altura (ou frequência) e timbre (composição harmônica) (DIAS, 2018).

A caracterização do som inclui a intensidade, associada à energia da fonte emissora, a altura, relacionada à frequência do som e sua classificação como grave ou aguda, e o timbre, que distingue sons de mesma frequência e intensidade por meio das ondas sonoras que os compõem (INFOESCOLA, s.d.). Além disso, a propagação do som requer um meio material, podendo ocorrer em meios gasosos, sólidos e líquidos, com a velocidade de propagação variando conforme o estado físico do meio. A fórmula da velocidade do som relaciona a distância percorrida, o tempo gasto, o comprimento da onda e a frequência.

3.2 Legislação e normas relacionadas à segurança no trânsito

As leis de trânsito foram criadas para garantir a segurança de condutores e pedestres, promovendo uma convivência harmoniosa entre ambas as partes (DESPACHANTE, 2012). Além de proporcionar medidas de fiscalização por parte dos agentes públicos e policiais para garantir o cumprimento dessas leis, visando a segurança de todos.

Dentre as principais leis de trânsito, destacam-se medidas essenciais para assegurar a segurança, como o uso obrigatório do cinto de segurança por todos os ocupantes do veículo, independentemente do banco em que se encontram. Além disso, o transporte de crianças deve ser realizado em equipamentos de segurança apropriados, como bebê conforto, cadeirinhas ou assentos de elevação, sempre no banco traseiro. Outras normas fundamentais incluem a proibição de dirigir sob efeito de álcool, o respeito aos limites de velocidade, a prestação de socorro em caso de acidente e a utilização correta de acessórios como óculos, além da proibição do uso de celular enquanto dirige (PLANALTO FEDERAL, 1997). A compreensão e respeito a essas leis não apenas evitam multas, mas, acima de tudo, contribuem para a redução de acidentes e a preservação da vida no trânsito brasileiro.

A Lei Nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, mais conhecida como Código de Trânsito Brasileiro (CTB), representa a legislação fundamental que rege o trânsito no Brasil. Promulgada com o objetivo de organizar e disciplinar as normas relativas à circulação de veículos, pedestres e ciclistas, o CTB estabelece diretrizes para garantir a segurança viária, abrangendo desde a condução responsável até a fiscalização e punição de infrações (PLANALTO FEDERAL, 1997). Ao longo dos anos, o CTB passou por revisões e atualizações para adaptar-se às transformações sociais e tecnológicas, permanecendo como a base legal que orienta o comportamento de condutores e pedestres nas vias do país.

A Lei Nº 13.146, de 6 de julho de 2015, também conhecida como Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência ou Estatuto da Pessoa com Deficiência, representa um marco legal significativo no Brasil. Essa legislação visa promover a inclusão social e a igualdade de oportunidades para as pessoas com deficiência, abrangendo diversos setores da sociedade, como educação, trabalho, saúde e mobilidade. A Lei Nº 13.146 estabelece diretrizes para a promoção da acessibilidade e a eliminação de barreiras, além de reconhecer os direitos das pessoas com deficiência e buscar sua plena participação na sociedade (PLANALTO FEDERAL, 2015). Essa iniciativa reflete o compromisso do Brasil em construir uma sociedade mais inclusiva e garantir a dignidade e os direitos fundamentais de todos os cidadãos, independentemente de suas capacidades físicas ou intelectuais.

A Lei Nº 14.071, de 13 de outubro de 2020, representa uma importante atualização no Código de Trânsito Brasileiro (CTB), introduzindo alterações significativas nas normas que regem o tráfego no país. Esta legislação trouxe

mudanças relevantes, incluindo novas regras para a habilitação de condutores, a ampliação do prazo de validade da carteira de motorista, a atualização de punições para infrações, e a introdução do Programa CNH Social, que visa proporcionar acesso facilitado à habilitação para segmentos da população de baixa renda. A Lei Nº 14.071 reflete o esforço contínuo para aprimorar a segurança viária e adaptar as regulamentações de trânsito às demandas e desafios contemporâneos (PLANALTO FEDERAL, 2020).

No Brasil, a legislação que regulamenta o uso de sirenes em veículos de emergência no CTB, diz que o uso de dispositivos de alarme sonoro e de iluminação intermitente está autorizado somente para veículos de emergência e de serviço público. Não existem normas específicas que padronizam as características técnicas das sirenes para uso em veículos de emergência ou que determinam qual tipo de sirene deve ser utilizada em situações específicas. Essa ausência de regulamento técnico contribui para a diversidade de frequências e tonalidades utilizadas (PORTAL DO TRÂNSITO, 2023).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do dispositivo baseou-se na seleção e configuração adequada de componentes eletrônicos, com o objetivo de assegurar a eficácia e a precisão do sistema de conversão de sinais sonoros para luminosos. O conjunto compreende um microfone, responsável pela captação do áudio, um microcontrolador, destinado ao processamento dos dados, um sinal luminoso para indicação visual e um filtro, posicionado entre o microfone e o microcontrolador, a fim de reduzir o volume de informações a serem processadas, otimizando o desempenho do sistema.

4.1 Composição do dispositivo

O módulo de eletreto utilizado neste trabalho é composto por um sensor de som sensível, capaz de converter as ondas sonoras em sinais elétricos. Este componente é fundamental para a captura eficiente das variações de pressão sonora no ambiente. O módulo de eletreto (Figura 1), foi escolhido devido à sua sensibilidade e resposta linear em uma ampla faixa de frequências.

Figura 1. Módulo com microfone de eletreto

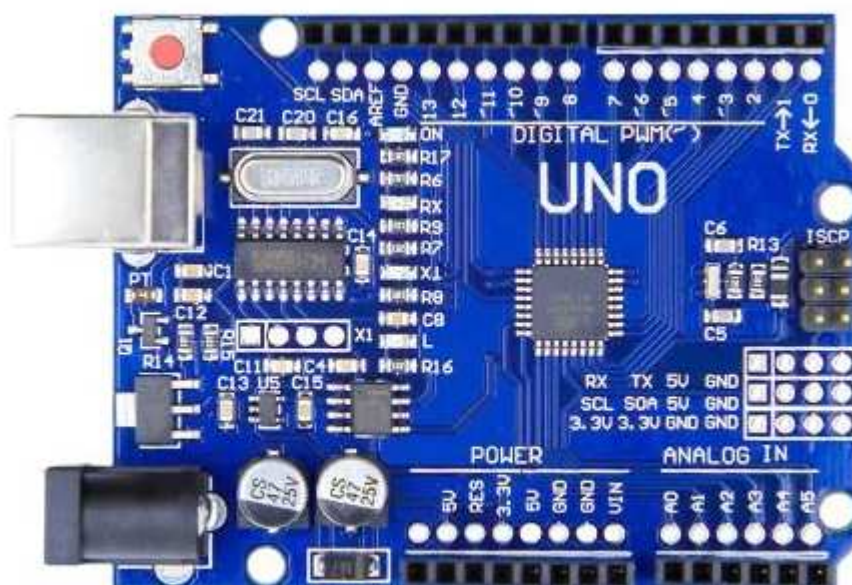


Fonte:USINAINFO (s.d.)

Um microcontrolador Arduino (Figura 2) foi incorporado ao sistema para processar o sinal amplificado e gerar os comandos necessários para controlar a saída de luz. O arduino foi escolhido devido ao seu baixo custo de aquisição comparado a outros processador, o que torna o sistema financeiramente mais

viável. A programação do Arduino envolveu a implementação de algoritmos específicos para a interpretação do sinal sonoro e a definição dos padrões de acionamento do LED, garantindo uma correspondência precisa entre o som capturado e a luz emitida.

Figura 2. Microcontrolador Arduino Uno



Fonte: TCJ ELETRÔNICA (s.d.)

O código-fonte desenvolvido para o Arduino desempenha um papel crucial na funcionalidade do dispositivo. Ele inclui rotinas para aquisição e processamento de dados sonoros, controle do amplificador operacional e acionamento do LED de acordo com padrões predefinidos. A linguagem de programação utilizada foi o Arduino IDE (Figura 3), e o código foi estruturado de maneira modular para facilitar a manutenção e as futuras atualizações.

Figura 3. Microcontrolador Arduino Uno

Fonte: Autoria própria (2025)

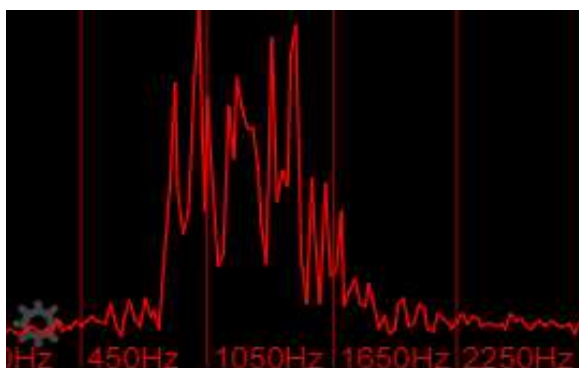
Um filtro para os sinais captados pelo microfone também foi incluído, com o objetivo de facilitar a leitura e o processamento pelo Arduino. Este filtro deve ser projetado com base nas características mais comuns das sirenes de veículos de emergência, de modo a otimizar a eficiência do sistema e garantir uma detecção mais precisa dos sinais sonoros relevantes.

Por fim, o LED (Light Emitting Diode) foi escolhido como o componente emissor de luz no sistema. Sua seleção baseou-se em critérios de eficiência luminosa, baixo consumo de energia e resposta rápida. O LED é acionado pelo Arduino de acordo com as características do sinal sonoro processado, resultando em uma representação visual do áudio capturado.

4.2 Coleta de dados

Para garantir a eficácia do dispositivo de conversão de som em luz, foram coletados dados, começando pela análise dos sinais típicos das sirenes de bombeiros. Utilizou-se um celular para a gravação do áudio, assegurando que o som não fosse saturado e preservando a fidelidade dos sinais captados. Através do simulador *online Falstad* os dados obtidos mostraram que a frequência de uma sirene é sua variável mais comum e está entre 800 Hz e 1500 Hz, o espectro da frequência obtida (Figura 4) mostra a faixa obtida da sirene de um caminhão de bombeiro.

Figura 4. Espectro da frequência de uma sirene

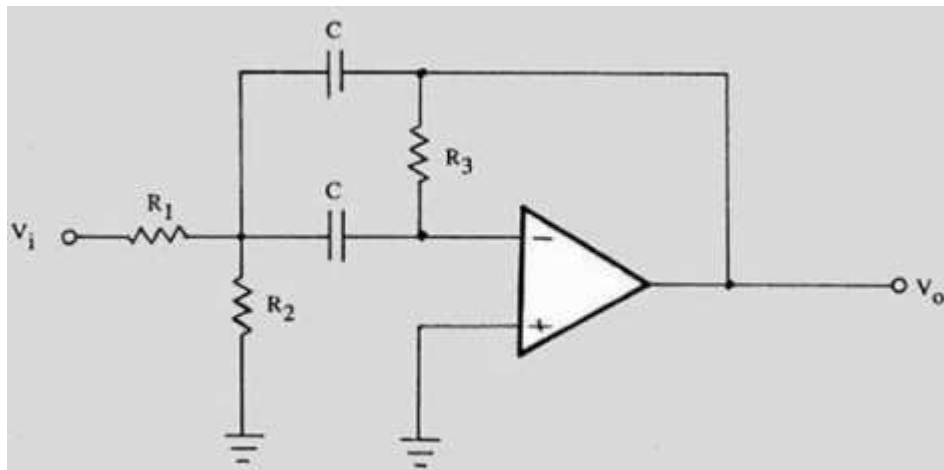


Fonte: Autoria própria (2025)

A coleta de dados foi focada na obtenção de uma amostra representativa que serviria como base teórica para o projeto, sendo feita a gravação de diferentes sirenes das viaturas de bombeiros do comando do corpo de bombeiros do Paraná, localizado na rua R. Nunes Machado número 130 no Centro em Curitiba. Sem a necessidade de observações em diferentes localidades, com o objetivo de criar um conjunto robusto de dados que abrangesse a diversidade de frequências emitidas por sirenes de bombeiros. Esta abordagem proporcionou uma sólida fundamentação teórica para o desenvolvimento do dispositivo.

Considerando a diversidade nas frequências das sirenes, optou-se pelo filtro ativo passa faixa (PF) - Multiple Feedback (MFB) (Figura 5). Essa escolha foi feita com base na sua capacidade de permitir a passagem seletiva de frequências dentro de uma faixa específica, enquanto atenua aquelas fora dessa faixa.

Figura 5. Filtro Passa Faixa - MFB



Fonte: Antonio Pertence Júnior, *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*, 6a edição, 2007.

4.3 Projeto e implementação do dispositivo teórico

A fase de projeto e implementação do dispositivo teórico, garante que o sistema é capaz de converter eficientemente o som das sirenes de bombeiros em sinais luminosos, proporcionando uma representação visual clara e instantânea. Neste capítulo, abordaremos detalhes sobre o filtro ativo passa faixa, suas fórmulas relevantes e a simulação utilizando o PSIM e TinkerCAD.

Para o projeto do filtro passa-faixa, foram utilizadas as fórmulas do filtro Múltiplo Realimentado (MFB), conforme apresentadas por Pertence Júnior (2007) em *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos* (6ª edição).

As frequências de corte inferior f_{c1} e superior f_{c2} são definidas, respectivamente, pelas Equações (1) e (2):

$$f_{c1} = \min \text{ Hz} \quad (1)$$

$$f_{c2} = \max \text{ Hz} \quad (2)$$

A frequência central f_0 é obtida pela média geométrica das frequências de corte:

$$f_0 = \sqrt{f_{c1}^2 * f_{c2}^2} \quad (3)$$

A Frequência angular de ressonância não ajustada ω_0 é expressa por:

$$\omega_0 = 2 * \pi * f_0 \quad (4)$$

O fator de qualidade Q_o é calculado pela relação:

$$Q_o = \frac{f_o}{f_{c2}-f_{c1}} \quad (5)$$

A constante de ganho K deve atender à condição:

$$K < 2 * Q_o^2 \quad (6)$$

A capacitância C foi definida como:

$$C = \frac{10}{f_o} \text{ nano} \quad (7)$$

Os valores dos resistores R_1 , R_2 e R_3 são determinados pelas equações:

$$R_1 = \frac{Q_o}{\omega_o * C * K} \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{Q_o}{\omega_o * C * (2 * Q_o^2 - K)} \quad (9)$$

$$R_3 = \frac{2 * Q_o}{\omega_o * C} \quad (10)$$

Com base nas fórmulas do filtro MFB e nas especificações desejadas, calculou-se os valores dos componentes. Foi considerado $f_{c1} = 800 \text{ Hz}$, $f_{c2} = 1500 \text{ Hz}$. Os valores calculados para R_1 , R_2 , R_3 , C , K , f_0 , Q_o e ω_o foram determinados para otimizar a resposta do filtro às frequências específicas das sirenes de caminhões de bombeiros, sendo eles:

$$f_o = \sqrt{800^2 * 1500^2} = 1095,45 \simeq 1095$$

$$\omega_o = 2\pi f_o \simeq 6876 \text{ rad/s}$$

$$Q_o = \frac{f_o}{f_{c2}-f_{c1}} = 1,5649$$

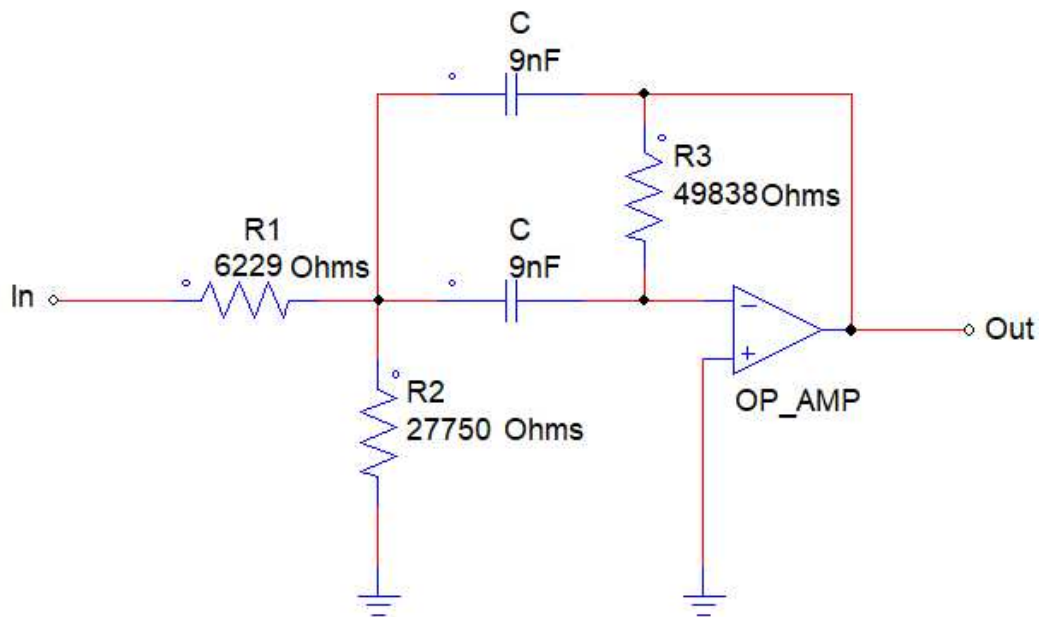
$$C = 9 \text{ n}, \quad K < 2Q_o^2 = 4,89$$

$$R_1 = 6229,78, \quad R_2 = 27750,85, \quad R_3 = 49838,26$$

Obtendo os valores $K = 4$, $f_{c1} = 800 \text{ Hz}$, $f_{c2} = 1500 \text{ Hz}$, $f_o = 1095 \text{ Hz}$, $\omega_o = 6876 \text{ rad/s}$, $Q_o = 1,5649$, $C = 9 \text{ n}$, $R_1 = 6,3 \text{ k}$, $R_2 = 27,75 \text{ k}$, $R_3 = 49,8 \text{ k}$.

O Filtro Passa Faixa (Figura 6) foi montado no simulador PSIM com os respectivos valores calculados de R_1 , R_2 , R_3 e C para obter os valores da tensão de saída.

Figura 6. Filtro Passa Faixa - MFB no PSIM



Fonte: Autoria própria (2025)

Utilizando o TinkerCAD para simular a resposta do circuito Arduino conectado ao filtro ativo passa faixa, foi implementado a conexão do sinal analógico de entrada (saída do filtro) ao pino analógico do Arduino e a saída do LED no pino digital 13. O código utilizado verifica a amplitude do sinal recebido e caso o mesmo se mantenha constante com seus máximos e mínimos por 3 segundos, representando uma sirene com valores dentro das faixas do filtro, o LED será aceso significando a presença de uma sirene.

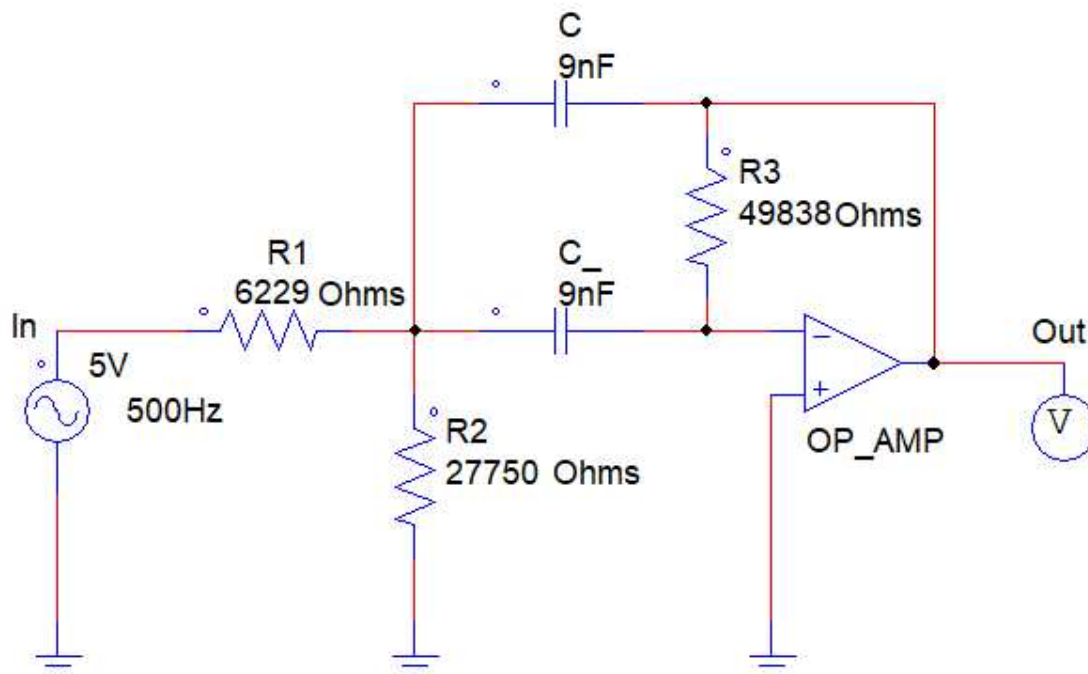
4.4 Testes e validação do dispositivo teórico

Foi usado o simulador PSIM para a validação do filtro PF, no teste foi usado um gerador de função com tensão inicial de 5V de amplitude com frequências variadas para representar os sinais gerados por um microfone de eletreto.

Utilizando uma fonte com frequências fora, dentro e ideal da faixa do filtro com valores de 500 Hz (Figura 7), 800 Hz, 1095 Hz (Frequência ideal), 1500 Hz e 1800 Hz obtemos a resposta da saída em Volts, de acordo com as especificações do filtro. Tensões de entrada com uma frequência abaixo de 800 Hz ou acima de

1500 Hz tem uma diminuição na amplitude da tensão de saída. Enquanto tensões com a frequência entre esses valores tem seu sinal de saída ampliado.

Figura 7. Filtro PF-MFB com 500 Hz de entrada

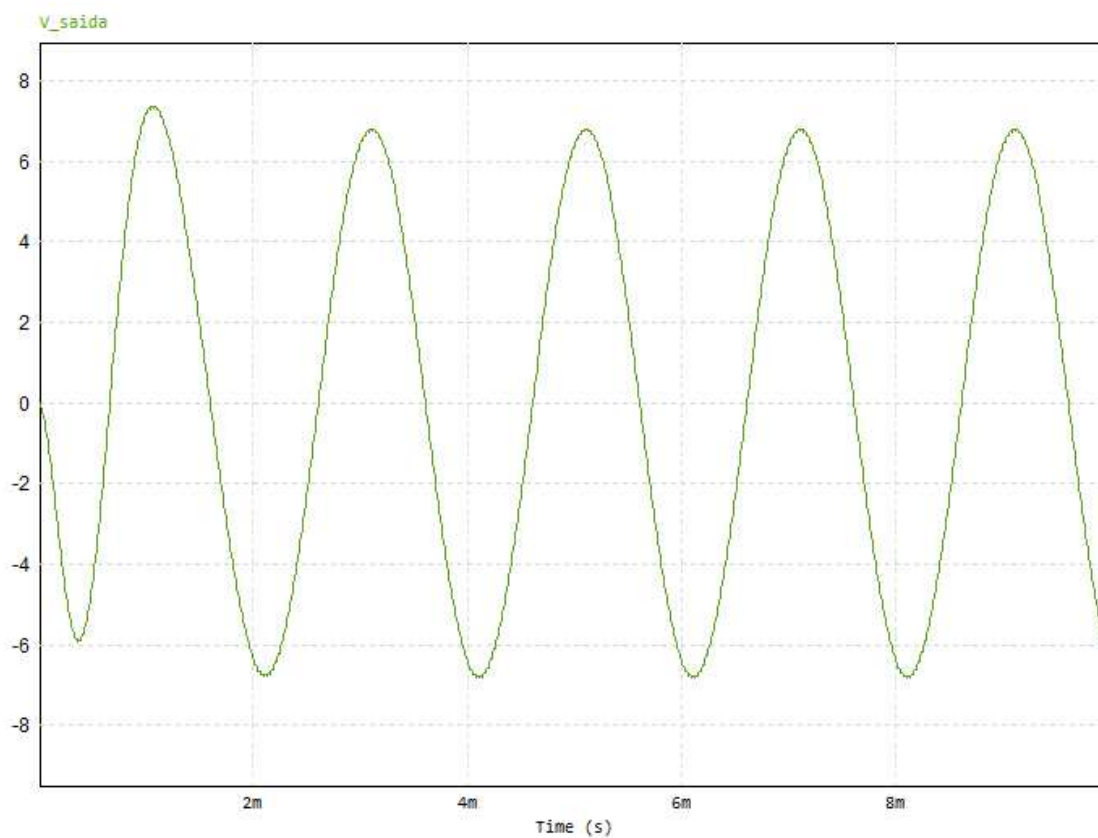


Fonte: Autoria própria (2025)

Para a tensão de entrada de 5V, temos que:

O valor de saída é de aproximadamente 6,8 V (Figura 8) para a frequência de 500 Hz.

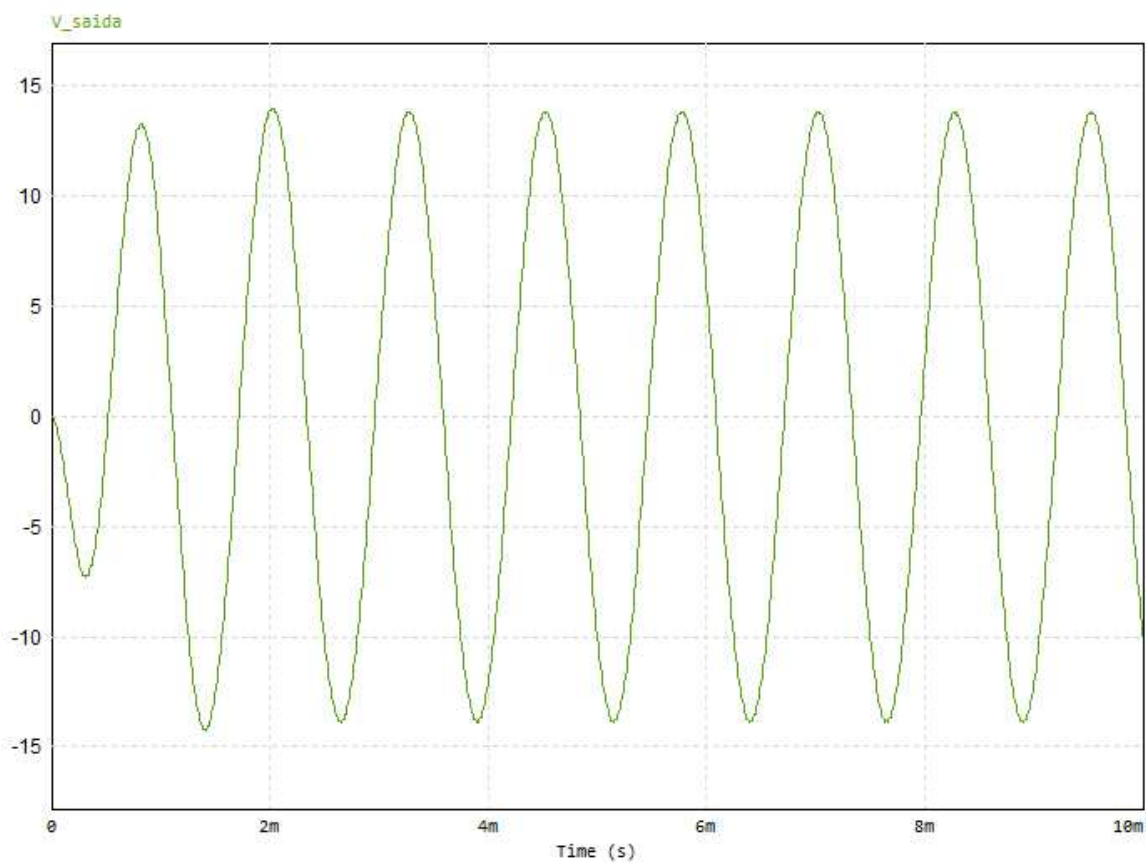
Figura 8. Tensão de saída com frequência de 500 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

O valor de saída é de aproximadamente 13,8 V (Figura 9) para a frequência de 800 Hz.

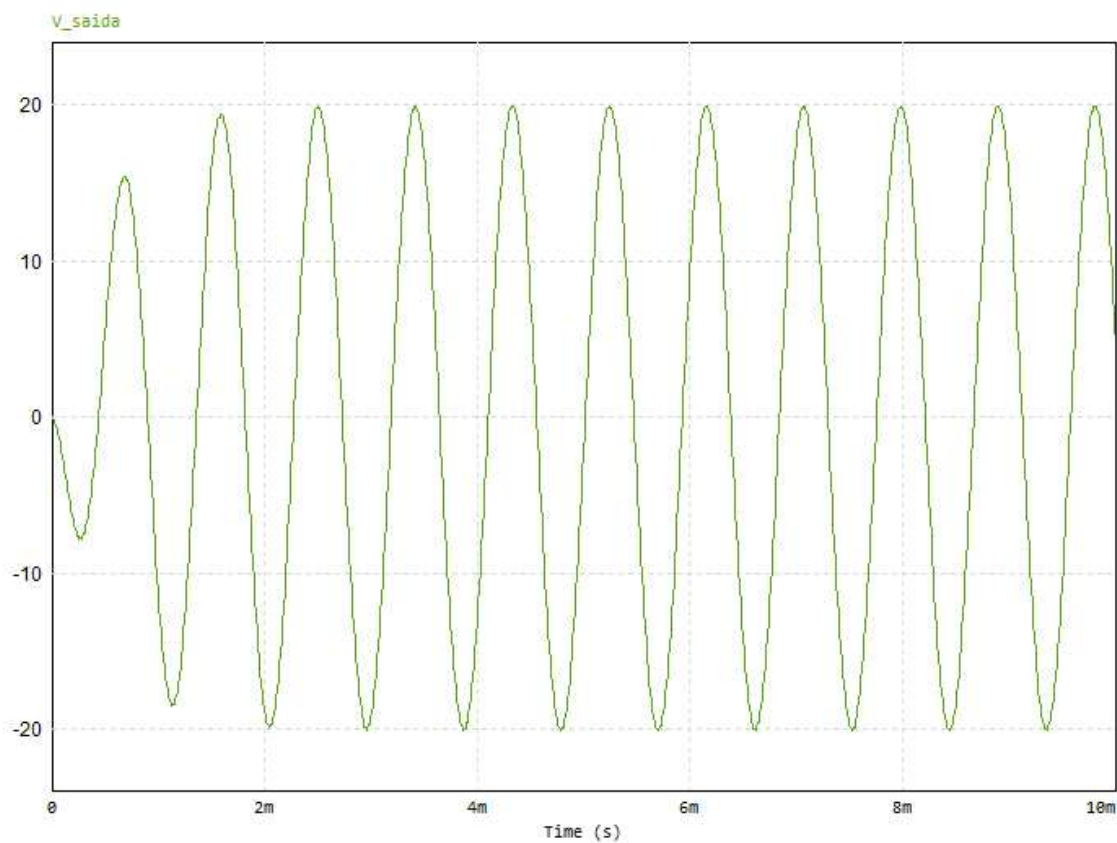
Figura 9. Tensão de saída com 800 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

O valor de saída é de aproximadamente 20 V (Figura 10) para a frequência de 1095 Hz.

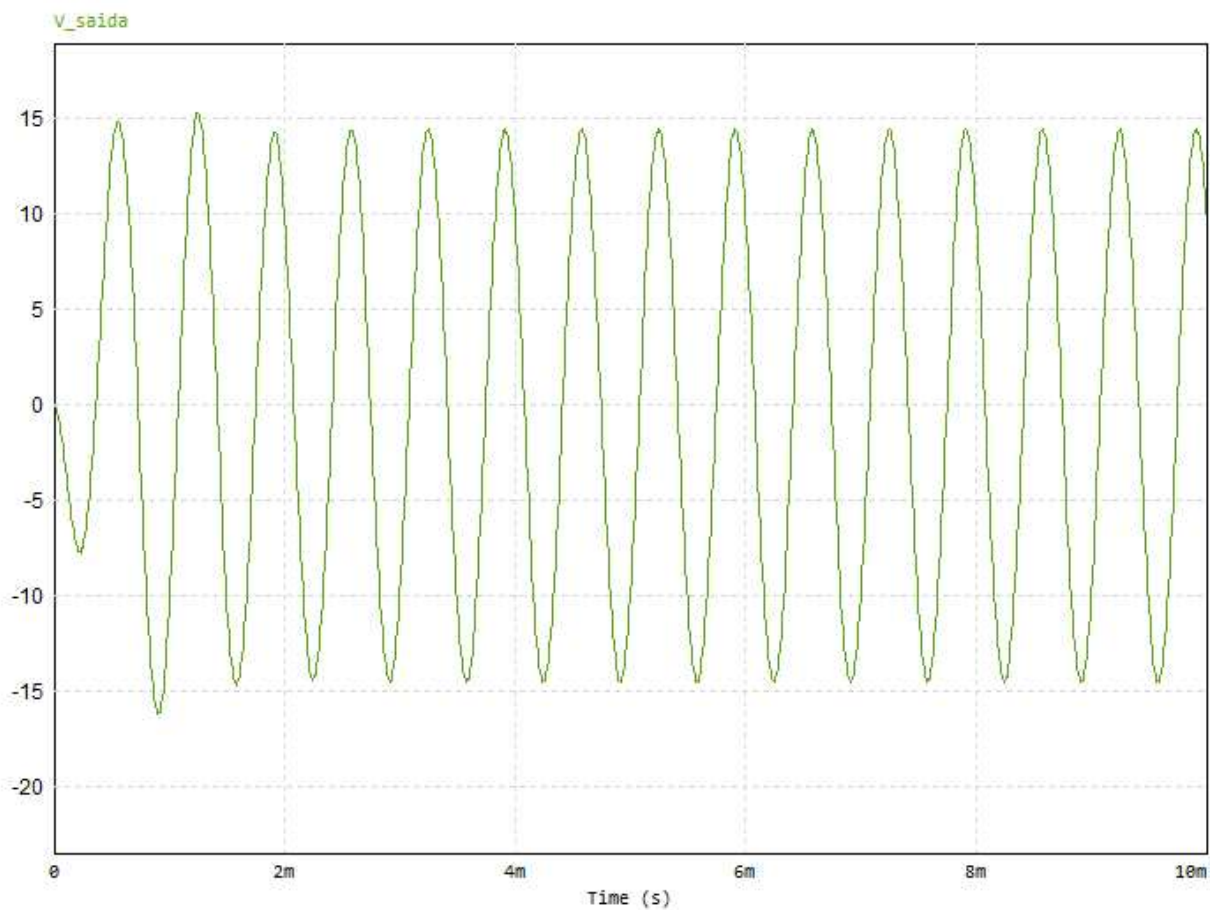
Figura 10. Tensão de saída com 1095 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

O valor de saída é de aproximadamente $14,4\text{ V}$ (Figura 11) para a frequência de 1500 Hz .

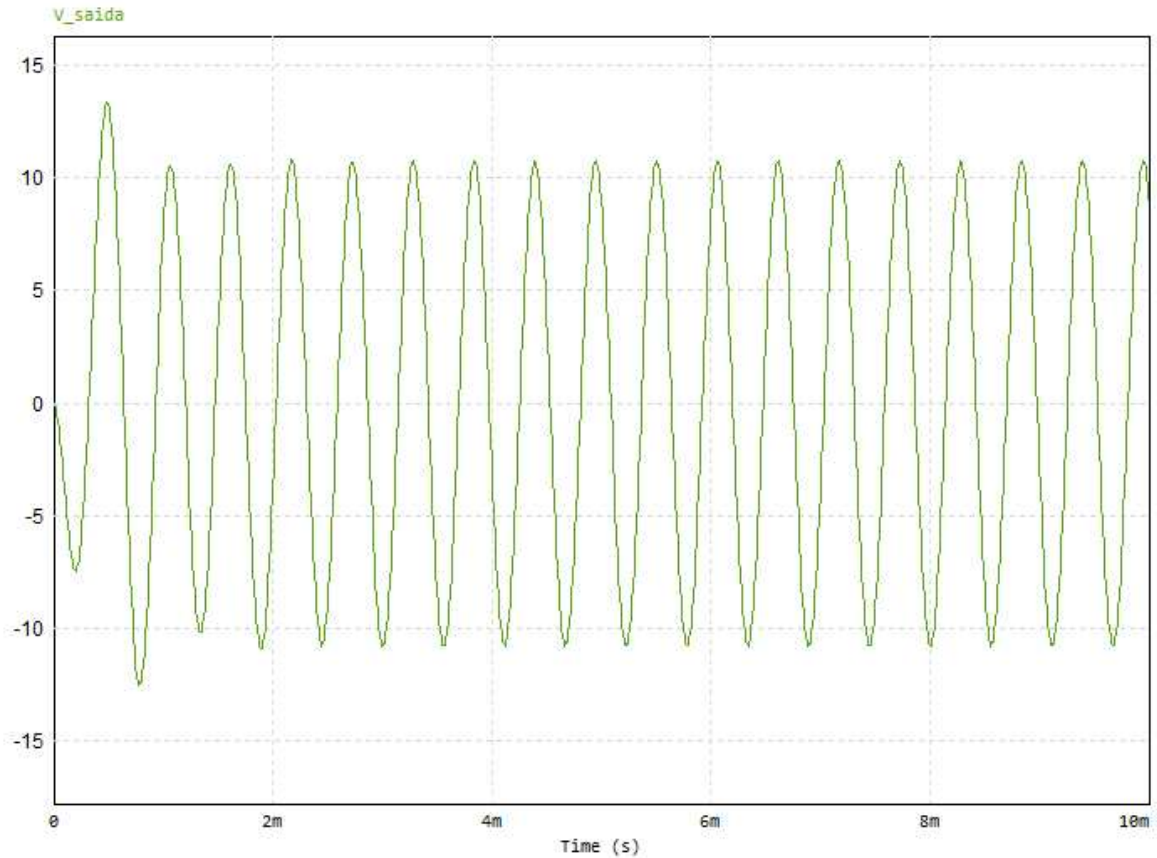
Figura 11. Tensão de saída com 1500 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

O valor de saída é de aproximadamente 10,7 V (Figura 12) para a frequência de 1800 Hz.

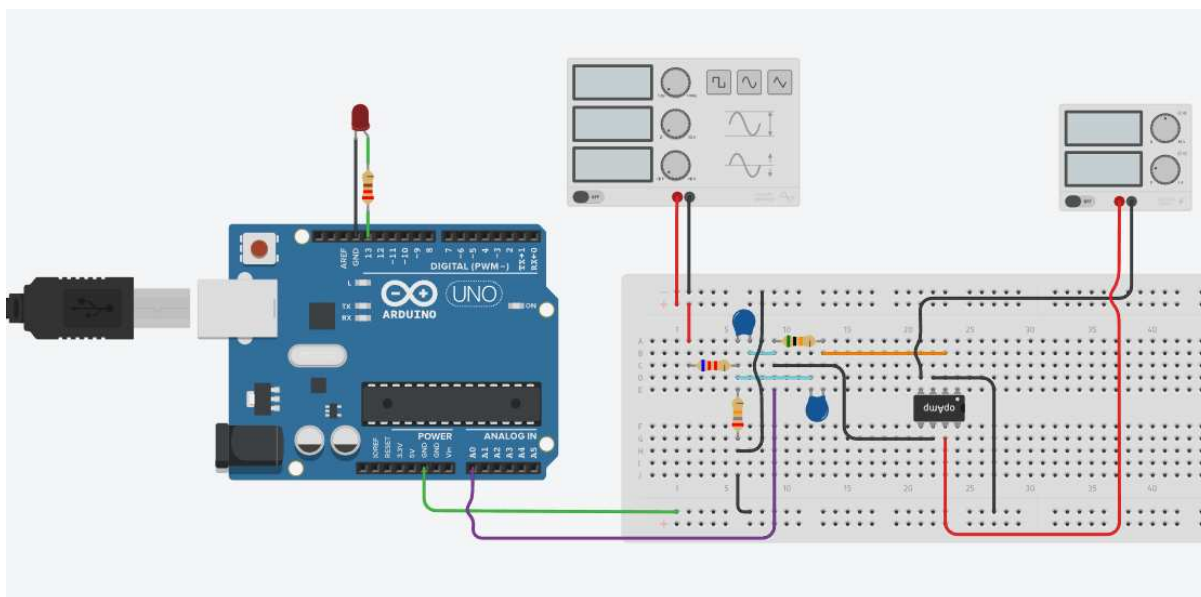
Figura 12. Tensão de saída com 1800 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

Os valores obtidos mostram que para tensão inicial de 5V, saídas acima de 13,8V podem ser consideradas dentro da faixa. Os resultados foram utilizados para a criação da lógica e código em simulações no TinkerCAD, fornecendo uma validação para a eficácia do sistema em acionar o LED (Figura 13).

Figura 13. Circuito completo



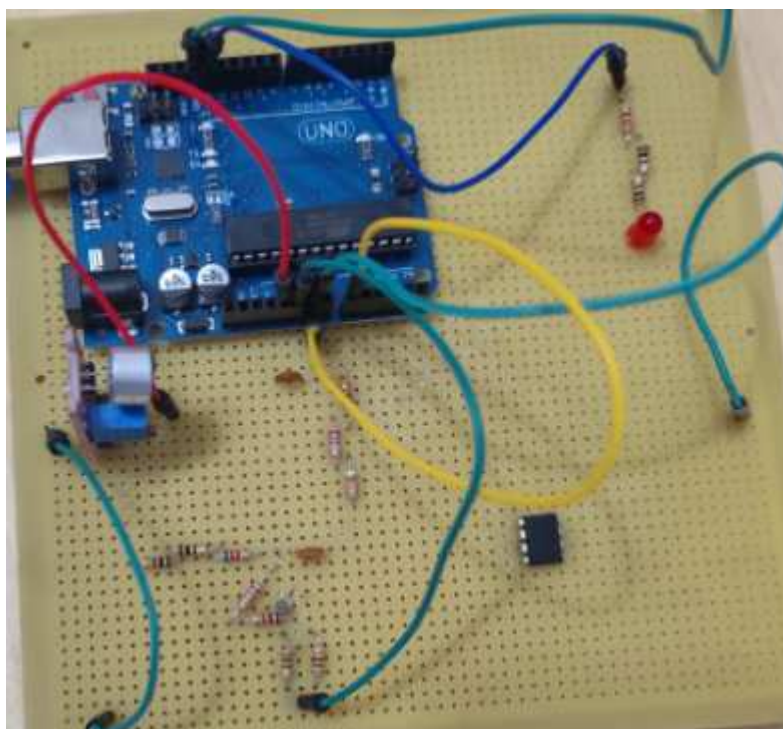
Fonte: Autoria própria (2025)

O código implementado (Apêndice A) utilizou a seguinte lógica: caso os valores lidos pelo sensor estejam dentro de uma faixa definida por um máximo e um mínimo, com tolerância de 10% de variação, e se esta condição se mantiver por 3 segundos ininterruptos, o LED será acionado. Caso essa constância não seja observada, ou se os valores saírem da faixa determinada, o LED será desligado. Essa lógica foi adotada com o objetivo de evitar acionamentos indevidos do dispositivo por sons provenientes do trânsito, como buzinas, freios ou outros ruídos não relacionados às sirenes de emergência, garantindo maior precisão na detecção do sinal sonoro relevante.

4.5 Projeto e implementação do dispositivo prático

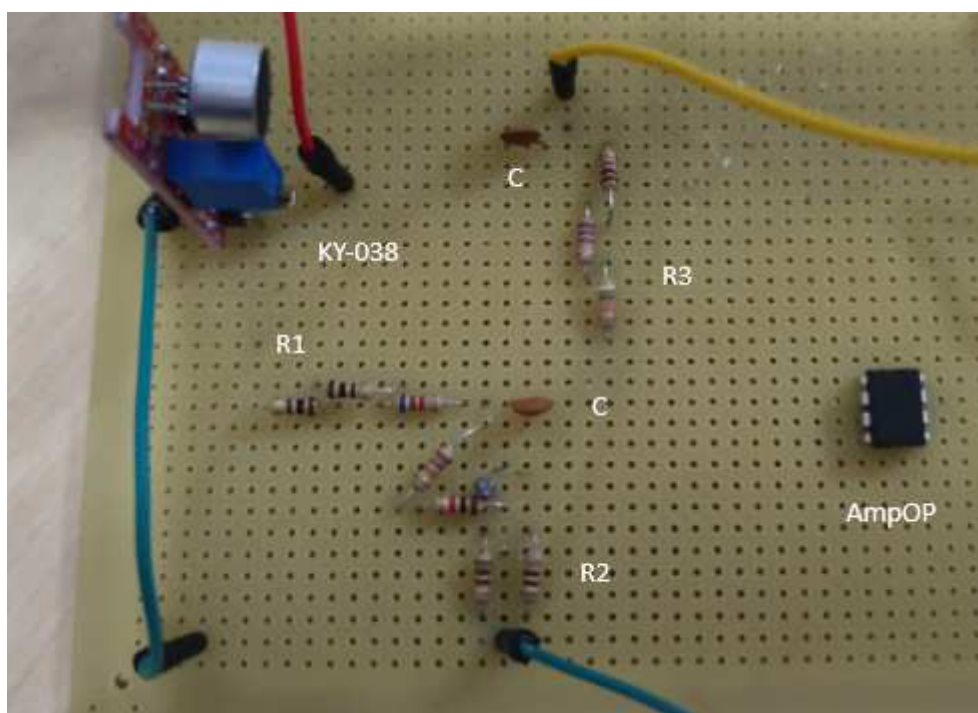
Foi montado um protótipo (Figura 14) com as mesmas especificações do teste teórico, para a validação do projeto, no mesmo foi usado o módulo KY-038, o filtro passa faixa MFB (Figura 15) e um microcontrolador Arduino UNO com saída para um LED. Usando frequências fora e dentro da faixa selecionada, obtemos a resposta da saída em Volts, de acordo com as especificações do filtro. Tensões de entrada com uma frequência abaixo de 500 Hz, ou acima de 1500 Hz terão uma diminuição na amplitude da tensão de saída.

Figura 14. Protótipo



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 15. Protótipo Filtro PF- MFB



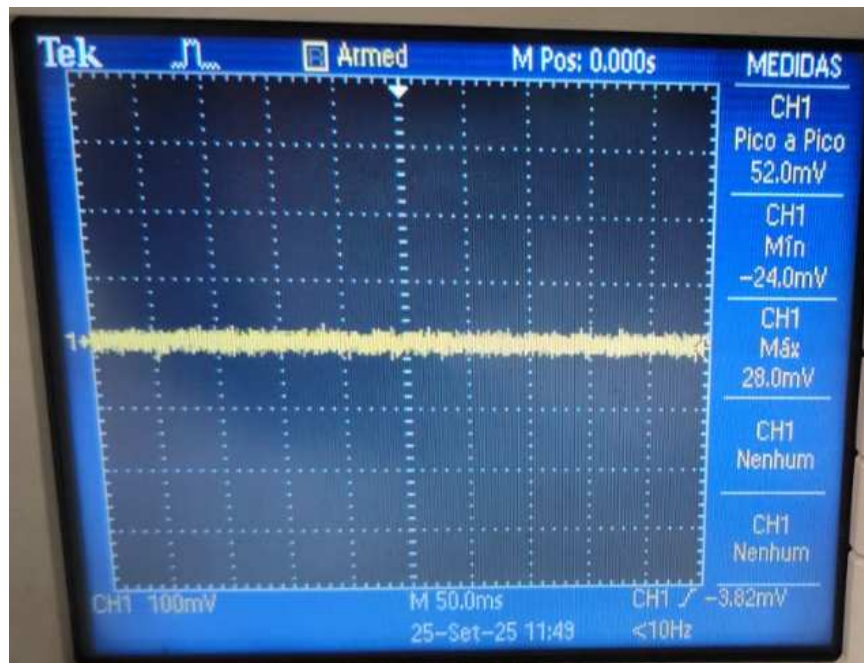
Fonte: Autoria própria (2025)

Utilizando um osciloscópio e sinais de áudio constantes com diferentes frequências, foi possível observar os valores de saída do filtro. Para tal, o canal 1 (CH1) do osciloscópio foi utilizado para monitorar os valores máximos e mínimos do sinal processado. A configuração do eixo horizontal foi definida em 50 ms por divisão, enquanto o eixo vertical foi ajustado para 100 mV por divisão, permitindo uma visualização detalhada da resposta do filtro frente às diferentes frequências aplicadas.

Os resultados obtidos estão apresentados a seguir:

Para frequência de 500 Hz, valor de saída $\approx 28 \text{ mV}$ (Figura 16).

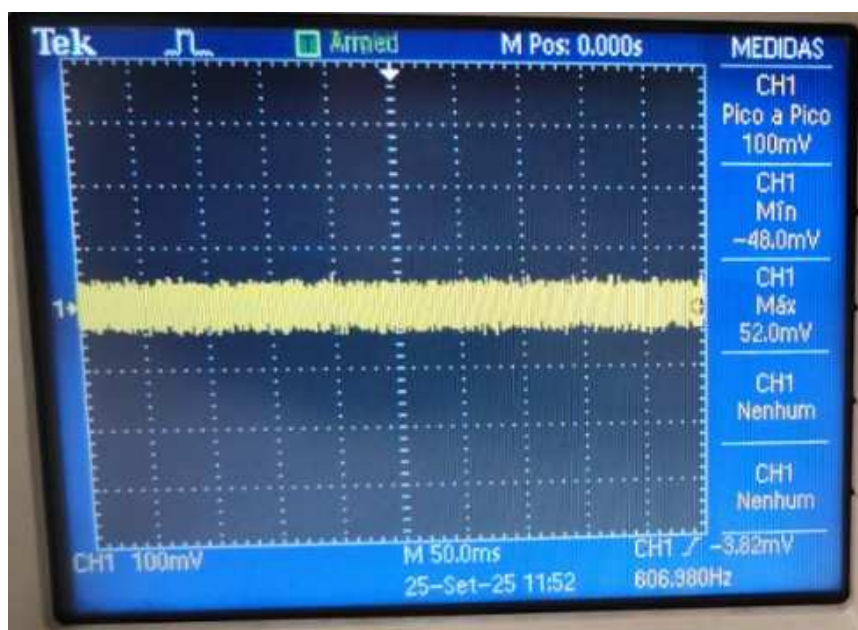
Figura 16. Tensão de saída do protótipo com 500 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a frequência de 800 Hz, valor de saída $\approx 50 \text{ mV}$ (Figura 17).

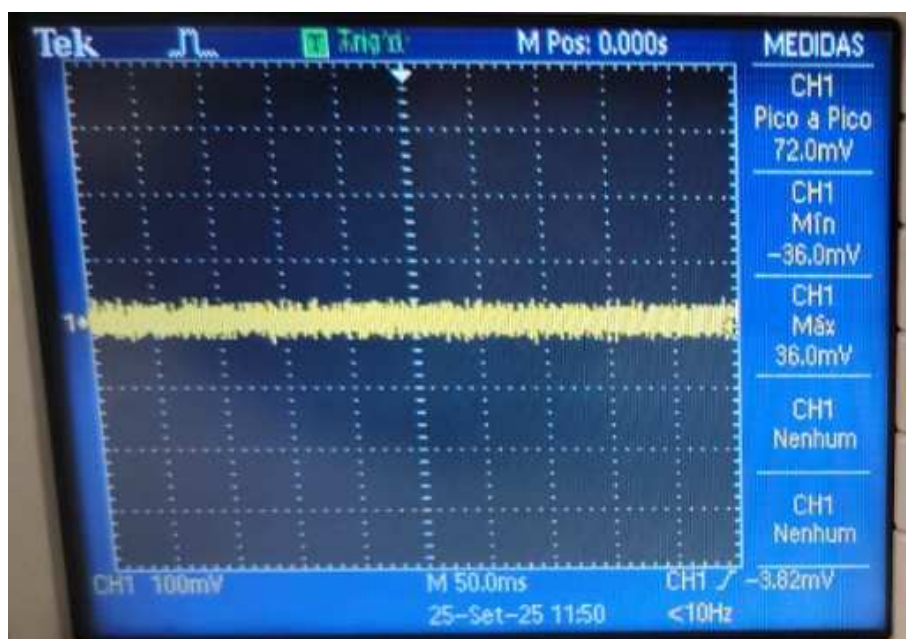
Figura 17. Tensão de saída do protótipo com 800 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a frequência de 1000 Hz, valor de saída $\approx 36 \text{ mV}$ (Figura 18).

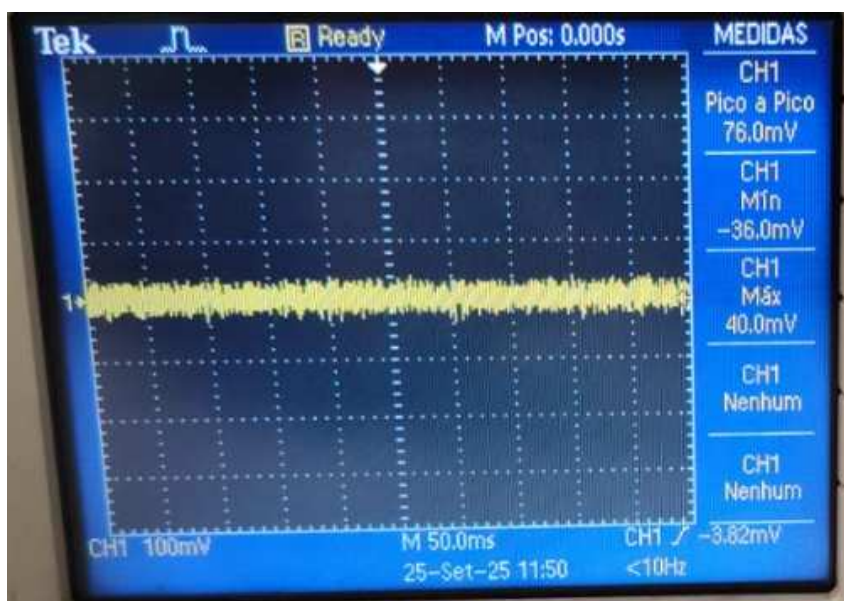
Figura 18. Tensão de saída do protótipo com 1000 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a frequência de 1200 Hz, valor de saída $\approx 40 \text{ mV}$ (Figura 19).

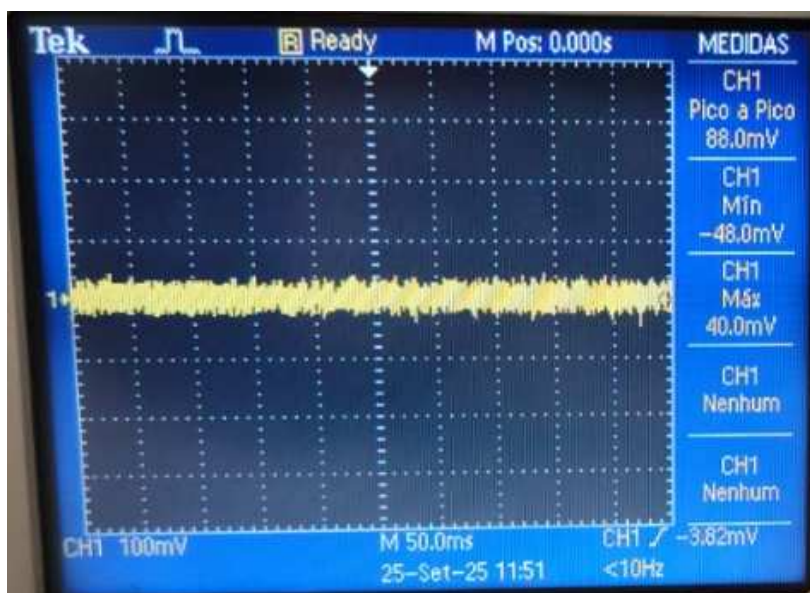
Figura 19. Tensão de saída do protótipo com 1200 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a frequência de 1500 Hz, valor de saída é de $\approx 40 \text{ mV}$ (Figura 20).

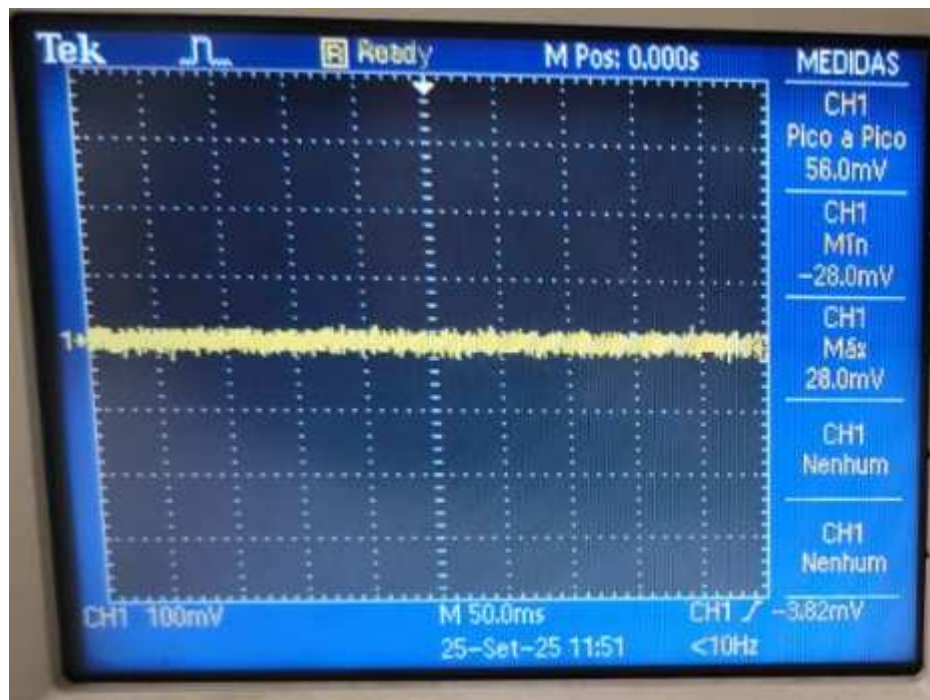
Figura 20. Tensão de saída do protótipo com 1500 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a frequência de 2000 Hz, valor de saída $\approx 28 \text{ mV}$ (Figura 21).

Figura 21. Tensão de saída do protótipo com 2000 Hz de entrada



Fonte: Autoria própria (2025)

Devido à limitação do microcontrolador Arduino, que realiza a leitura de sinais somente a partir de 0,1 V, não foi possível dar continuidade aos testes práticos relacionados à lógica de programação e ao acionamento do LED. Ainda assim, foi possível observar o comportamento do circuito quanto à resposta em diferentes frequências. Verificou-se uma atenuação do sinal quando a frequência de entrada se encontrava fora da faixa de passagem definida. Para frequências dentro dessa faixa, os valores medidos apresentaram amplitudes superiores à 36 mV, enquanto, fora dela, as amplitudes foram menores. Esses resultados indicam que o filtro projetado atua conforme projetado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos testes teóricos e práticos realizados, foi possível compreender o comportamento do sistema de conversão de sons de sirenes em sinais luminosos e avaliar sua eficiência.

Além disso, a escassez de materiais laboratoriais e a ausência de referências técnicas consolidadas sobre sirenes de veículos de emergência dificultaram a identificação de falhas e a otimização do protótipo.

5.1 Análise dos dados de testes teóricos

Com base nas informações obtidas nos testes teóricos, utilizou-se um gerador de funções controlado para simular o comportamento de um microfone, possibilitando avaliar a resposta do circuito frente a diferentes frequências. Verificou-se que as tensões relevantes para o funcionamento do sistema situam-se na faixa entre 14V e 20V para uma fonte de 5V ou valores de 2,8 à 4 vezes maior que o sinal de entrada.

A análise teórica foi realizada por meio de diferentes softwares, de acordo com suas características e finalidades. O Falstad mostrou-se uma ferramenta eficiente para a análise de sinais de áudio e para a visualização do comportamento das ondas de áudio, contribuindo para a compreensão do funcionamento do sistema. Já o PSIM foi utilizado para o projeto e análise do filtro ativo, permitindo observar o comportamento do circuito em diferentes condições de frequência e carga, o que auxiliou na validação dos parâmetros teóricos definidos. O TinkerCAD, por sua vez, foi empregado para a representação visual do circuito, sendo uma das poucas plataformas que já possuem o Arduino integrado em seu ambiente de simulação. Apesar de sua utilidade, o software apresenta limitações, por ser uma ferramenta online e relativamente pesada, o que pode comprometer o desempenho durante a execução de simulações mais complexas.

Além disso, identificou-se a ausência de normas técnicas específicas no Brasil que padronizam as características de sirenes de veículos de emergência, como frequência, forma de onda ou intensidade sonora. Essa lacuna normativa reforça a importância de estudos experimentais e teóricos voltados à padronização e otimização desses sistemas, especialmente quando integrados a tecnologias alternativas, como a conversão de som em sinal luminoso.

5.2 Avaliação da eficiência do dispositivo prático

Nos testes práticos realizados, observou-se que a saída do filtro apresentou níveis de tensão variando entre 20mV e 50mV, valores considerados insuficientes para o processamento direto pelo microcontrolador Arduino, cuja leitura de sinal é efetiva apenas a partir de 0,1 V. Essa limitação impossibilita o acionamento do LED.

Apesar dessa restrição, verificou-se que o filtro ativo projetado apresentou bom desempenho em relação à seletividade de frequência, atuando de forma coerente com os resultados obtidos nas simulações teóricas. As medições demonstraram que o circuito responde adequadamente às frequências compreendidas entre 800 Hz e 1500 Hz, promovendo uma atenuação significativa fora dessa faixa. Tal comportamento confirma a eficiência do projeto na identificação seletiva de sinais sonoros característicos de sirenes.

Entretanto, a baixa amplitude do sinal de saída representa um obstáculo para a aplicação prática do sistema. Para que o circuito possa ser utilizado de forma funcional, é necessária a implementação de um estágio adicional de amplificação, capaz de elevar a tensão a níveis compatíveis com a leitura do Arduino. Essa etapa permitiria a detecção confiável dos sinais filtrados e o consequente acionamento do LED, concretizando a conversão de som em estímulo luminoso.

Além disso, observou-se que a escassez de materiais e referências técnicas específicas dificultou a identificação da origem exata da falha no sistema prático. A ausência de publicações e projetos semelhantes sobre a transformação de sons de sirenes em sinais luminosos tornou o processo investigativo mais complexo. Somam-se a isso as limitações de infraestrutura laboratorial, visto que a dificuldade de obtenção de equipamentos como osciloscópios, fontes de alimentação reguláveis e geradores de funções pode comprometer a precisão das medições e dificultar a análise detalhada do comportamento do circuito. Esses fatores contribuíram para os desafios enfrentados durante a elaboração e a validação do protótipo.

6 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido teve como objetivo avaliar a viabilidade de utilização de um filtro ativo do tipo PF-MFB no acionamento de dispositivos luminosos destinados a motoristas com deficiência auditiva, promovendo maior segurança e acessibilidade no trânsito. As simulações demonstraram que o filtro apresenta bom desempenho em seletividade de frequência, confirmando o potencial teórico do projeto para identificar sinais sonoros característicos de sirenes de veículos de emergência. Nos testes práticos, entretanto, os níveis de tensão obtidos na saída (entre 20mV e 50mV) mostraram-se insuficientes para o acionamento direto pelo microcontrolador Arduino, o que inviabilizou o funcionamento completo do protótipo. Assim, constatou-se que o conceito proposto é viável e promissor, embora necessite de etapas adicionais de amplificação e calibração para aplicação real.

6.1 Implicações práticas e contribuições da pesquisa

A pesquisa contribui de forma significativa ao demonstrar que filtros ativos de baixo custo podem ser aplicados em sistemas assistivos voltados à inclusão de motoristas surdos, representando um avanço tecnológico com impacto direto na segurança viária e na igualdade de condições no trânsito. Além disso, o estudo destaca uma importante lacuna normativa: no Brasil, não há leis ou normas técnicas que padronizem as características sonoras de sirenes de veículos de emergência, como faixa de frequência, intensidade ou tipo de sinal. Essa ausência dificulta o desenvolvimento de sistemas de detecção e conversão de som em luz, reforçando a necessidade de regulamentações específicas que favoreçam a acessibilidade e a inovação.

Do ponto de vista científico, o trabalho oferece uma base teórica e experimental inicial para futuros projetos voltados à conversão de sinais acústicos em estímulos luminosos, mostrando que o filtro PF-MFB é tecnicamente capaz de realizar a filtragem do sinal proveniente de microfones de eletreto. Mesmo com as limitações encontradas, os resultados obtidos reforçam o potencial de utilização dessa abordagem em dispositivos de alerta visual, especialmente em contextos de mobilidade urbana inclusiva.

6.2 Limitações e sugestões para pesquisas futuras

A principal limitação encontrada foi a baixa amplitude do sinal de saída, que impossibilitou a validação experimental completa do protótipo. Para superar esse obstáculo, recomenda-se a implementação de estágios de amplificação, por exemplo, com circuitos integrados como o AD620. Ressalta-se, contudo, que a inserção de amplificadores pode introduzir ruídos indesejados, exigindo investigações adicionais para garantir a confiabilidade do sistema.

6.3 Considerações finais

Conclui-se que o projeto, mesmo não tendo atingido plenamente os resultados esperados nos testes práticos, apresenta viabilidade conceitual e relevância acadêmica e social. A proposta contribui para o avanço da discussão sobre tecnologias assistivas, apontando caminhos para o desenvolvimento de soluções acessíveis e inovadoras.

Dessa forma, este trabalho pode ser considerado um ponto de partida para futuras pesquisas e aplicações, reforçando a importância de iniciativas que integrem engenharia, inclusão social e segurança viária.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **Brasil tem mais de 10 milhões de pessoas surdas, segundo o IBGE**. 07 Julho. 2022 Disponível em:
<https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/direitos-humanos/audio/2022-07/brasil-tem-mais-de-10-milhoes-de-pessoas-surdas-segundo-o-ibge>. Acesso em: 19 out. 2025.

ACADEMIA DE LIBRAS. **Comunidade Surda no Brasil e as Libras: O que é e quais os desafios?** 27 nov. 2019. Disponível em:
<https://academiadelibras.com/blog/comunidade-surda>. Acesso em: 05 jun. 2023.

ACADEMIA DE LIBRAS. **Surdo Pode Dirigir no Brasil? Veja o que a Lei Fala**. 10 dez. 2020. Disponível em:
<https://academiadelibras.com/blog/surdo-pode-dirigir>. Acesso em: 05 jun. 2023.

AMORIM, Elisiane Vieira de. **A formação do surdo para aquisição da CNH: entre as leis e a efetivação prática**. 2019. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Pedagogia) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Humanidades, 2019. Disponível em:
<https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/20145/1/PDF%20-%20Elisiane%20Vieira%20de%20Amorim.pdf>. Acesso em: 19 out. 2025.

DIAS, Fabiana. **Acústica**. 28 dez. 2018. Disponível em:
<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/acustica>. Acesso em: 04 nov. 2023.

DESPACHANTE, Lumma. **Leis de trânsito: quais são as principais para garantir a segurança?** 22 jun. 2012. Disponível em:
<https://www.lumma.com.br/bloglumma/leis-de-transito-quais-sao-as-principais-para-garantir-a-seguranca/>. Acesso em: 04 nov. 2023.

HAND TALK. **Tecnologia assistiva para surdos: o que são e quais os desafios?** 2023. Disponível em:
<https://www.handtalk.me/br/blog/tecnologia-assistiva-surdos/>. Acesso em: 19 out. 2025

INFO ESCOLA. **Acústica**. Disponível em:
<https://www.infoescola.com/fisica/acustica/>. Acesso em: 04 nov. 2023.

MECÂNICA ONLINE. **Deficientes auditivos enfrentam dificuldades para se inserirem no trânsito**. 31 ago. 2016. Disponível em:
<https://mecanicaonline.com.br/2016/08/deficientes-auditivos-enfrentam-dificuldades-para-se-inserirem-no-transito/>. Acesso em: 05 jun. 2023.

MENDES DE SOUZA, V. et al. **A inclusão de Surdos no Trânsito**. Revista CEFAC, v. 18, n. 3, May-Jun 2016. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/1982-0216201618317615>. Acesso em: 05 jun. 2023.

PORTAL DO TRÂNSITO. **Legislação do trânsito brasileiro**. Disponível em:
<https://www.portaldotransito.com.br/legislacao-de-transito-do-brasil/>. Acesso em: 04 nov. 2023.

PLANALTO FEDERAL. **LEI Nº 9.503**, de 23 de setembro de 1997. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9503.htm. Acesso em: 04 nov. 2023.

PLANALTO FEDERAL. **LEI Nº 13.146**, de 06 de julho de 2015. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13146.htm. Acesso em: 04 nov. 2023.

PLANALTO FEDERAL. **LEI Nº 14.071**, de 13 de outubro de 2020. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14071.htm. Acesso em: 04 nov. 2023.

SENADO FEDERAL. **CDH aprova carteira de habilitação para surdos em todas as categorias**. Senado Notícias, Brasília, 15 mar. 2023. Disponível em:
<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/03/15/cdh-aprova-carteira-de-habilitacao-para-surdos-em-todas-as-categorias>. Acesso em: 19 out. 2025.

TCJ ELETRÔNICA. **Arduino Uno SMD com Cabo**. Disponível em:
<https://www.tcjeletronica.com.br/arduino-uno-smd-com-cabo>. Acesso em: 19 out.
2025.

USINAINFO. **Sensor de Som KY-038 para Arduino**. Disponível em:
<https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-som-arduino/sensor-de-som-ky-038-para-arduino-5031.html>. Acesso em: 19 out. 2025.

APÊNDICE A - Código para Arduino

```

const int sensorPin = A0; // Entrada analógica do sensor
const int ledPin = 13;    // Saída digital do LED

int sensorValue;          // Valor lido do sensor
int high;                 // Limite superior dinâmico
int low;                  // Limite inferior dinâmico

unsigned long startTime = 0; // Marca o início da contagem de tempo
boolean timerStarted = false; // Indica se a contagem começou
boolean ledOn = false;      // Estado atual do LED

void setup() {
  Serial.begin(9600);      // Inicia comunicação serial
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // Define o LED como saída

  sensorValue = analogRead(sensorPin); // Primeira leitura inicial para definir os limites
  high = sensorValue;
  low = sensorValue;
}

void loop() {

  sensorValue = analogRead(sensorPin); // Lê o valor atual do sensor

  if (sensorValue > high) { // Atualiza os limites conforme variações do sensor
    high = sensorValue;
  }
  if (sensorValue < low) {
    low = sensorValue;
  }

  float highLimit = high * 1.1; // Calcula faixa de tolerância: 10% acima do high e 10% abaixo do low
  float lowLimit = low * 0.9;

```

```
if (sensorValue > lowLimit && sensorValue < highLimit) { // Verifica se o valor está dentro da faixa
  if (!timerStarted) { // Se a contagem ainda não começou
    startTime = millis(); // Inicia contagem
    timerStarted = true;
  }

  if (millis() - startTime >= 3000 && !ledOn) { // Se na faixa por 3 segundos, acende o LED
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    ledOn = true;
  }

} else { // Saiu da faixa: reinicia contagem e apaga LED
  timerStarted = false;
  ledOn = false;
  digitalWrite(ledPin, LOW);
}
}
```