

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



MAIKY BARRETO DA SILVA

**PROTÓTIPO DIDÁTICO DE AMPLIFICADOR DE SOM
PARA UTILIZAÇÃO EM AULAS DE LABORATÓRIO**

VITÓRIA
2021

MAIKY BARRETO DA SILVA

PROTÓTIPO DIDÁTICO DE AMPLIFICADOR DE SOM PARA UTILIZAÇÃO EM AULAS DE LABORATÓRIO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Maiky Barreto da Silva**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. André Ferreira

VITÓRIA
2021

MAIKY BARRETO DA SILVA

PROTÓTIPO DIDÁTICO DE AMPLIFICADOR DE SOM PARA UTILIZAÇÃO EM AULAS DE LABORATÓRIO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Maiky Barreto da Silva**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 8 de outubro de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. André Ferreira
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Dr. Antônio Manoel Ferreira Frasson
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Eng. Heliomar Guimarães Guzzo
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

“Amigos podem seguir caminhos diferentes, mas não deixam de ser amigos.” – Gon Freecss.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me apoiarem incondicionalmente em minha trajetória acadêmica. Agradeço a meus colegas de curso, em especial aos meus amigos que ingressaram comigo, por sempre me ajudarem, me compreenderem e me suportarem como eu sou.

Agradeço ao professor André Ferreira por, além de ser um ótimo professor, aceitar orientar este projeto que certamente irá valorizar a graduação de todos que utilizarem, além de toda a sua disponibilidade. Também agradeço a todos os professores que eu tive oportunidade de ser aluno, pois todos contribuíram de alguma forma para a realização deste projeto.

Agradeço a Universidade Federal do Espírito Santo e todos os funcionários por toda a estrutura e manutenção do campus, que certamente ajudaram não só a mim, mas a vários outros alunos a atingir seus objetivos.

RESUMO

Durante o curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo o estudante tem acesso a uma ampla matriz curricular, com disciplinas teóricas e práticas, que incluem diversas ferramentas utilizadas no cotidiano da profissão, fundamentais ao futuro engenheiro, entretanto não há equipamentos ou protótipos com a capacidade de simular falhas. Há artigos que mostram o sucesso da implementação deste tipo de protótipo em outros cursos e universidades, além de uma consulta interna com os alunos que indicou que equipamentos deste tipo podem auxiliar na formação acadêmica deles. Este trabalho tem como objetivo criar um protótipo de amplificador de som que simula falhas. Para isto, foi feita uma pesquisa sobre o funcionamento de uma caixa de som e em busca de potenciais circuitos elétricos para servir como base do protótipo. Também foi feito um estudo sobre seus possíveis modos de falha e efeitos. O resultado foi um protótipo funcional e simples de usar por estudantes e professores.

Palavras-chave: Amplificadores. Áudio. Eletrônica. Formação Profissional.

ABSTRACT

During the undergraduate course in Electrical Engineering at the Federal University of Espírito Santo the student has access to a broad curriculum matrix, with theoretical and practical disciplines, which include several tools used in everyday life of the profession, fundamental to the future engineer, however there is no equipment or prototypes with the ability to simulate failures. There are articles that show the success of the implementation of this kind of prototype in other courses and universities, besides an internal consultation with the students that indicated that equipments of this kind can help in their academic formation. This work aims to create a sound amplifier prototype that simulates failures. For this, it was made a research about the operation of a speaker and in search of potential electrical circuits to serve as a basis for the prototype. It was also made a study about its possible failure modes and effects. The result was a functional prototype, simple to use by students and teachers.

Keywords: Amplifiers. Audio. Electronics. Professional Training.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um ouvido com uma breve explicação de seu funcionamento.	15
Figura 2 – Frequências de som que alguns instrumentos reproduzem.	16
Figura 3 – Circuito emissor comum.	18
Figura 4 – Circuito base comum.	18
Figura 5 – Circuito coletor comum.	19
Figura 6 – Circuito espelho de corrente.	20
Figura 7 – Circuito fonte de corrente.	20
Figura 8 – Circuito amplificador diferencial.	21
Figura 9 – Circuito cascode.	22
Figura 10 – Estágios de um amplificador de áudio comum	22
Figura 11 – Ângulo de condução de uma senoide em um amplificador classe A.	24
Figura 12 – Ângulo de condução de uma senoide em um amplificador classe B.	25
Figura 13 – Ângulo de condução de uma senoide em um amplificador classe AB.	25
Figura 14 – Exemplo de filtro passivo e sua resposta em frequência.	26
Figura 15 – Exemplo de filtro ativo e sua resposta em frequência	27
Figura 16 – Filtro passa baixa à esquerda e filtro passa alta à direita.	28
Figura 17 – Exemplo de fonte simples não-regulada.	30
Figura 18 – Exemplo de fonte regulada.	30
Figura 19 – Exemplo de fonte chaveada.	31
Figura 20 – Exemplo de formulário de aplicação do FMEA.	32
Figura 21 – Exemplo de amplificador de áudio utilizando apenas transistores, resistores, capacitores e um diodo.	35
Figura 22 – Exemplo de circuito amplificador de áudio utilizando o LM386.	36
Figura 23 – Circuito interno do LM386, separado por estágios de amplificação.	37
Figura 24 – Circuito LM386 com ganho de 20.	40
Figura 25 – Circuito LM386 com ganho de 200.	41
Figura 26 – Circuito LM386 com aumento de graves.	41
Figura 27 - Resposta em frequência do circuito LM386 com aumento de graves.	42
Figura 28 – Circuito amplificador de áudio LM386 de ótimo som.	43
Figura 29 – Esquemático escolhido para a montagem do protótipo	44
Figura 30 - Painel de controle do protótipo.	46

Figura 31 - Circuito interno do protótipo.	46
Figura 32 – Alto-falante direito do protótipo.....	47
Figura 33 – Alto-falante esquerdo do protótipo.....	48
Figura 34 - Posicionamento dos elementos no painel frontal do protótipo.	48
Figura 35 – Sinal de entrada do circuito.	50
Figura 36 – Sinal de saída do circuito.....	51
Figura 37 – Demonstração da redução de ruído ao acionar a chave S1 do circuito.	52
Figura 38 – Saída do amplificador com a chave S1 desligada.	52
Figura 39 – Saída do amplificador com a chave S3 desligada.	53
Figura 40 – Gráfico da resposta em frequência do circuito.	54
Figura 41 – Sinal de saída distorcido.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – FMEA do protótipo.....	56
-----------------------------------	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Apresentação do Tema e Justificativa	12
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Ondas Sonoras e Notas Musicais	15
2.2	Características Básicas de um Amplificador de Potência.....	16
2.3	Circuitos Comuns em Amplificadores de Áudio	17
2.3.1	Circuito Emissor Comum	17
2.3.2	Circuito Base Comum.....	18
2.3.3	Circuito Coletor Comum	19
2.3.4	Circuito Espelho de Corrente.....	19
2.3.5	Circuito Fonte de Corrente	20
2.3.6	Circuito Amplificador Diferencial	21
2.3.7	Circuito Cascode	21
2.4	Estágios de um Amplificador de Áudio.....	22
2.5	Filtros Eletrônicos	26
2.5.1	Classificação.....	26
2.5.2	Principais características	27
2.5.2.1	Frequência de Corte	27
2.5.2.2	Sinal de saída	28
2.5.3	Aplicação dos filtros em circuitos de áudio	28
2.5.3.1	Telefonia	28
2.5.3.2	Sistemas de áudio.....	29
2.6	Fontes de Alimentação	29
2.7	Metodologias de Análise de Falhas	31
3	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	34
3.1	Escolha de um Circuito de Referência	34
3.1.1	Motivação	34

3.1.2	Parâmetros de Escolha	34
3.1.3	Circuitos pesquisados.....	34
3.1.4	O Circuito Integrado LM386.....	36
3.1.5	O Circuito Interno do LM386.....	37
3.1.6	Os pinos do LM386 e suas Funções	38
3.2	Busca pelo Circuito de Referência utilizando o LM386	39
3.2.1	Objetivos e Metodologia	39
3.2.2	Testes com os esquemáticos da Folha de Dados do LM386	40
3.2.3	Testes com o circuito disponibilizado por Campbell	42
3.2.4	Circuito Definitivo.....	43
3.3	Implementação do Protótipo	44
3.4	Utilização do protótipo.....	48
4	ANÁLISE DO PROTÓTIPO.....	50
4.1	Análise dos Efeitos	50
4.1.1	Chaves S1 e S2 – Ruído no Alto-Falante	51
4.1.2	Chave S3 – Ganho do Sinal de Entrada.....	53
4.1.3	Chave S4 – Alteração da Resposta em Frequência.....	53
4.1.4	Potenciômetro – Distorção do Sinal de Saída	54
4.2	FMEA do Circuito Implementado	55
5	CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS.....	57
6	REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE A – CONSULTA COM ALUNOS SOBRE AULAS EM LABORATÓRIO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO		62

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Tema e Justificativa

Durante o curso de Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Espírito Santo, o aluno caminha entre aulas teóricas sobre os conceitos de eletricidade, eletrônica e computação, que são a base de formação teórica, e aulas de laboratório que visam demonstrar na prática o que foi aprendido em sala de aula. Apesar disto, várias aulas laboratoriais ministradas hoje não possuem a capacidade de instigar o aluno a buscar soluções para problemas reais, pois todos os problemas, se ocorrem, são conhecidos pelo professor e facilmente resolvidos.

Em consulta realizada com os alunos dos últimos períodos do curso, apresentada no Apêndice A, a maioria concorda que os experimentos como são hoje auxiliam no aprendizado, mas também que experimentos que simulam situações reais de defeitos podem melhorar sua formação. Isto mostra que algumas atitudes em aula devem ser mudadas para obter o máximo aproveitamento do conhecimento, como por exemplo saber identificar, analisar as possíveis soluções de um problema e as suas consequências, ao invés de simplesmente resolver (BELHOT, 1997).

Várias escolas de Engenharia, como os Institutos Federais do Espírito Santo (BATISTA; MAESTRIA, 2019) (ALMEIDA; MUNIZ, 2018) e de Pernambuco (AZÊVEDO, PAZ; ALVES FILHO; ALBUQUERQUE NETO; VIEIRA, 2018) investiram na confecção de equipamentos e formas de ensinar que aproximassem os alunos dos problemas reais e em todos os casos os resultados mostraram que os alunos se sentiam mais motivados a aprender a disciplina. Além disto, existem projetos de protótipos realizados por estudantes da Universidade Federal do Espírito Santo (COSTA, 2018) e da Universidade Federal do Pará (CABRAL, 2010) com o intuito de auxiliar na fixação de conceitos aprendidos em sala de aula. Todos os projetos apresentados mostram que os alunos possuem interesse em técnicas de ensino mais sofisticadas e ligadas à realidade da profissão.

É importante citar que, de acordo com Belhot (1997), o ensino sob a óptica da solução de problemas é uma abordagem que pode ser complicada para um engenheiro recém-formado, visto que muitos saem da graduação resolvendo apenas os problemas dados em sala de aula, sem a metodologia básica para resolver problemas do mundo real. Criar ferramentas que provoquem os alunos a buscarem soluções que não são aprendidas em sala de aula pode evitar o comportamento citado anteriormente, melhorando a qualificação do indivíduo.

De acordo com uma pesquisa realizada pelo autor com os alunos dos 4 últimos períodos, apresentada no Apêndice 1, 65,4% dos entrevistados consideram as aulas em laboratório essenciais para o completo entendimento das disciplinas teóricas, mas apenas 25% consideram de grande ajuda para a formação profissional. Além disso, praticamente todos (98%) os entrevistados consideram que uma ferramenta didática que simule falhas pode auxiliar na formação para o mercado de trabalho.

Além disso, os diversos investimentos em protótipos educacionais (BATISTA; MAESTRIA, 2019) (ALMEIDA; MUNIZ, 2018) (AZÊVEDO, PAZ; ALVES FILHO; ALBUQUERQUE NETO; VIEIRA, 2018) mostraram que os alunos passam a ganhar interesse pelas disciplinas teóricas, além de aumentarem o senso crítico dos estudantes. Logo, este projeto visa reduzir a distância entre um estudante de engenharia e as atividades que podem ser exercidas profissionalmente por um engenheiro.

O amplificador de áudio é um dos meios de perceber os efeitos de amplificadores de sinal e filtros passa-baixa e alta, aprendidos nas disciplinas de Circuitos Elétricos e nas Eletrônicas Básica 1 e 2, de uma forma diferente dos sinais de osciloscópio cobrados em laboratório e foi escolhido como ferramenta de aprendizado devido a suas possibilidades de inserção de defeitos e o seu baixo custo em relação a outros tipos de protótipos educacionais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste projeto é criar um protótipo de amplificador de áudio que tenha a capacidade de simular defeitos para ser utilizado em aulas em laboratório das disciplinas do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos, que são as etapas para alcançar objetivo principal, são:

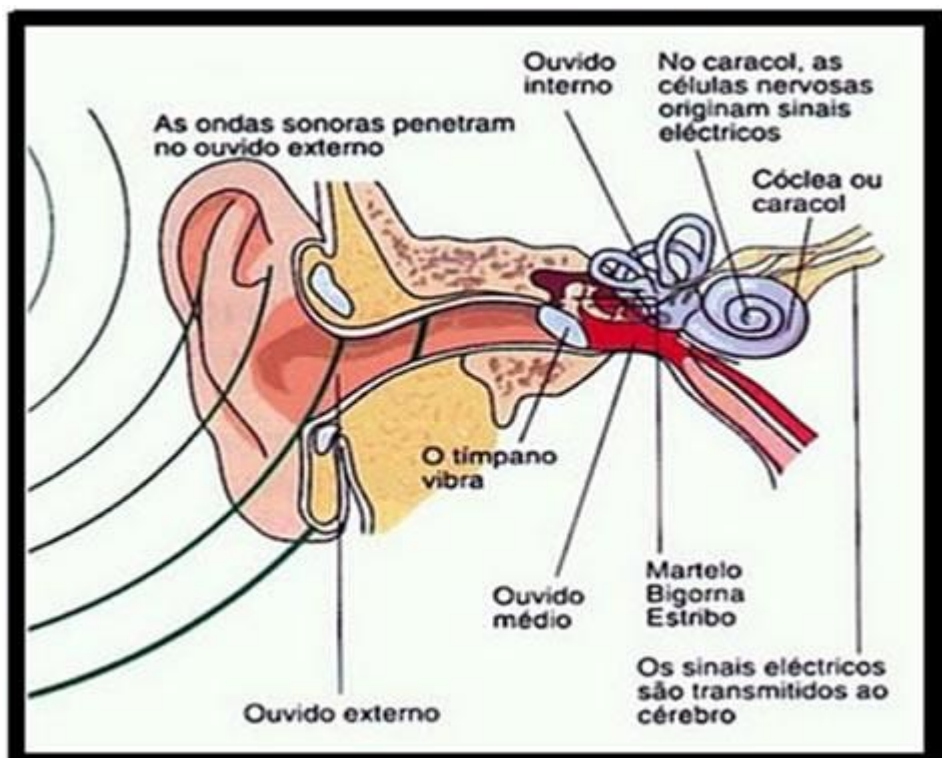
- Estudar o processo de construção de um amplificador de áudio e suas limitações;
- Identificar um circuito de áudio capaz de inserir falhas e trabalhar com elas de forma estável;
- Construir o protótipo do amplificador de áudio e validar seus fenômenos;
- Mostrar cada efeito identificado na prática de forma simples;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Ondas Sonoras e Notas Musicais

O som, em seu conceito mais simples, é a perturbação de um meio a partir de objetos mais densos. No geral, esta perturbação provoca ondas, que possuem amplitude, que determina o quão potente é este som, e frequência, que determina o tom. Quando esta vibração possui frequência na faixa dos 20 Hz a 20 kHz ela pode ser ouvida pelos humanos. Caixas de som e instrumentos musicais são dispositivos criados para gerar som, mas eles também podem ser provenientes da fala, de animais e da natureza (CONCEIÇÃO; BRACHT). Os ouvidos, de forma geral, são as estruturas responsáveis por captar ondas sonoras e transformá-las em sinais elétricos para serem enviadas ao cérebro, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de um ouvido com uma breve explicação de seu funcionamento.

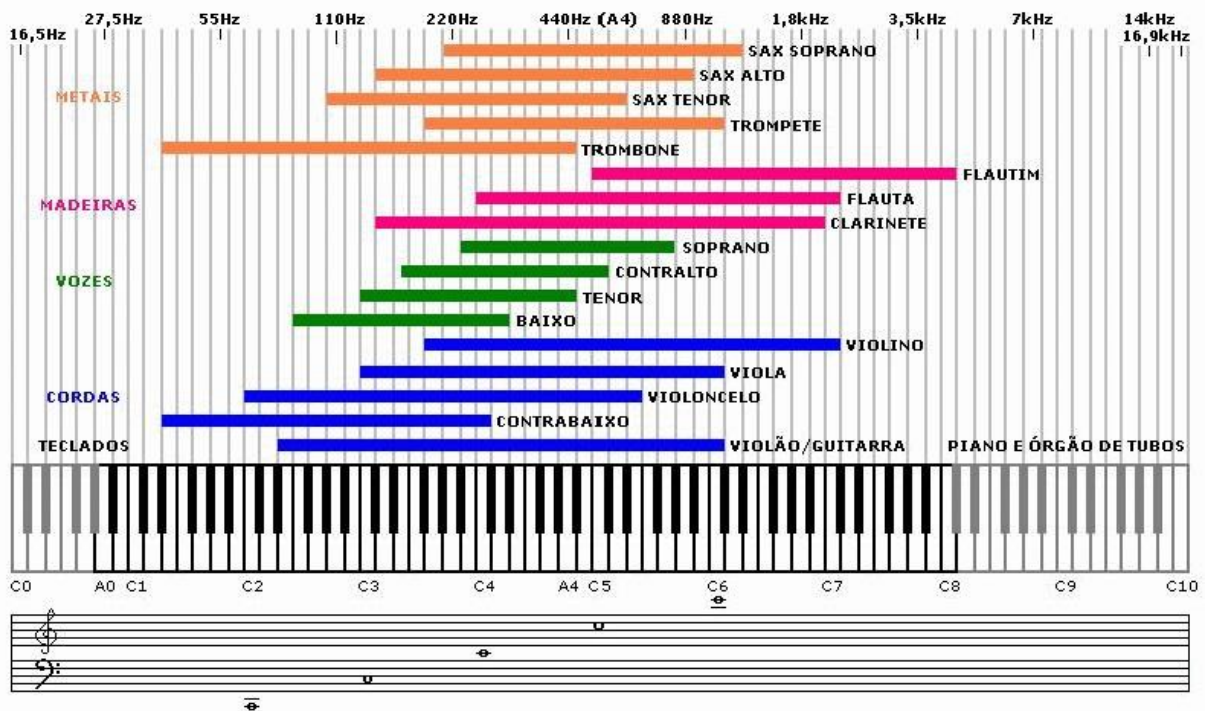


Fonte: Anjos, s.d.

O diapasão é uma ferramenta que é capaz de produzir uma senoide em uma determinada frequência ou, em termos musicais, é capaz de reproduzir com precisão uma nota musical. Os instrumentos musicais são capazes de reproduzir várias notas

musicais em um único equipamento, porém podem apresentar sons não-puros, ou seja, com a presença de harmônicos de frequência (BRAGA, 2019). A Figura 2 mostra o alcance de notas musicais, ou frequências, que alguns instrumentos podem reproduzir.

Figura 2 – Frequências de som que alguns instrumentos reproduzem.



Fonte: Darezzo, s.d.

De acordo com o Dicionário Online Aulete, a palavra música é definida como a "Arte de usar os sons com intenção estética e expressiva, combinando-os num mesmo todo criativo de ritmo e harmonia" (MÚSICA, 2021), que pode ser interpretada como a arte de misturar diversos sons com diversas características distintas e de diversas fontes de forma harmônica e rítmica.

2.2 Características Básicas de um Amplificador de Potência

Amplificadores de potência, em um sistema de áudio, são dispositivos capazes de converter um sinal elétrico de baixa tensão para um sinal de maior amplitude, capaz de operar um alto-falante (CORDELL, 2010). Alto-falantes são dispositivos eletromecânicos responsáveis por transformar os sinais elétricos recebidos dos amplificadores de potência em ondas sonoras (CORDELL, 2010).

No início da eletrônica os amplificadores eram valvulados e funcionavam com altas tensões, tanto de alimentação quanto de sinal de áudio, e dependiam de transformadores para o correto acionamento dos alto-falantes. Com o avanço da eletrônica passou a usar transistores de silício, bem menores, seguros e baratos. Há aqueles que dizem que os amplificadores valvulados possuem maior qualidade de áudio, mas as vantagens do transistorizado o fez ter adoção pela indústria e pelos consumidores (STAFFORD, 2012).

É essencial que, para sistemas de som de alta qualidade, eles sejam seguros para o usuário, possuam uma potência de saída adequada ao seu uso (fones de ouvido tem potência em miliwatts (BLACK, 2017)), enquanto sistemas de som de cinema possuem kilowatts distribuídos em diversas caixas (JBL, 2003), resposta em frequência sem grandes atenuações para a faixa dos 20Hz a 20kHz, alta relação sinal-ruído e baixa distorção (SELF, 2009).

No geral os amplificadores de áudio possuem três estágios: Entrada, Amplificação de Sinal e Saída. Cada estágio é responsável por uma etapa da amplificação, tendo características diferentes para que, em conjunto, ofereçam um sistema estável, confiável e robusto.

2.3 Circuitos Comuns em Amplificadores de Áudio

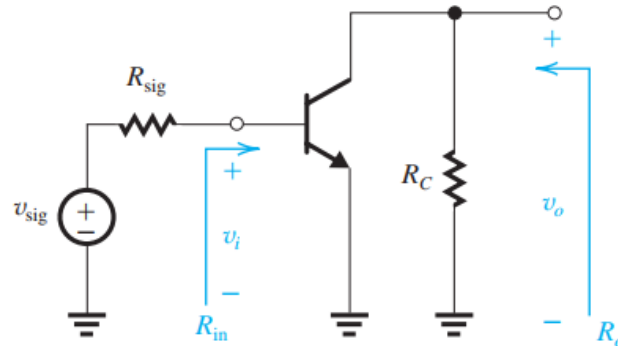
Para estudar a função de cada estágio de um amplificador é necessário estudar seus pequenos blocos constituintes. As configurações com transistores mais utilizadas em amplificadores de áudio são: Emissor Comum, Base Comum, Coletor Comum, Espelho de Corrente, Fonte de Corrente, Amplificador Diferencial e Cascode. As três primeiras são arranjos básicos de amplificação de tensão e corrente, enquanto as outras são circuitos utilitários essenciais para o correto funcionamento do sistema.

2.3.1 Circuito Emissor Comum

A configuração Emissor Comum possibilita um alto ganho de corrente e tensão, com média resistência de entrada e saída. Uma das principais características deste

amplificador é que seu ganho de tensão possui sinal negativo, mostrando que o sinal de saída possui fase invertida com o sinal de entrada (SEDRÁ, 2007). É chamada assim pois seu emissor está ligado na referência do circuito. A Figura 3 mostra o esquemático desta configuração.

Figura 3 – Circuito emissor comum.

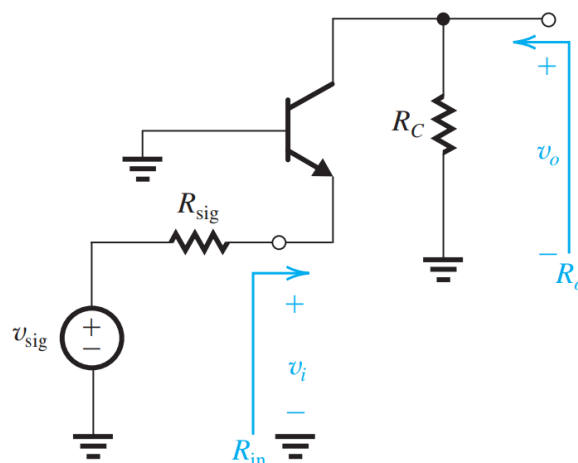


Fonte: Sedra, 2007.

2.3.2 Circuito Base Comum

A configuração Base Comum possui um baixo ganho de corrente e alto ganho de tensão devido a sua alta resistência de saída. É muito utilizado para casamento de impedâncias entre fontes e cargas. Neste caso, a base está ligada à referência do circuito e o sinal está conectado ao emissor (SEDRÁ, 2007). A Figura 4 mostra como esta configuração é montada.

Figura 4 – Circuito base comum.

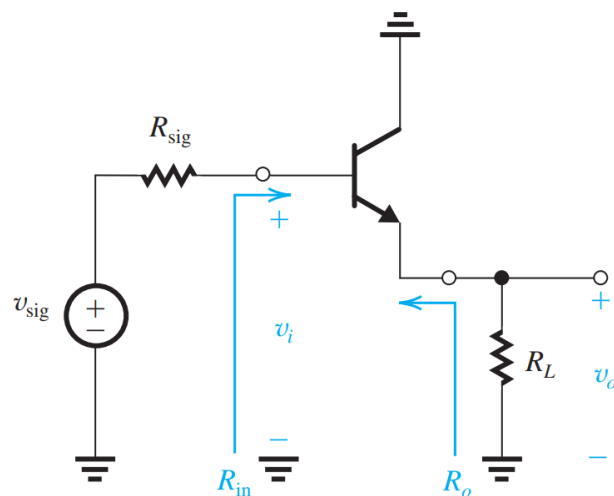


Fonte: Sedra, 2007.

2.3.3 Circuito Coletor Comum

A configuração Coletor Comum, também conhecida como seguidor de emissor, apresenta ganho unitário de tensão, grande amplificação de corrente e baixa resistência de saída. Ele é bastante utilizado quando a tensão já possui a amplitude necessária, mas a impedância de saída precisa ser reduzida. O coletor é referenciado neste circuito (SEDRA, 2007). A Figura 5 mostra esta configuração.

Figura 5 – Circuito coletor comum.

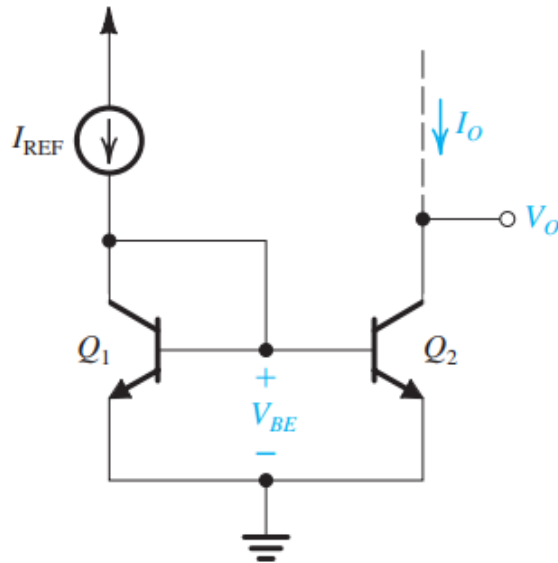


Fonte: Sedra, 2007.

2.3.4 Circuito Espelho de Corrente

Os Espelhos de Corrente são circuitos ativos que "copiam" a corrente de outros circuitos ativos. Em outras palavras, a partir de uma corrente de referência que passa em um transistor, o circuito é capaz de manter este mesmo valor de corrente em outros transistores independentes da carga (SEDRA, 2007). A Figura 6 mostra o esquemático teórico de um espelho de corrente.

Figura 6 – Circuito espelho de corrente.

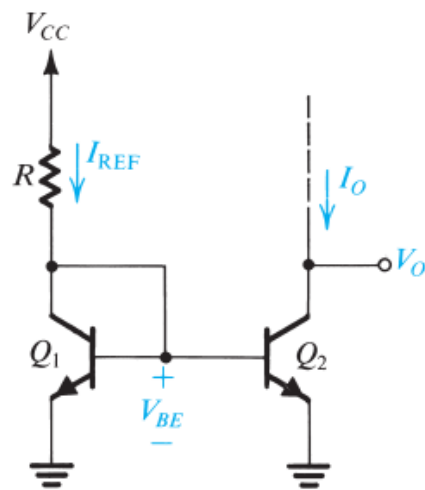


Fonte: Sedra, 2007.

2.3.5 Circuito Fonte de Corrente

Um circuito Fonte de Corrente é um circuito capaz de manter uma corrente selecionada constante em uma carga devido a sua alta impedância de saída. Ele é bastante útil para servir de corrente de referência para determinados amplificadores (SEDRA, 2007). A Figura 7 mostra como é montado o circuito.

Figura 7 – Circuito fonte de corrente.

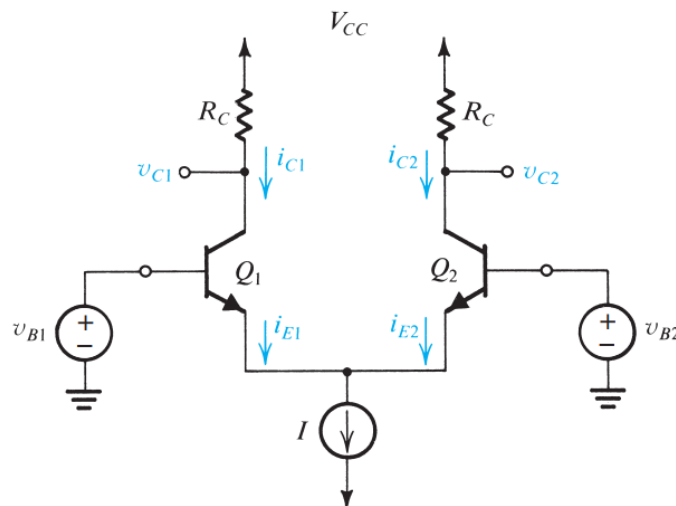


Fonte: Sedra, 2007.

2.3.6 Circuito Amplificador Diferencial

A configuração Amplificador Diferencial é capaz de, a partir de duas entradas distintas, multiplicar a diferença por um ganho diferencial dado pelo circuito, servindo para reduzir ruídos provenientes dos sinais de entrada. Um dos parâmetros mais importantes destes circuitos é a Relação de Rejeição em Modo Comum, que representa o valor de atenuação do ruído e deve ser tão alto quanto possível para o melhor desempenho do sistema. Além disto, esta configuração é utilizada na grande maioria dos amplificadores operacionais como estágio de entrada (SEDRA, 2007). A Figura 8 mostra como este circuito é montado.

Figura 8 – Circuito amplificador diferencial.

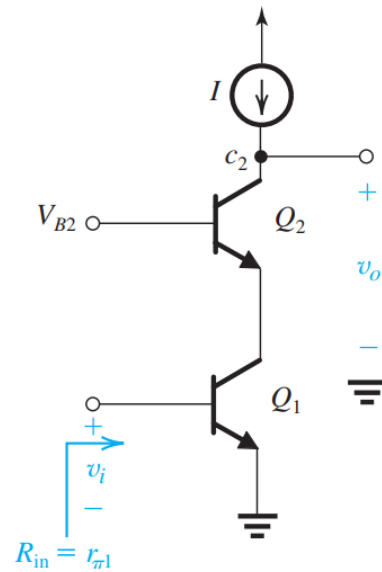


Fonte: Sedra, 2007.

2.3.7 Circuito Cascode

O amplificador Cascode é uma técnica que utiliza um amplificador Base Comum alimentando um amplificador Emissor Comum, permitindo assim uma alta impedância de entrada com ganho de tensão moderado em altas frequências. Além disto ele pode ser escalável, ou seja, podem ser inseridos mais de 2 transistores para criar um amplificador multiestágio (SEDRA, 2007). A Figura 9 mostra o esquemático básico do circuito.

Figura 9 – Circuito cascode.

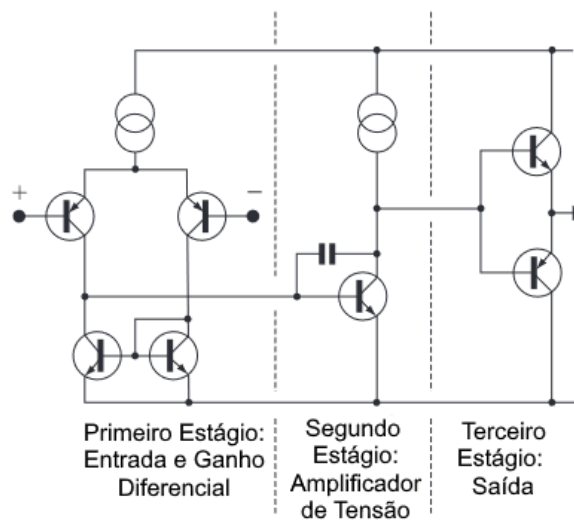


Fonte: Sedra, 2007.

2.4 Estágios de um Amplificador de Áudio

No geral, amplificadores de potência têm pelo menos dois estágios de amplificação, mas o que possui melhor desempenho ao longo da história é o Amplificador de Três Estágios, compostos por um Estágio de Entrada, um Estágio de Amplificação de Tensão e um Estágio de Saída (SELF, 2009), conforme exemplifica a Figura 10.

Figura 10 – Estágios de um amplificador de áudio comum



Fonte: Self, 2009.
Nota: Traduzido pelo Autor.

O Estágio de Entrada, também chamado de estágio de transcondutância, é composto por um amplificador diferencial, um espelho de corrente e uma fonte de corrente. Ele compara o sinal de entrada (+) com uma realimentação do sinal de saída (-) para a redução de ruídos e fechamento da malha de ganho (SELF, 2009).

O Estágio de Amplificação de Tensão é composto por um amplificador Emissor Comum, uma fonte de corrente e um capacitor. Ele também é chamado de estágio de transimpedância, pois possui um grande aumento da tensão, mas com baixa corrente de saída, característico da configuração do amplificador. O capacitor possui a função de garantir a estabilidade do sistema, adicionando um polo dominante em malha fechada, e reduzindo a quantidade de ruído presente no sinal amplificado (SELF, 2009).

O Estágio de Saída é composto por um amplificador classe A, B, AB ou outros. Por possuir amplificação unitária de tensão, é responsável pela saída de corrente do amplificador e pela sua impedância de saída, que deve ser mais baixa do que a impedância do alto-falante a ser ligado. (SELF, 2009). Estes circuitos são conhecidos como Amplificadores de Potência e são responsáveis pelo consumo e pela qualidade do sinal que vai ao alto-falante.

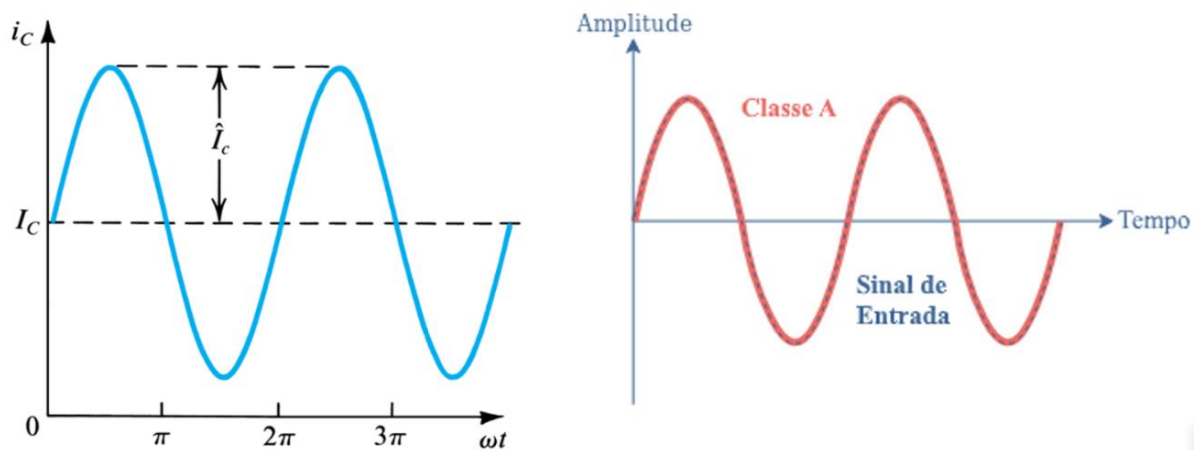
Amplificadores Classe A possuem a maior qualidade de sinal, pois são capazes de transmitir os ciclos positivos e negativos para a saída, em troca da menor eficiência energética, pois dependem de estar o tempo todo na região ativa. Em termos de condução de uma senoide, ele conduz 360° dela (SELF, 2009).

Amplificadores Classe B possuem *crossover*, uma distorção em que o sinal é modificado quando a amplitude de sua frequência é próxima de zero devido a característica condutiva dos semicondutores, pois cada transistor do par complementar é capaz de conduzir apenas o sinal positivo ou o sinal negativo, e apenas se for maior do que 0,7V, que é a tensão aproximada de excitação da base do transistor. Em outras palavras, para uma senoide, cada transistor conduz menos de 180° dela (SELF, 2009).

Amplificadores Classe AB representam a combinação das duas classes anteriores, resolvendo os problemas de consumo de energia e de distorção de sinal, permitindo que o sinal saia sem distorção e o consumo de energia seja baixo. Em comparação com os outros dois ele é capaz de conduzir mais de 180° de uma senoide, porém menos de 360° (SELF, 2009).

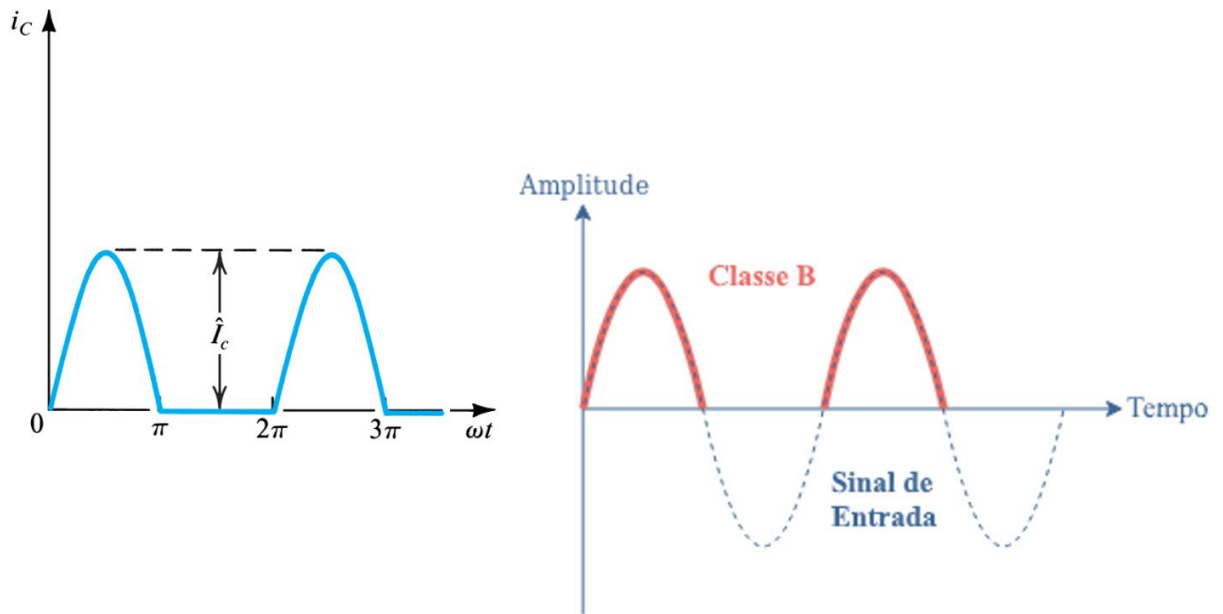
As Figuras 11, 12 e 13 mostram as partes de uma senoide que são transmitidas por um dos transistores dos amplificadores A, B e AB, respectivamente. \hat{I}_c representa a amplitude máxima da corrente do sinal, enquanto I_c representa a corrente de polarização do transistor.

Figura 11 – Ângulo de condução de uma senoide em um amplificador classe A.



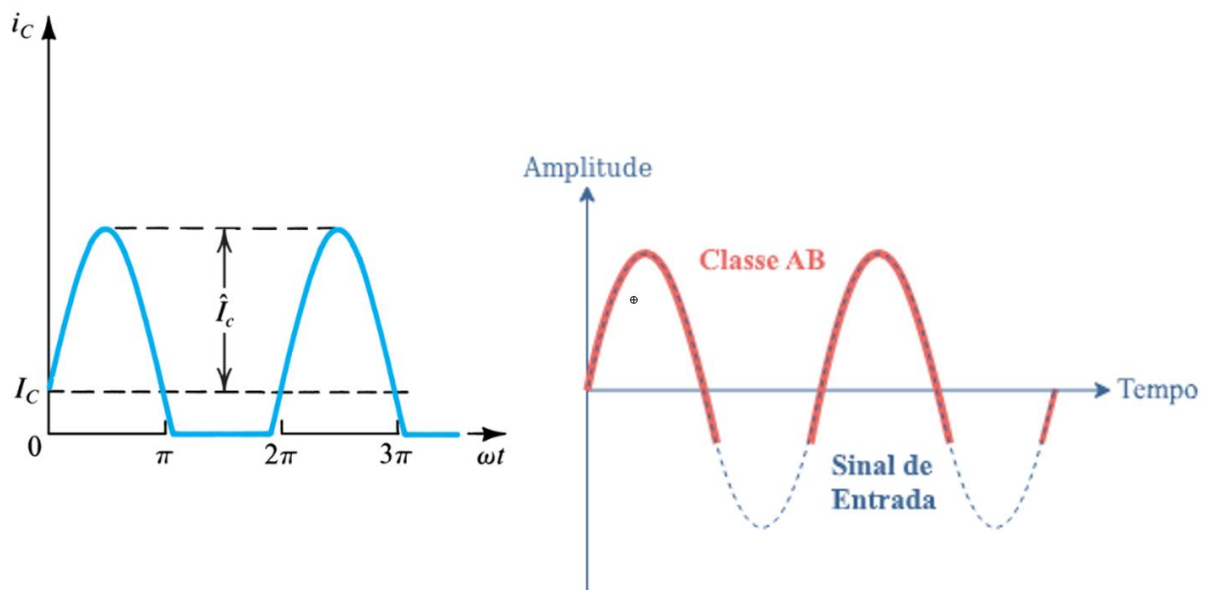
Fonte: Sedra, 2007; Poupet, s. d.

Figura 12 – Ângulo de condução de uma senoide em um amplificador classe B.



Fonte: Sedra, 2007; Poupet, s. d.

Figura 13 – Ângulo de condução de uma senoide em um amplificador classe AB.



Fonte: Sedra, 2007; Poupet, s. d.

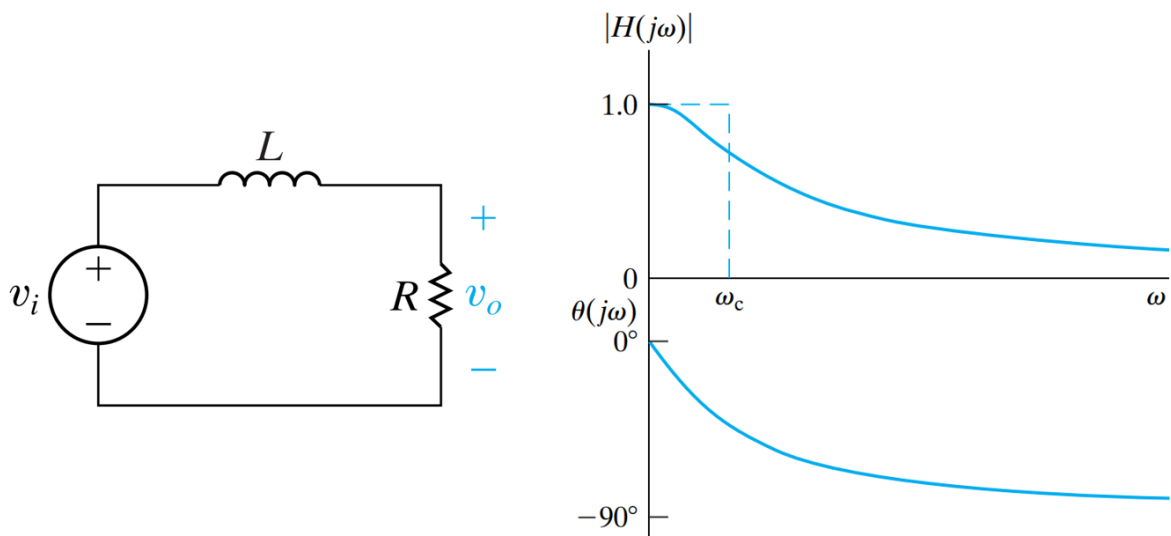
2.5 Filtros Eletrônicos

2.5.1 Classificação

Os filtros, em eletrônica, são circuitos que são capazes de atenuar as frequências de um sinal de entrada, podendo ser classificados como filtros passa-baixa, onde o sinal atenuado apresenta frequências mais altas que a frequência de corte, e filtros passa-alta, que possui o comportamento inverso do anterior, além de filtros passa-faixa, onde duas frequências de corte são selecionadas e apenas a faixa de frequência entre elas não é atenuada (NILSSON, RIEDEL, 2016).

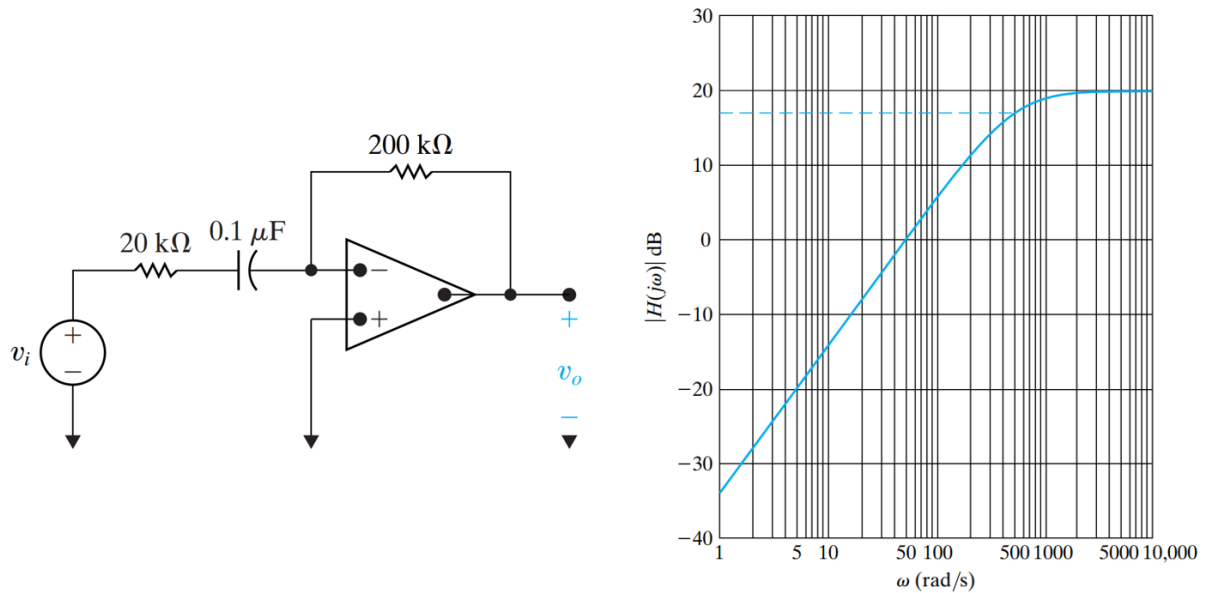
Os filtros também podem ser classificados de acordo com os seus componentes, onde os filtros passivos são filtros compostos da combinação de resistores, capacitores e/ou indutores, e não possuem a capacidade de amplificar o sinal, logo, o sinal de saída sempre possui amplitude menor ou igual ao sinal de entrada, como mostra a Figura 14, e os filtros ativos são circuitos que possuem amplificadores operacionais em conjunto, possibilitando a amplificação do sinal como um todo ou em determinadas frequências, exemplificado na Figura 15 (NILSSON, RIEDEL, 2016).

Figura 14 – Exemplo de filtro passivo e sua resposta em frequência.



Fonte: Nilsson e Riedel, 2015.

Figura 15 – Exemplo de filtro ativo e sua resposta em frequência



Fonte: Nilsson e Riedel, 2015.

Aqui serão abordados apenas os filtros passivos mais simples, ou seja, os circuitos compostos por resistores e capacitores (RC) ou resistores e indutores (RL), e suas principais características. Outros tipos de filtros não serão abordados pois não serão utilizados no projeto (NILSSON, RIEDEL, 2016).

2.5.2 Principais características

2.5.2.1 Frequência de Corte

A frequência de corte é caracterizada pela frequência na qual, para uma entrada senoidal pura em uma frequência ω , o sinal de saída possui metade da potência ou 70,7% da amplitude. Na escala decibel, esta frequência representa -3dB em relação ao sinal original (NILSSON, RIEDEL, 2016).

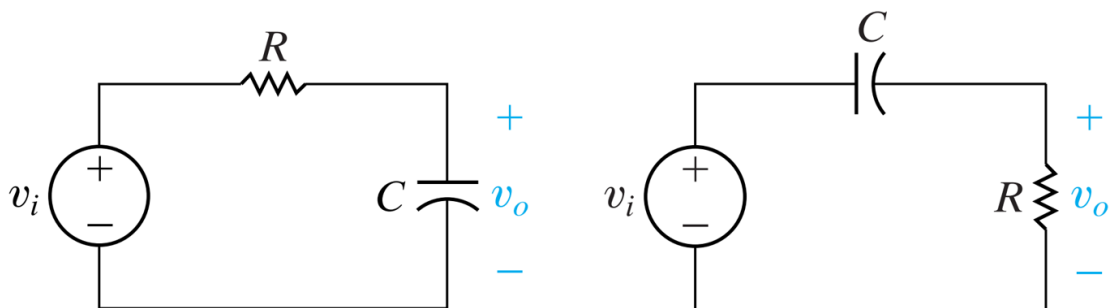
Em um circuito RC/RL, ou seja, circuitos de filtros passa-baixa/passa-alta, esta frequência é dada por:

$$\omega = \frac{R}{L} \text{ ou } \omega = \frac{1}{RC} \quad (1)$$

2.5.2.2 Sinal de saída

Em todos os circuitos passivos, o sinal de saída depende exclusivamente do componente em que o sinal é coletado. Ou seja, em circuitos RC, por exemplo, é possível obter um filtro passa-baixa quando o sinal de saída está entre os terminais do capacitor, enquanto um filtro passa-alta está nos terminais do resistor, como mostra a Figura 16. Isto ocorre devido à impedância variante na frequência característica dos capacitores e à mudança na função de transferência do circuito (NILSSON, RIEDEL, 2016).

Figura 16 – Filtro passa baixa à esquerda e filtro passa alta à direita.



Fonte: Nilsson e Riedel, 2015.

Este efeito também ocorre com o circuito RL, porém de forma invertida, ou seja, o circuito passa-baixa é obtido ao coletar o sinal do resistor, enquanto o passa-alta está nos terminais do indutor. O indutor e o capacitor possuem comportamentos opostos ao longo da faixa de frequência: indutores aumentam sua impedância com o aumento da frequência, enquanto capacitores diminuem (NILSSON, RIEDEL, 2016).

2.5.3 Aplicação dos filtros em circuitos de áudio

Devido às características dos diferentes tipos de instrumentos musicais e dispositivos de captura e reprodução, os filtros são ferramentas importantes em circuitos musicais e de telefonia.

2.5.3.1 Telefonia

Com o avanço dos sistemas digitais de telefonia, as chamadas telefônicas foram limitadas a links de 64kbps e amostragem de 8kHz. Isto ocorreu, pois, a maioria das

peças possuem timbres de voz que estão situados na faixa de 0 a 3,2kHz. Um filtro passa-baixa é implementado para atenuar as frequências mais altas, reduzindo o ruído durante a amostragem e digitalização de voz (NILSSON, RIEDEL, 2016).

2.5.3.2 Sistemas de áudio

Em sistema de som de cinema, palco e, em alguns casos, para uso doméstico e veiculares, os alto-falantes possuem diferentes diâmetros e faixas de reprodução de sons. Isto ocorre, pois, alto-falantes maiores possuem melhor desempenho para reproduzir sons de baixa frequência, os chamados *sub-woffers*, enquanto os menores são melhores para reproduzir médios e agudos, os chamados *woofers* e *tweeters*, respectivamente. Sabendo que o som vem de uma única origem, os filtros passa-baixa, passa-alta e passa-faixa são utilizados para selecionar qual tipo de som vai para cada alto-falante, maximizando o desempenho do conjunto (NILSSON, RIEDEL, 2016).

2.6 Fontes de Alimentação

Uma das partes mais importantes do desenvolvimento de um dispositivo eletrônico é a sua fonte de alimentação. Em sistemas de áudio, isto é especialmente importante não só devido a tensão na carga, que varia constantemente, mas também devido a sua baixa impedância.

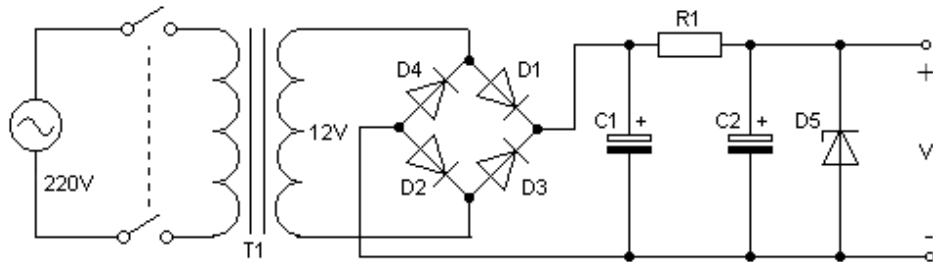
Em geral, de acordo com Self (2007), existem três tipos de fontes de alimentação que são utilizados em sistemas de som:

- Fontes simples não-reguladas
- Fontes reguladas
- Fontes chaveadas

As fontes simples não-reguladas são fontes formadas pelo conjunto de transformador, retificador e capacitores, conforme a Figura 17, para reduzir flutuações de tensão, também chamadas de tensão de *ripple*. Além de serem simples, confiáveis e baratas, possuem boa resposta a picos de corrente e não apresentam interferência de alta frequência. Por outro lado, estas fontes são mais pesadas, possuem apenas uma

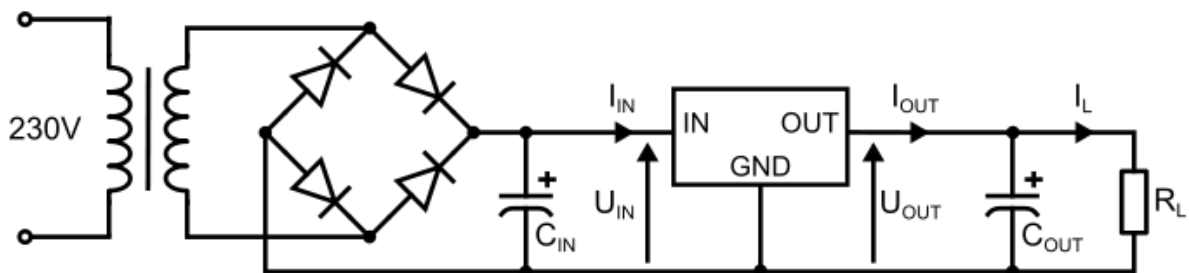
tensão de alimentação da rede e apresentam interferência de baixa frequência, geralmente múltiplo da frequência de alimentação do sistema (SELF, 2007).

Figura 17 – Exemplo de fonte simples não-regulada.



As fontes reguladas são fontes que utilizam circuitos integrados especializados para reduzir a tensão de uma entrada, como mostrado na Figura 18. Este tipo de fonte pode ser considerado como perfeita devido a sua saída ser a mais limpa possível de oscilações, mesmo que estejam presentes na tensão de entrada. Em compensação é um sistema mais caro, que necessita de dissipadores próprios e que não possui alta capacidade de resposta a picos de corrente (SELF, 2007).

Figura 18 – Exemplo de fonte regulada.

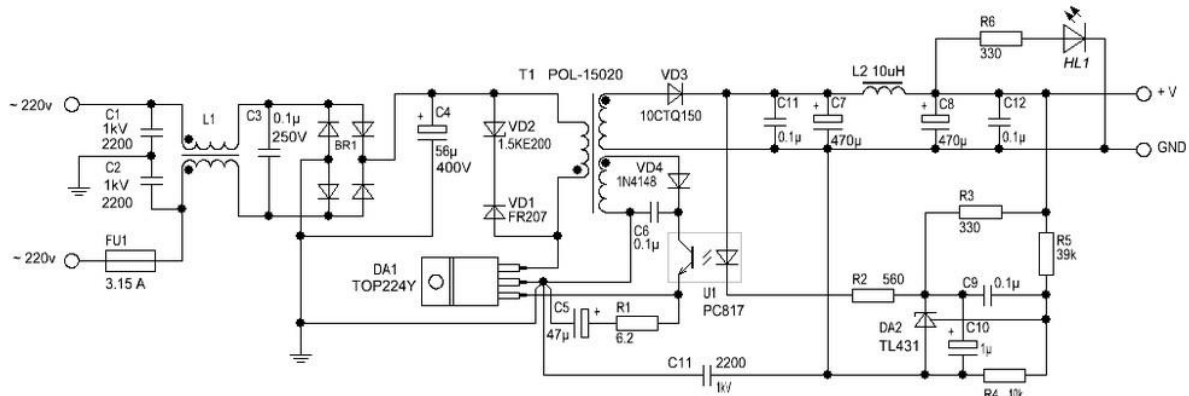


Fonte: Sattel, s.d.

As fontes chaveadas são fontes que utilizam de técnicas avançadas, como a modulação por largura de pulso, para manter uma tensão constante na carga dado uma corrente exigida. São as mais populares nos dias atuais devido a sua baixa perda de potência por calor, pelo seu peso reduzido e por suportar uma ampla faixa de tensão de alimentação. Infelizmente este tipo de fonte insere oscilações de alta e baixa

frequência, além de possuir uma resposta lenta a picos de corrente (SELF, 2007). A Figura 19 mostra um exemplo de esquemático deste tipo de fonte.

Figura 19 – Exemplo de fonte chaveada.



Fonte: Sattel, s.d.

2.7 Metodologias de Análise de Falhas

Para o estudo do comportamento do amplificador de áudio quando em funcionamento anormal, além dos conceitos e teorias de eletrônica já abordados, será empregada a Análise de Modos de Falhas e Efeitos (FMEA), uma ferramenta da engenharia de manutenção que possui como objetivo identificar falhas em um sistema ou produto.

O FMEA é uma ferramenta de análise preditiva de falhas e seus efeitos, ou seja, antes de ocorrer uma falha no equipamento ele é analisado para verificar suas falhas potenciais e assim minimizá-las antes de chegar ao consumidor (SILVA, 2007). Ele pode ser implementado em qualquer fase do projeto de um produto ou sistema, como por exemplo:

- Planejamento, onde você busca falhas potenciais do produto ou processo e corrige durante a fase de projeto;
- Execução, onde são verificados como os efeitos de uma falha em um sistema podem afetar outros;
- Revisão de projeto, onde busca-se aumentar a confiabilidade do produto ou processo ao identificar as falhas a partir de seus efeitos.

Na sua forma mais básica, o FMEA consiste de um formulário, que deve ser preenchido com o auxílio de diversos profissionais, para, de acordo com Toledo e Amaral (2004), identificar:

- Falhas funcionais: o que deixa de funcionar ou funciona de forma irregular;
- Modo de falha: as formas com que o sistema pode falhar para uma certa falha funcional;
- Severidade (S): o quão crítico o efeito é para o produto ou usuário;
- Ocorrência (O): frequência com que a falha ocorre;
- Detecção (D): a probabilidade de o usuário detectar a falha quando ela ocorre;
- Outros tipos de análise, como sintomas da falha, localização e recomendações.

A ocorrência, o efeito e a severidade são valores numéricos que combinados em forma de produto geram o coeficiente de Risco. Com este coeficiente é possível priorizar falhas em relação a outras e tratá-las primeiro (SILVA, 2007). Um exemplo de formulário de FMEA simplificado é mostrado na Figura 20:

Figura 20 – Exemplo de formulário de aplicação do FMEA

Análise do Tipo e Efeito de Falha									
Cod_pec:									
Nome da Peça:									
Data:									
Folha No. _____ de _____									
Descrição do Produto/ Processo	Função(ões) do produto	Tipo de Falha Potencial	Efeito de Falha Potencial	Causa da Falha em Potencial	Controles Atuais	Índices Atuais			
						S	O	D	R

Fonte: Toledo e Amaral, s.d.

Nota: Adaptado pelo Autor.

Esta ferramenta é adequada para implementar um ou mais ciclos de melhoria contínua, ou seja, realizar ações proativas para identificar falhas antes de

acontecerem. Um exemplo prático é a troca de pneus em carros que, se feita de maneira antecipada, evita a falta de aderência do veículo na estrada e pode evitar acidentes.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

3.1 Escolha de um Circuito de Referência

3.1.1 Motivação

Para a realização deste projeto foi necessário a escolha de um circuito de áudio de referência, inicialmente para obter um áudio limpo com ele, e depois adicionar variações defeituosas deste circuito para mostrar seus efeitos aos usuários do protótipo. Assim, quem tiver acesso ao equipamento verá como ele deverá funcionar, ao mesmo tempo que tem a oportunidade de conhecer comportamentos indesejados.

3.1.2 Parâmetros de Escolha

Para a pesquisa e a escolha do circuito final foram adotados os seguintes parâmetros:

- Possibilidade de inserir defeitos sem alterar drasticamente a estrutura principal do amplificador;
- Baixa quantidade de componentes;
- Tensão e potência abaixo do limite de uma fonte de bancada de laboratório;
- Possibilidade de modularização.

Estes parâmetros foram escolhidos principalmente devido às limitações de prazo e custo do projeto. Além disto, por ser um projeto de hardware aberto, deve-se haver a possibilidade de replicação, manutenção e modificação por futuros usuários.

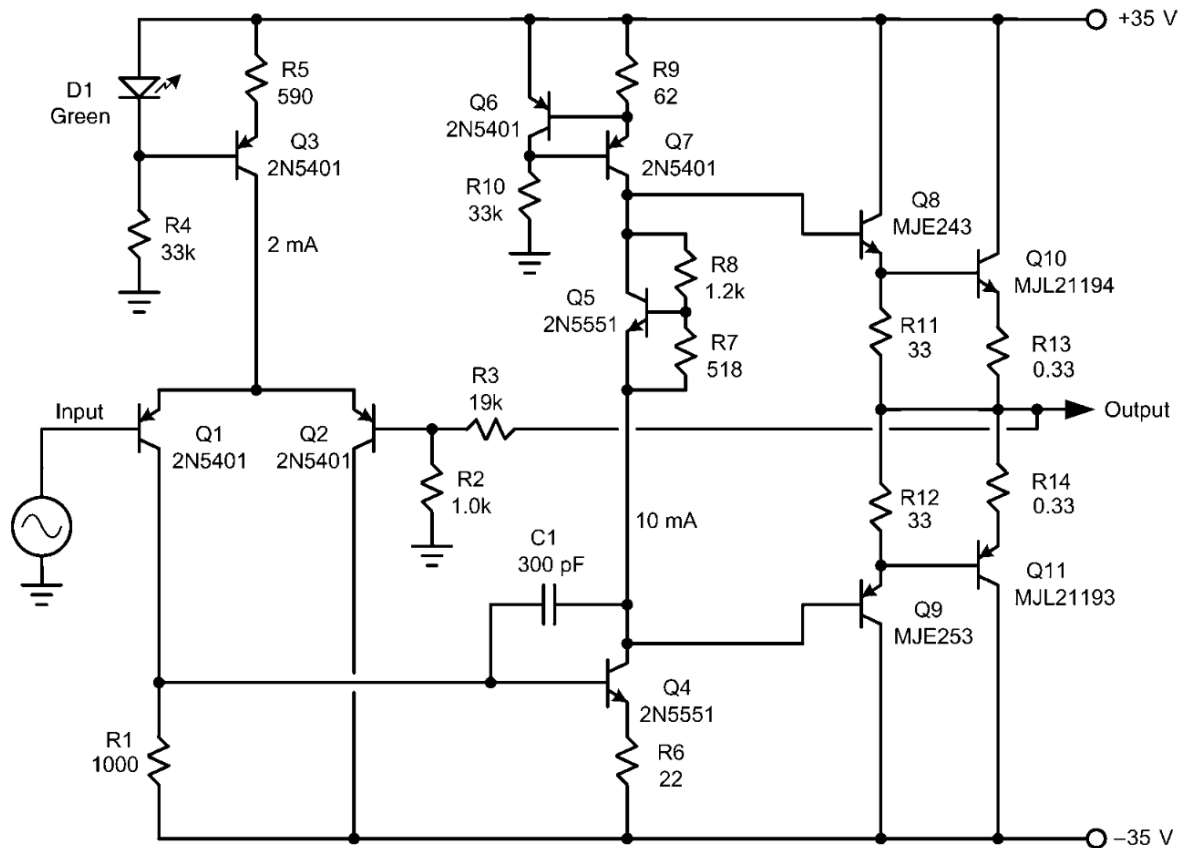
3.1.3 Circuitos pesquisados

No geral foram pesquisados circuitos compostos por transistores discretos e também circuitos integrados.

A maioria dos circuitos do primeiro tipo possuíam uma característica em comum: eram compostos por uma grande quantidade de componentes. Isto ocorre pois, neste tipo de circuito é necessário montar cada estrutura dos amplificadores básicos que compõem um amplificador de áudio de forma individual. Um exemplo deste tipo de

circuito é mostrado na Figura 21, onde são necessários 11 transistores para a montagem do amplificador de áudio.

Figura 21 – Exemplo de amplificador de áudio utilizando apenas transistores, resistores, capacitores e um diodo.



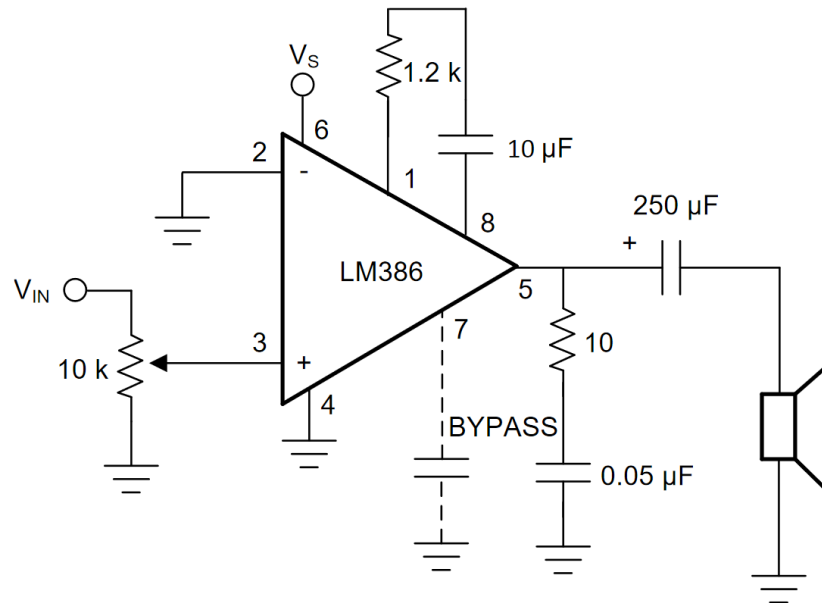
Fonte: Cordell, 2010.

Em relação aos circuitos baseados em chips, um ponto importante é o aquecimento. Como as estruturas possuem tamanho muito pequeno, e o ganho pode ser elevado, isto implica em uma grande circulação de corrente dentro do chip, variando de acordo com a impedância do alto-falante escolhido. Muitos chips amplificadores de áudio exigem, em seu datasheet, o uso de dissipadores térmicos para o correto funcionamento (TEXAS INSTRUMENTS, 2004; STMICROELECTRONICS, 1998).

Uma opção encontrada foi o LM386, fabricado pela Texas Instruments. Este chip é de baixo custo, exige poucos componentes externos para um funcionamento adequado e, mesmo sendo um chip antigo, ainda está disponível no mercado. Por estes fatores, é um elemento de hardware muito conhecido e amplamente dominado, possuindo

diversos circuitos desenvolvidos utilizando-o como base. Devido a estes fatores citados, o circuito integrado LM386 foi o escolhido para servir de base para o protótipo. A Figura 22 mostra um exemplo de circuito amplificador de áudio que pode ser montado com este chip.

Figura 22 – Exemplo de circuito amplificador de áudio utilizando o LM386.



Fonte: Texas Instruments, 2017.

3.1.4 O Circuito Integrado LM386

O chip LM386, atualmente fabricado pela Texas Instruments, é um amplificador de áudio de baixa tensão, baixa potência e baixo custo, sendo muito utilizado por *hobbyistas* para aplicações simples e alguns músicos para amplificadores de instrumentos, mas também pode ser utilizado para acionar servomotores de baixa potência e conversores de potência (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

Com sua primeira revisão lançada em 2004, este chip é capaz de amplificar apenas um canal de áudio, ou seja, é um amplificador mono, sendo necessário dois deles para ter um sistema de áudio de dois canais, conhecido como estéreo (TEXAS INSTRUMENTS, 2017). Porém existem datasheets de versões de outros fabricantes desde a década de 70, sem grandes alterações de características e funcionamento

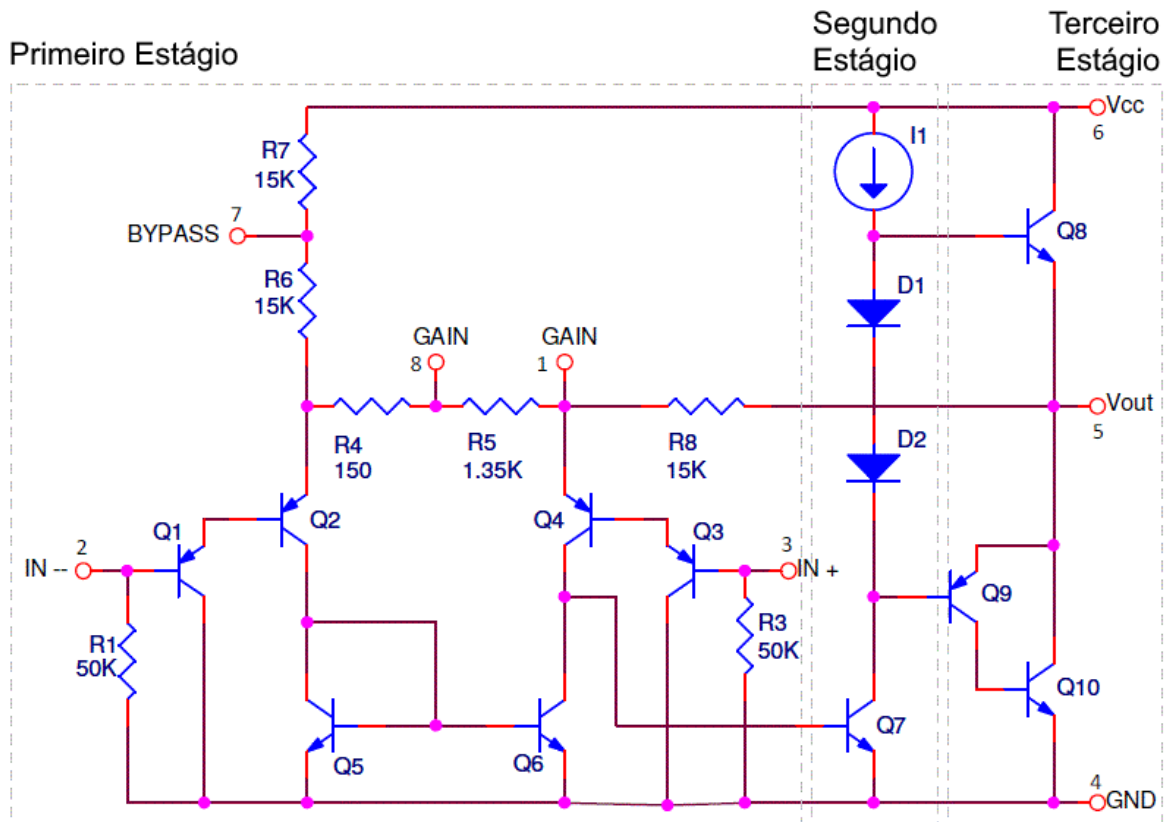
(JRC, 197x). Na revisão LM386M-1 suas características elétricas, conforme datasheet (TEXAS INSTRUMENTS, 2017), incluem:

- Tensão de Operação: 4 a 12V;
- Ganho de tensão: 20 a 200;
- Potência de 730mW;
- Suporte para alto-falantes de, no mínimo, 4Ω;
- Largura de banda máxima de 300 kHz e
- Distorção harmônica total mínima de 0,2%, podendo chegar a 10% a depender do volume, da tensão de alimentação e da frequência do áudio.

3.1.5 O Circuito Interno do LM386

Assim como outros amplificadores de áudio, o circuito interno do LM386 possui estrutura interna que segue o modelo de Amplificador de três estágios, mostrado na Seção 2.4, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Circuito interno do LM386, separado por estágios de amplificação.



Fonte: ElectroSmash, s.d.

Nota: Adaptado pelo Autor.

Não serão abordados os cálculos de cada etapa de funcionamento deste chip pois a ElectroSmash (s.d.) já o realizou de forma detalhada. Apesar disto, é importante mencionar que ele não possui um capacitor no seu segundo estágio, diferenciando-se do modelo de amplificador de três estágios mostrado na Figura 10, o que faz diminuir a sua estabilidade e aumentar a presença de ruído no sistema.

3.1.6 Os pinos do LM386 e suas Funções

O circuito integrado LM386 é vendido em um encapsulamento com oito pinos, sendo estes, de acordo com Texas Instruments (2017):

1. Pino de ajuste do Ganho;
2. Entrada inversora;
3. Entrada não inversora;
4. Referência elétrica do circuito;
5. Saída de alto-falante;
6. Alimentação do circuito;
7. Pino de desacoplamento da fonte de alimentação, ou pino de Bypass;
8. Pino de ajuste do ganho.

Os pinos 1 e 8 são responsáveis pelo controle do ganho. Por padrão, este ganho é de 20 V/V (26 dB), porém ao inserir um capacitor de 10 μ F este ganho atinge o valor de 200 V/V (46 dB), sendo o máximo suportado por este chip. É possível inserir um resistor ou potenciômetro em série com o capacitor para realizar um controle de ganho entre 20 e 200 (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

Os pinos 2 e 3 são os pinos ligados entrada diferencial presente no primeiro estágio de amplificação do chip. O pino 3 é responsável pela entrada do sinal de áudio a ser amplificado enquanto o pino 2 é ligado ao terra do circuito a fim de captar o ruído comum da fonte de áudio, possuindo a função de reduzir parte do ruído. Para ajustar o volume do som pode-se inserir um potenciômetro para realizar a divisão de tensão do sinal de entrada, e é recomendável inserir um capacitor em série com o pino 3 para filtrar a tensão constante que pode estar presente (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

O pino 5 representa a saída do circuito integrado, ou seja, a ligação do estágio de saída do amplificador com o alto-falante. Devido à falta de alimentação simétrica do chip, é necessário adicionar um capacitor para filtrar a tensão de *offset* presente e assim evitar que o alto-falante queime por aquecimento. Um capacitor e um resistor geralmente são ligados entre o pino 5 e o terra do circuito para filtrar sinais indesejados de alta frequência, evitando a sua reprodução no alto-falante. O pino 7, também conhecido como pino de *bypass*, possui a função de desacoplar a fonte do restante do circuito, aumentando a capacidade de rejeição ao ruído proveniente da fonte de alimentação (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

Os pinos 4 e 6 são os pinos de alimentação do LM386, onde o 6 é responsável pela alimentação e o 4 pelo terra do circuito. Recomenda-se inserir filtros de baixa e alta frequência na alimentação do circuito para evitar com que frequências indesejadas da fonte sejam amplificadas, conforme mostrado na Seção 2.6.

3.2 Busca pelo Circuito de Referência utilizando o LM386

3.2.1 Objetivos e Metodologia

O circuito de referência, que deve ser definido antes de realizar os protótipos e análises, é um circuito capaz de reproduzir áudio a partir de uma fonte externa com o mínimo de distorção e volume suficiente para ser escutado. Em outras palavras, o circuito deve coletar o sinal de saída de um dispositivo reproduzidor de áudio, como um computador, possibilitar o controle de volume de entrada e reproduzir este sinal em um alto-falante conectado ao circuito.

Para o circuito integrado LM386, o seu fabricante disponibiliza diversos esquemáticos de circuitos na seção 9 de sua folha de dados que servem como base para a implementação em diversas aplicações (TEXAS INSTRUMENTS, 2017). Dentre as aplicações de áudio, o documento cita quatro implementações típicas: LM386 com ganho de 20, LM386 com ganho de 200, LM386 com ganho de 50 e LM386 com amplificação de graves. Todos estes circuitos podem ser alimentados entre 5 a 12 V de tensão e suportam alto-falantes de 4 a 32 Ω (TEXAS INSTRUMENTS, 2017). Além

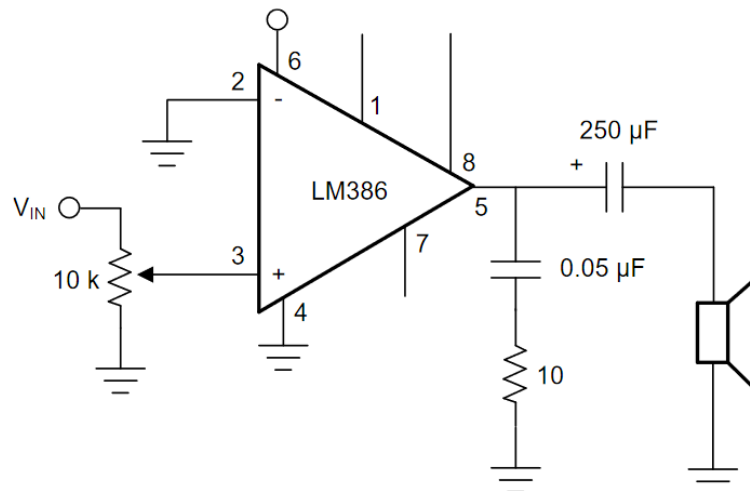
destes, também foi testado o circuito amplificador de áudio LM386 de ótimo som, disponibilizado por Campbell (2015).

Para todas as implementações realizadas foram utilizados uma fonte chaveada de tomada com 12 V de tensão e capacidade de corrente de saída de 1 A e alto-falantes de 8 Ω , dentro do especificado no parágrafo anterior. Para os testes, foram reproduzidas músicas disponíveis gratuitamente na internet.

3.2.2 Testes com os esquemáticos da Folha de Dados do LM386

Inicialmente o circuito LM386 com ganho de 20 V/V foi montado, conforme esquemático mostrado na Figura 24, em uma placa de prototipagem. Este circuito obteve bom resultado com volume de saída muito baixo, porém ao aumentar o volume foi possível perceber uma grande quantidade de ruído, não sendo possível identificar a música.

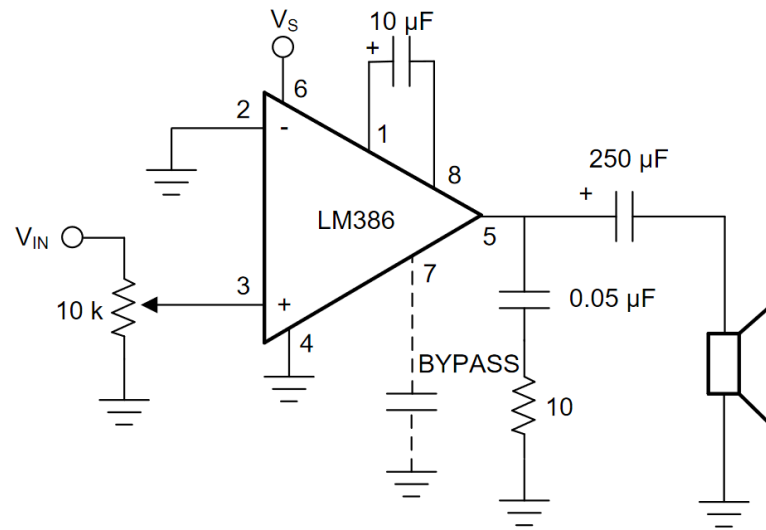
Figura 24 – Circuito LM386 com ganho de 20.



Fonte: Texas Instruments, 2017.

Após esta montagem, foi construído o circuito LM386 com ganho de 200 V/V. A diferença entre os dois circuitos montados é a adição de um capacitor entre os pinos 1 e 8 e o capacitor entre o pino 7 e a referência elétrica. O primeiro capacitor aumentou o volume de saída consideravelmente para um mesmo volume de entrada, mostrando que o ganho, de fato, aumentou, enquanto o segundo capacitor reduziu a quantidade de ruído da fonte, porém ainda havia bastante ruído na saída, não sendo possível distinguir o ruído da música. A Figura 25 mostra o esquemático deste circuito

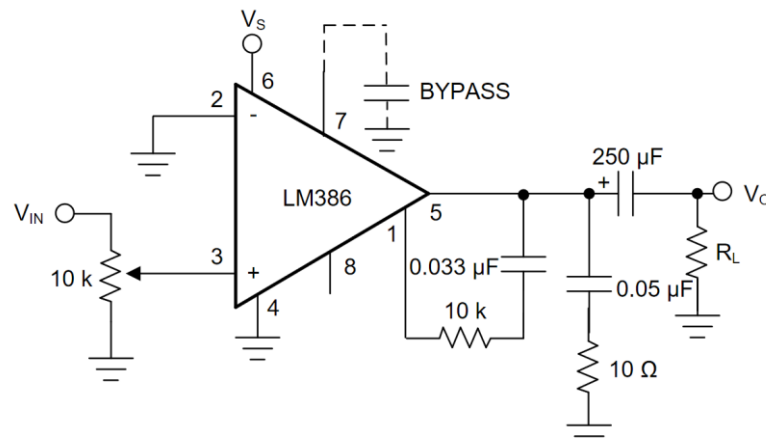
Figura 25 – Circuito LM386 com ganho de 200.



Fonte: Texas Instruments, 2017.

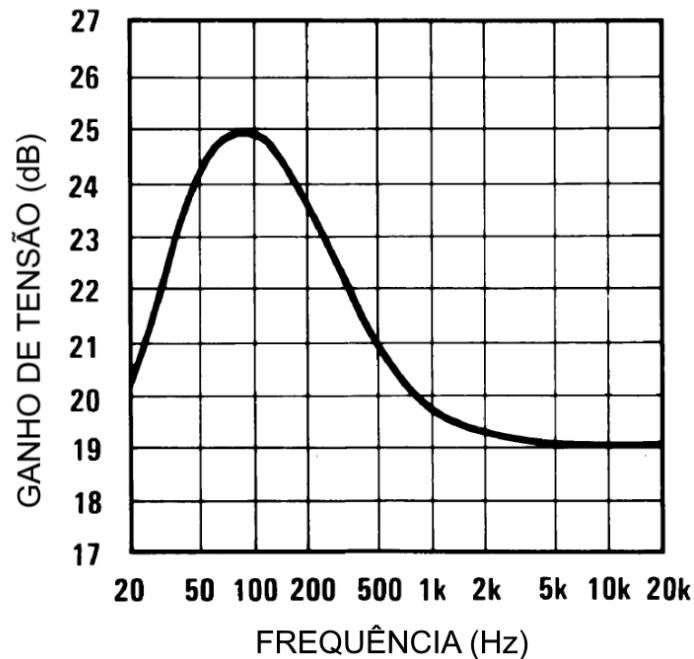
Ao final, o circuito montado foi o circuito LM386 com amplificação de graves, conforme esquemático da Figura 26. A diferença deste para o circuito inicial é uma malha de realimentação, composta por um resistor e um capacitor, além do capacitor entre o pino 7 e a referência elétrica. Houve uma diferença na resposta em frequência no circuito, onde os sons médios e agudos claramente estavam com volume reduzido quando comparado a antes, conforme resposta em frequência mostrada na Figura 27, enquanto os sons graves comportavam-se de maneira semelhante. A saída ainda estava ruidosa, porém agora era possível identificar vozes e alguns instrumentos.

Figura 26 – Circuito LM386 com aumento de graves.



Fonte: Texas Instruments, 2017.

Figura 27 - Resposta em frequência do circuito LM386 com aumento de graves.



Fonte: Texas Instruments, 2017.

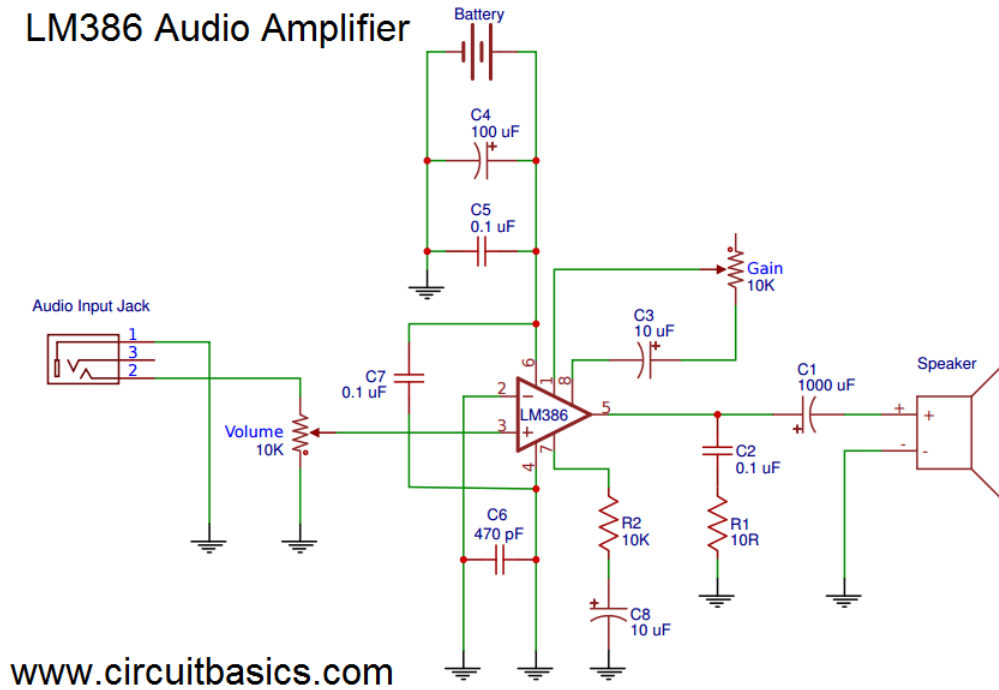
Nota: Adaptado pelo autor.

Importante citar que alguns valores de capacitor não são comerciais, sendo necessário utilizar valores próximos disponíveis.

3.2.3 Testes com o circuito disponibilizado por Campbell

Após os testes anteriores, o circuito amplificador de áudio LM386 de ótimo som foi montado na placa de prototipagem para testes, conforme esquemático da Figura 28. Originalmente este circuito foi desenvolvido para ser alimentado via bateria de 9 V, porém a alimentação dos circuitos anteriores será mantida aqui. O potenciômetro de ganho não será utilizado aqui, sendo o circuito restrito ao ganho máximo conforme o circuito LM386 com ganho de 200 V/V. O circuito não teve distorções de áudio para volumes de saída altos e nem ruídos perceptíveis, sendo um ótimo circuito para a reprodução de sons.

Figura 28 – Circuito amplificador de áudio LM386 de ótimo som.

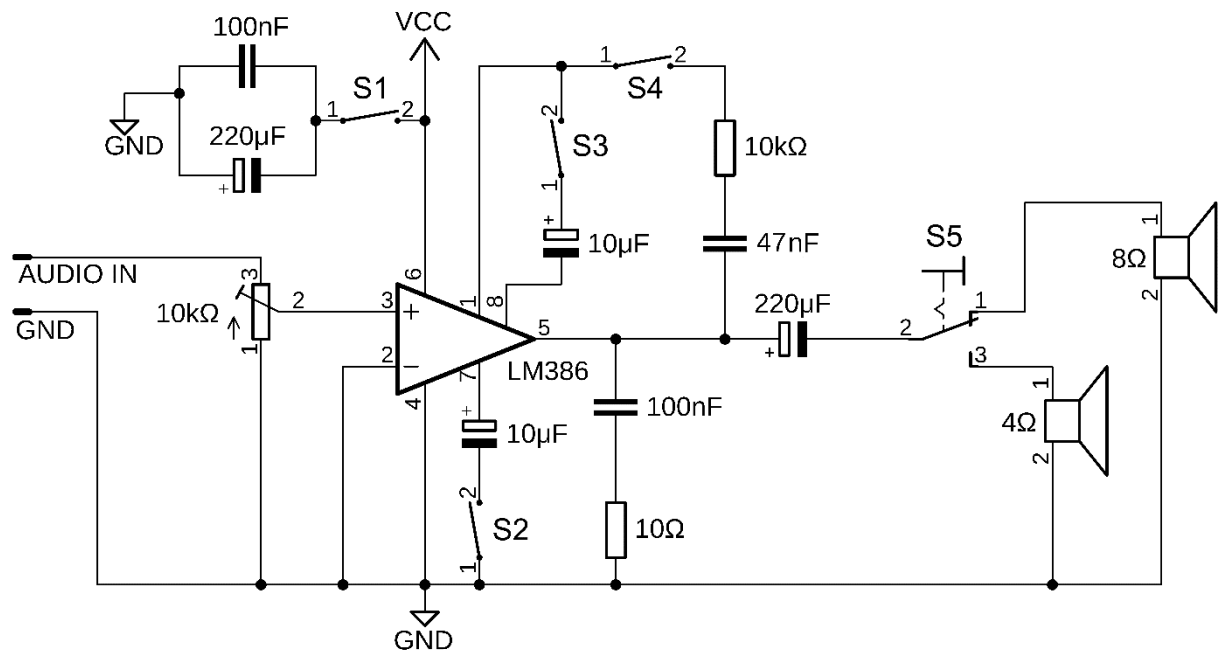


Fonte: Campbell, 2015.

3.2.4 Circuito Definitivo

Após os diversos testes com os circuitos estudados na seção anterior, concluiu-se que o melhor circuito a ser montado é um circuito capaz de combinar a clareza de som do circuito disponibilizado por Campbell (2015) com as mudanças de efeitos proporcionados pelos circuitos da folha de dados da Texas Instruments (2017). A Figura 29 mostra o esquemático da combinação dos circuitos.

Figura 29 – Esquemático escolhido para a montagem do protótipo



Fonte: Produção do próprio autor.

Importante citar que as diversas chaves no circuito servem para realizar a seleção de qual circuito será analisado, podendo variar entre o mais ou menos ruidoso, o com maior ou menor amplificação e o que possui resposta em frequência natural ou modificada. Outro diferencial do circuito escolhido é a possibilidade de escolha entre dois alto-falantes de diferentes impedâncias. Com isto será possível verificar não só como a potência varia entre dois alto-falantes, mas também como as características físicas de um alto-falante podem influenciar no som.

3.3 Implementação do Protótipo

Para a implementação do circuito da Figura 29 na prática, foram utilizados os seguintes materiais:

- Um resistor de 10 Ω , 1/8 W;
- Um resistor de 1 k Ω , 1/8 W;
- Um potenciômetro de 10 k Ω ;
- Dois capacitores eletrolíticos de 10 μ F, 25 V;
- Dois capacitores eletrolíticos de 220 μ F, 25 V;
- Um capacitor cerâmico de 47 nF, 50 V;
- Dois capacitores cerâmicos de 100 nF, 50 V;

- Quatro chaves mecânicas do tipo liga-desliga;
- Uma chave mecânica do tipo liga-desliga-liga;
- Um circuito integrado LM386;
- Um plugue P2 fêmea;
- Um alto-falante de 8 Ω , 1 W;
- Um alto-falante de 4 Ω , 5 W;
- Uma fonte de alimentação chaveada de 12 V, 1 A, *bivolt*;
- Uma placa de fenolite perfurada 10 x 5 cm;
- Quatro conectores do tipo borne;
- Uma caixa de papelão;
- Uma placa de madeira;
- Outros tipos de materiais consumíveis, como cola quente, estanho e fios.

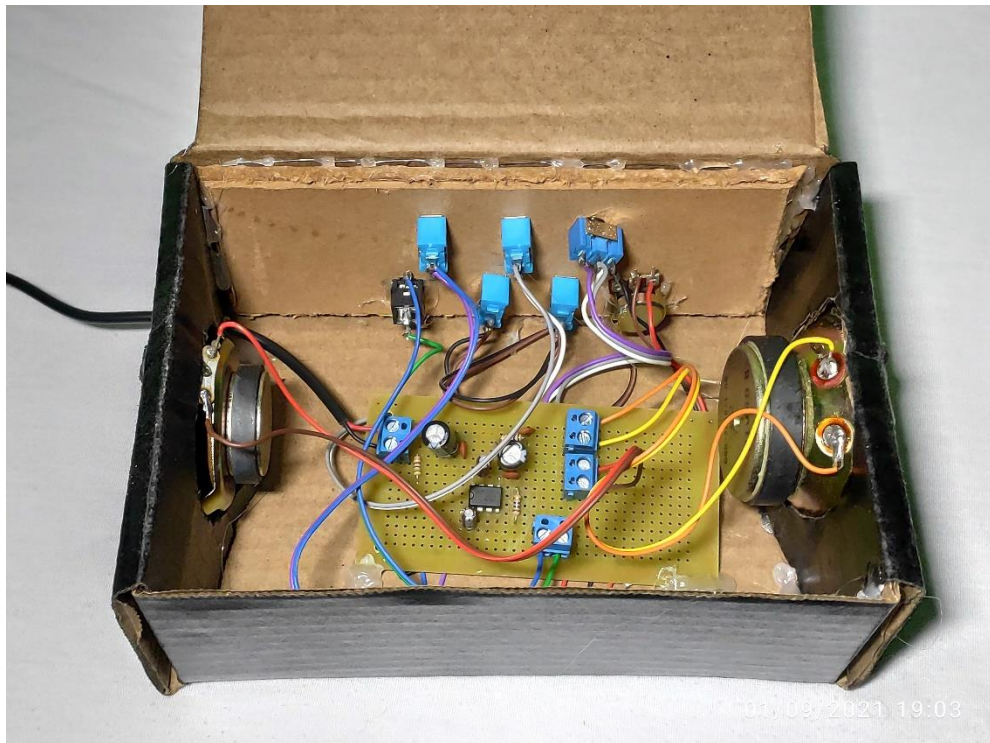
Com os componentes eletrônicos o circuito foi implementado, enquanto a caixa de papelão e a placa de madeira serviram para abrigar e posicionar os componentes utilizados, além de proporcionar rigidez ao protótipo. A Figura 30 mostra a face do protótipo onde está posicionado o painel de controle, enquanto a Figura 31 mostra o interior do protótipo e seus componentes.

Figura 30 - Painel de controle do protótipo.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 31 - Circuito interno do protótipo.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Conforme citado na seção 3.2.4, o protótipo possui dois alto-falantes com duas impedâncias diferentes, entretanto a construção deles é diferente. O alto-falante direito da figura 30, com impedância de 4Ω , mostrado na Figura 32, se diferencia do alto-falante esquerdo, de 8Ω de impedância, como mostra a Figura 33, por possuir suspensão emborrachada e macia, proporcionando maior movimento do cone e, com isto, melhorando a reprodução dos sons mais graves. Em compensação, o alto-falante mais duro possui maior volume de reprodução e assim trabalha melhor com frequências médias e agudas.

Figura 32 – Alto-falante direito do protótipo.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 33 – Alto-falante esquerdo do protótipo.

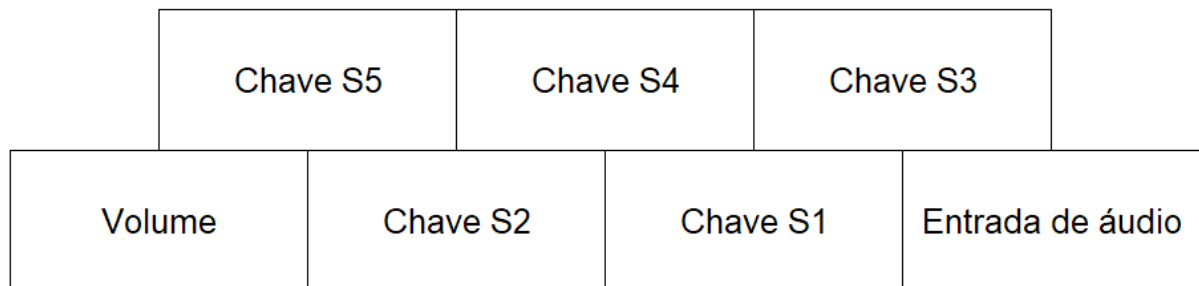


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.4 Utilização do protótipo

O protótipo pode ser controlado a partir de sua face frontal, onde estão posicionadas suas chaves, seu potenciômetro e sua entrada de áudio. A Figura 34 mostra como estão dispostos estes componentes e sua representação no circuito eletrônico.

Figura 34 - Posicionamento dos elementos no painel frontal do protótipo.



Fonte: Produção do próprio autor.

As chaves S1, S2, S3 e S4 estão ligadas quando a chave mecânica aponta para cima, e desligadas quando aponta para baixo. A chave S5 está desligada quando centralizada, e liga o alto-falante referente ao lado em que a chave mecânica aponta,

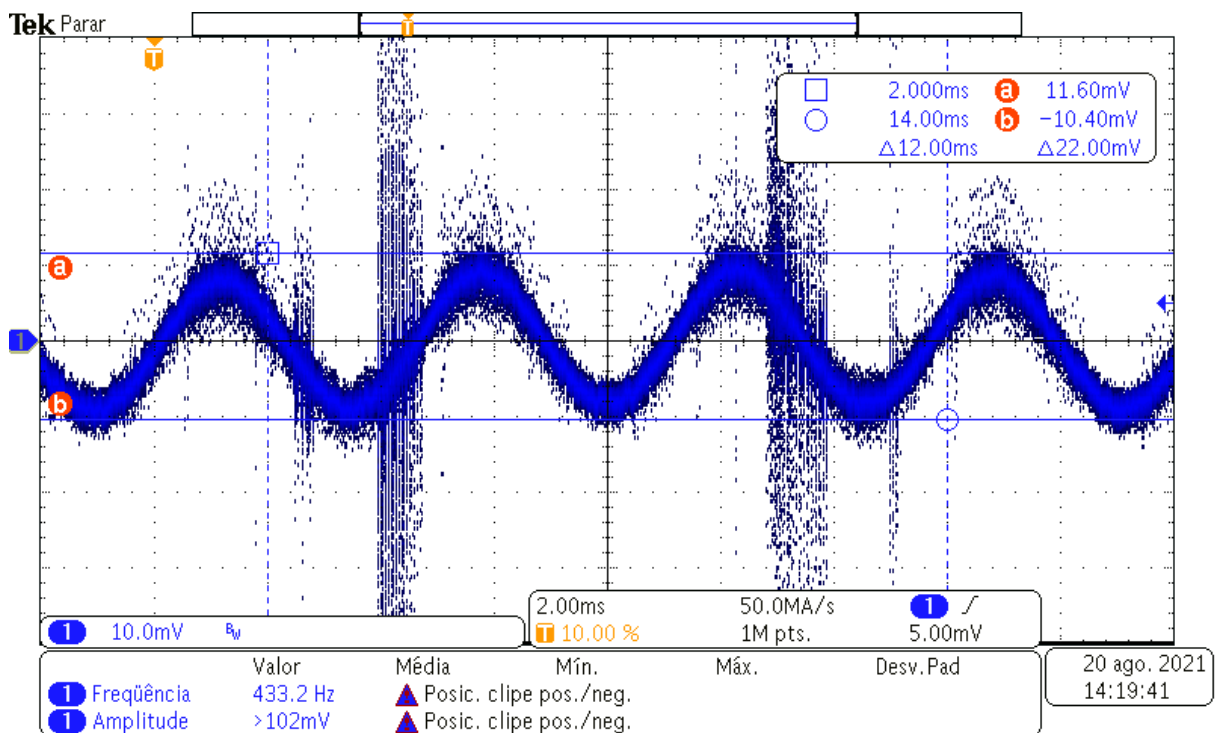
ou seja, apontado para a direita liga o alto-falante direito e apontado para a esquerda liga o alto-falante esquerdo. O potenciômetro controla o volume no sentido horário, aumentando a intensidade de entrada do sinal de acordo com que gira para a direita. A entrada de áudio serve para realizar a conexão do circuito com um aparelho capaz de enviar sinais de áudio utilizando uma conexão P2.

4 ANÁLISE DO PROTÓTIPO

4.1 Análise dos Efeitos

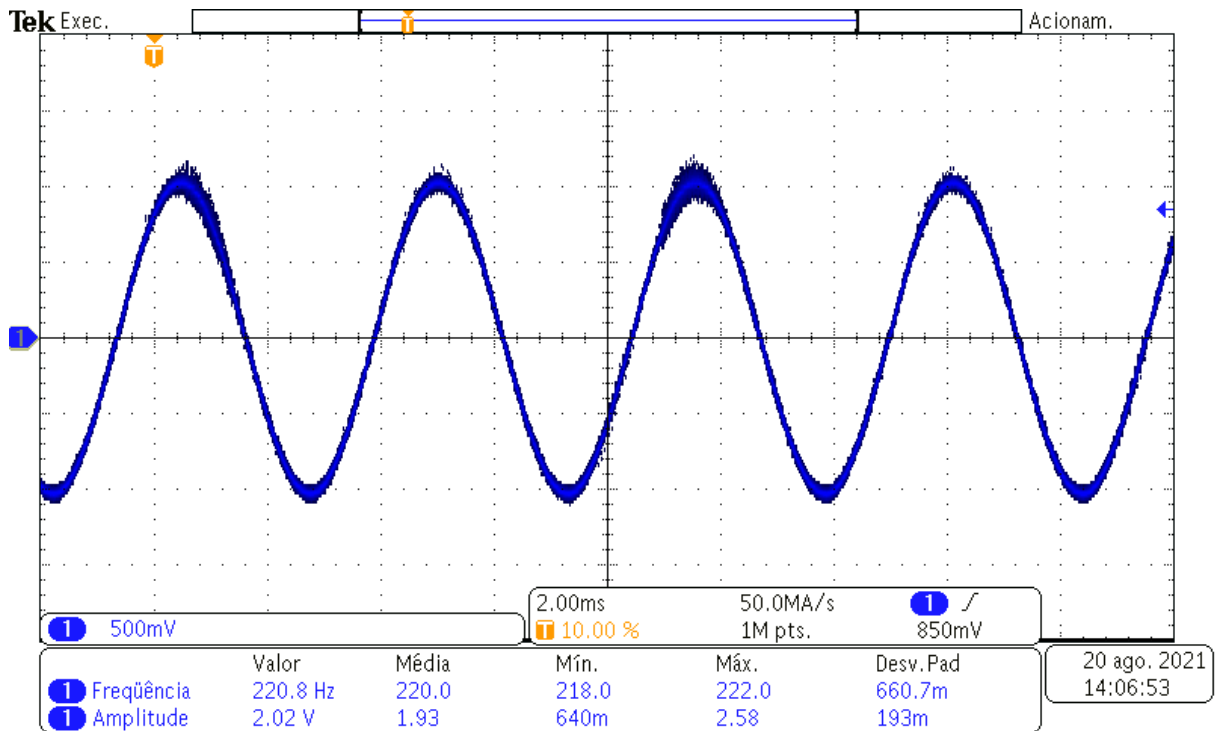
Uma vez implementado o circuito eletrônico é possível obter conclusões em relação a suas modificações e efeitos. Para isto, foi utilizado um sinal de entrada padronizado em 220 Hz e aproximadamente 20 mV, utilizando para isto um gerador de sinais disponível gratuitamente na internet, reproduzindo o seu sinal a partir da saída de som de um computador (SZYNALSKI, 2021). A Figura 35 mostra o sinal de entrada, ou seja, o sinal gerado pela ferramenta online, enquanto a Figura 36 mostra o sinal de saída normal após a amplificação pelo circuito, ou seja, a tensão no alto-falante.

Figura 35 – Sinal de entrada do circuito.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 36 – Sinal de saída do circuito.



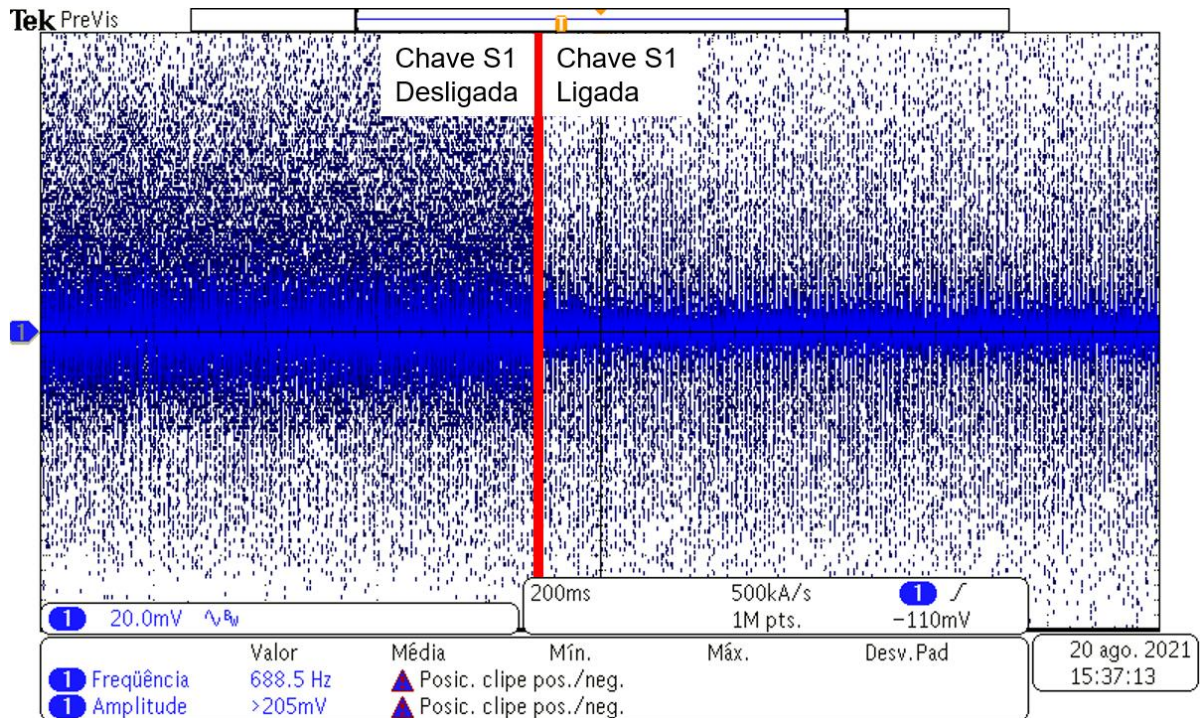
Fonte: Produção do próprio autor.

Importante citar que todas as comparações da seção 4.1 são referenciadas à Figura 36, que é a resposta esperada do circuito com todas as chaves ligadas, e utilizaram como entrada o sinal da Figura 35.

4.1.1 Chaves S1 e S2 – Ruído no Alto-Falante

A chave S1 é responsável por implementar um filtro na fonte para reduzir a quantidade de interferências externas. Como a fonte é do tipo chaveada, há uma grande quantidade de sinais de alta frequência que podem ser amplificadas indevidamente, resultando em ruído constante na saída do áudio. A Figura 37 mostra como o sinal variável, ou seja, utilizando acoplamento AC no osciloscópio, possui uma grande redução de energia ao adicionar os capacitores ao circuito.

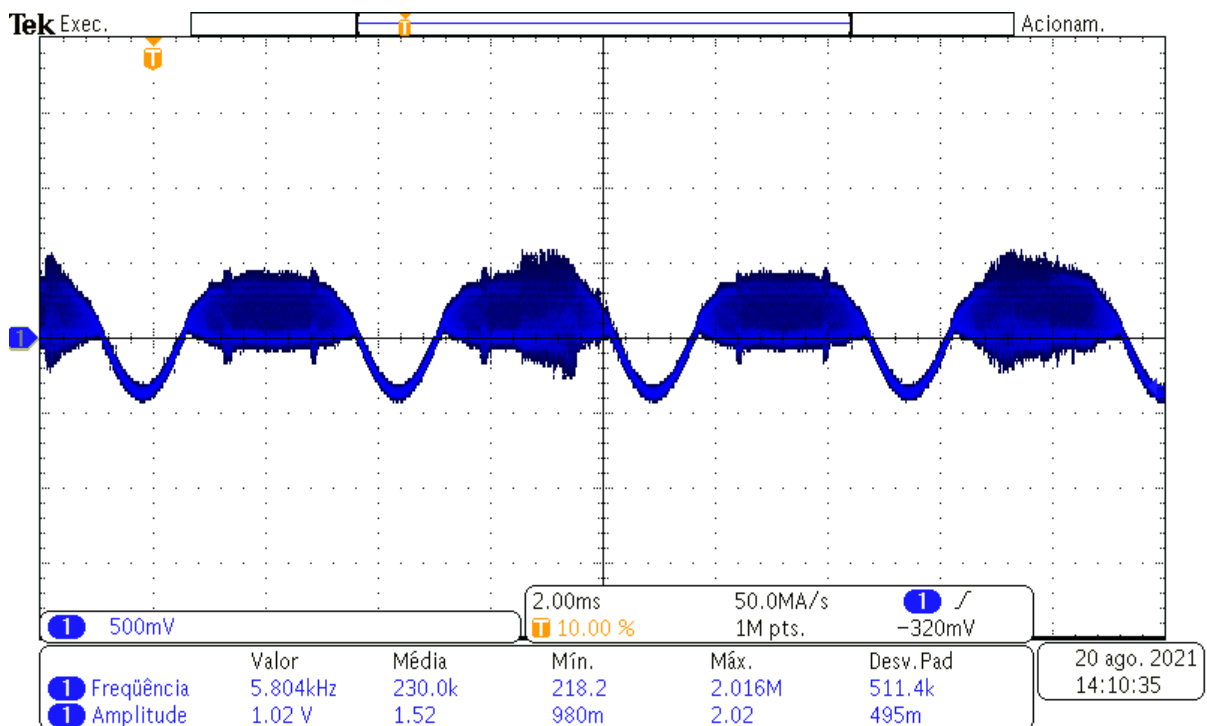
Figura 37 – Demonstração da redução de ruído ao acionar a chave S1 do circuito.



Fonte: Produção do próprio autor.

Com os capacitores fora do circuito, o sinal de saída possui uma grande quantidade de distorção, perdendo a sua característica senoidal, como mostra a Figura 38.

Figura 38 – Saída do amplificador com a chave S1 desligada.



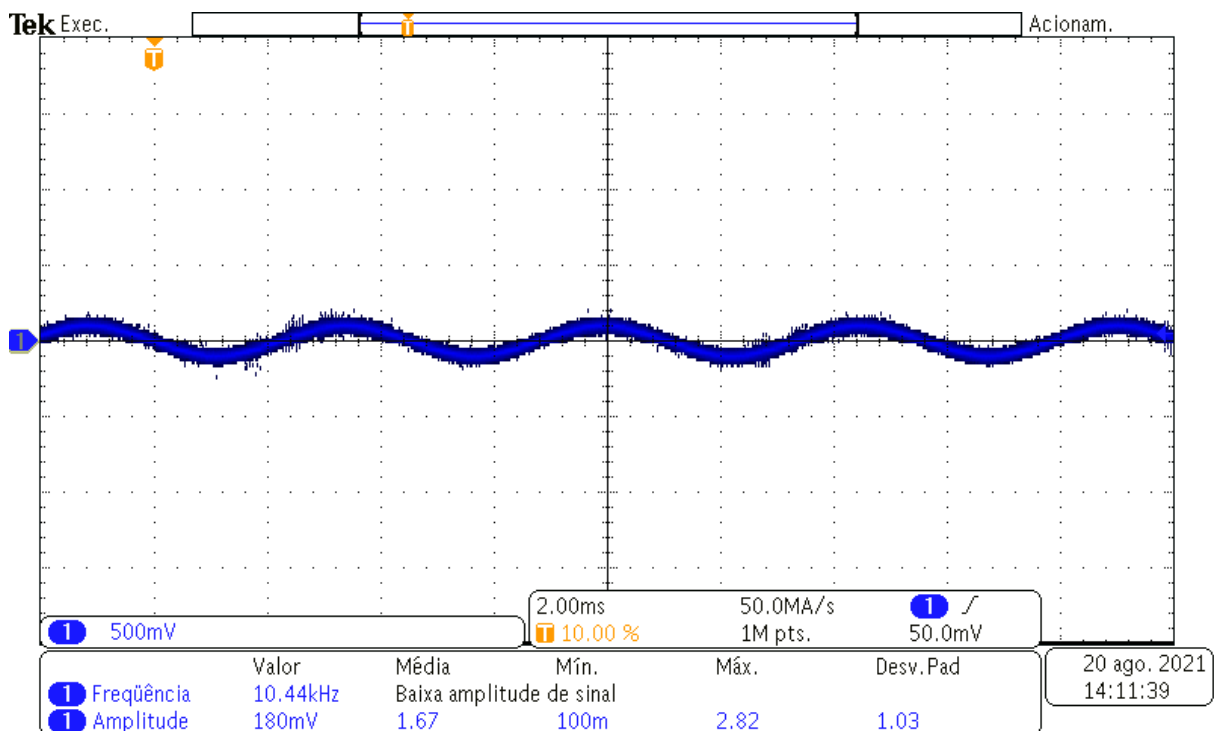
Fonte: Produção do próprio autor.

A chave S2, responsável por ligar o capacitor entre o pino 7 e a referência elétrica, também possui como função alterar a quantidade de ruído no circuito, porém para sinais com frequência constante, como o utilizado nos testes, não foi possível identificar alterações no osciloscópio e no som, ou seja, o efeito do chaveamento deste pino só ocorre quando há um sinal rico de frequências e amplitudes, como músicas.

4.1.2 Chave S3 – Ganho do Sinal de Entrada

A chave S3 é responsável por habilitar o capacitor responsável pelo ganho. Quando a chave está ligada, o circuito possui ganho de tensão de 200 vezes, conforme o circuito LM386 com ganho de 200, descrito na Seção 3.2.2, enquanto a chave desligada representa um circuito com ganho de apenas 20 vezes. Em outras palavras, remover o capacitor do circuito representa uma perda de 10 vezes na tensão de saída, ou 20 dB, como mostra a Figura 39. Há uma perda notável de volume no alto-falante.

Figura 39 – Saída do amplificador com a chave S3 desligada.



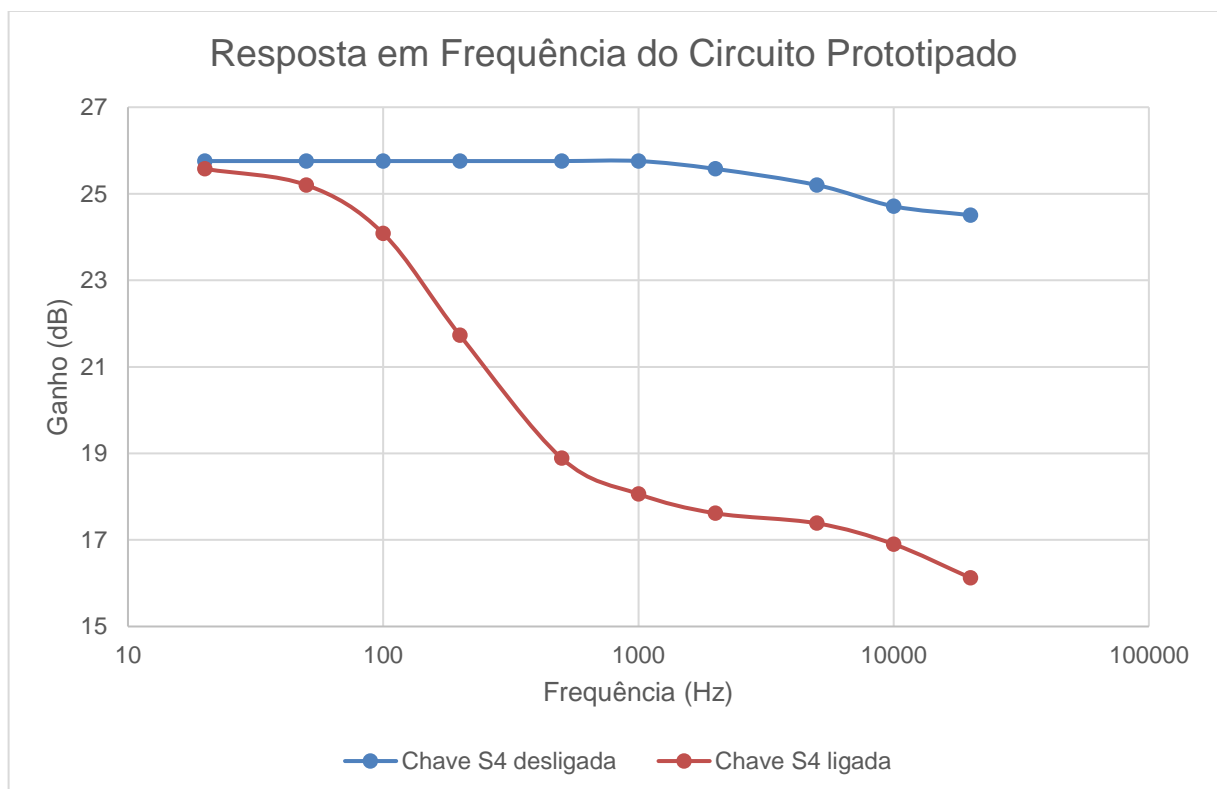
Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.3 Chave S4 – Alteração da Resposta em Frequência

A chave S4 é responsável por ligar o circuito de realimentação de sinal, composto por um capacitor e um resistor que atuam como filtro passa-baixa. Este efeito é pouco

perceptível para uma frequência fixa, porém ao variar a frequência, preservando a amplitude na entrada do sinal, ou ligar uma música, é possível perceber os efeitos da resposta em frequência alterada, ou seja, sinais com frequências mais altas possuem amplitude reduzida quando comparados a sinais com frequência mais baixa. Este efeito é previsto na descrição do circuito LM386 com amplificação de graves, descrito na Seção 3.2.2. A resposta em frequência do circuito original e do circuito sem realimentação pode ser vista na Figura 40.

Figura 40 – Gráfico da resposta em frequência do circuito.



Fonte: Produção do próprio autor.

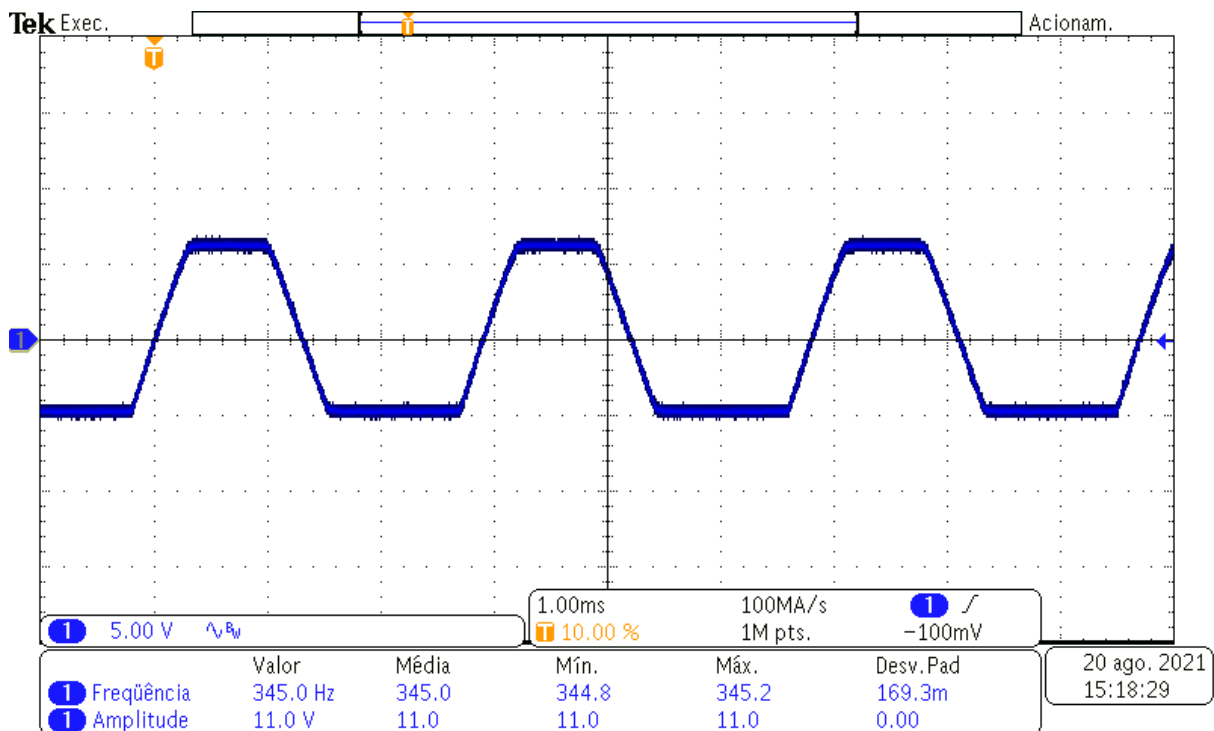
Importante comentar que a resposta em frequência obtida neste circuito é diferente da resposta em frequência descrita na Seção 3.2.2 pois os valores de componentes utilizados são diferentes.

4.1.4 Potenciômetro – Distorção do Sinal de Saída

No circuito analisado o potenciômetro é o elemento responsável por controlar a amplitude do sinal de entrada, porém há um limite para o ganho de tensão que o circuito pode fornecer, que está relacionado com o sinal de saída, que não pode ser

superior a tensão da fonte menos a queda de tensão interna do circuito. Caso isto ocorra, o sinal de saída é ceifado, ou seja, uma parte do sinal é planificada no limite da tensão. A Figura 41 mostra um sinal ceifado, obtido quando a amplitude de entrada foi muito alta.

Figura 41 – Sinal de saída distorcido.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o protótipo criado há dois limites de tensão, dependendo do estado da chave S3, pois o ganho pode ser de 200 ou 20. No primeiro caso a amplitude máxima de entrada foi de 44,4 mV, e para o segundo caso foi de 484 mV. Estes resultados foram obtidos ao observar a saída, mover o potenciômetro de forma a aumentar o sinal de entrada e saída e parar assim que a primeira distorção for identificada.

4.2 FMEA do Circuito Implementado

Após a análise do funcionamento do circuito foi possível determinar com clareza quais os seus modos de falha, seus efeitos, suas causas e estimar a severidade, a ocorrência e a probabilidade de detecção e assim estimar o risco. Não foram utilizados valores numéricos nos índices para facilitar a compreensão do leitor. O Quadro 1 agrupa estes dados.

Quadro 1 – FMEA do protótipo.

Análise do Tipo e Efeito de Falha									
Cod_pec: 1									
Nome da Peça: Caixa de som									
Data: 31 ago 2021									
Folha No. <u> 1 </u> de <u> 1 </u>									
Descrição do Produto/ Processo	Função(ões) do produto	Tipo de Falha Potencial	Efeito de Falha Potencial	Causa da Falha em Potencial	Controles Atuais	Índices Atuais			
						S	O	D	R
Caixa de Som didática.	Amplificar um sinal de entrada e reproduzir em um de seus alto falantes.	Som distorcido.	Sinal de saída distorcido.	Sinal de Entrada alto; Ganho alto.	Chave S3; Potenciômetro.	Moderada	Alta	Grande	Alto
		Som ruidoso.	Sinal ruidoso sendo amplificado.	Sinal ruidoso não filtrado.	Chave S1; Chave S2.	Moderada	Pequena	Grande	Alto
		Som baixo.	Sinal com baixo sinal ou baixo ganho	Sinal de Entrada baixo; Ganho baixo.	Chave S3; Potenciômetro.	Moderada	Alta	Moderada	Moderado
		Som com pouco grave.	Som com pouco grave	Sem realimentação; Alto falante inadequado.	Chave S4; Chave do alto falante.	Pequena	Pequena	Moderada	Baixo

Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma proposta de criar um protótipo de amplificador de áudio para o uso nas aulas de laboratório das diversas disciplinas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, podendo ser aproveitado por disciplinas como Práticas de Laboratório, Circuitos Elétricos e Eletrônica Básica. Portanto, o objetivo foi a criação de um protótipo didático funcional, simples e capaz de reproduzir efeitos de falhas.

Foi utilizada uma metodologia explorativa no início, onde os mais diversos tipos de circuitos e estruturas de circuitos foram analisados, além de circuitos integrados especializados. Ao fim, um circuito integrado, o LM386, foi escolhido para servir como base do protótipo, sendo um chip simples, barato e amplamente conhecido pela comunidade *maker*. Após a implementação física do amplificador, foi estudado, utilizando um gerador de sinais senoidais e um osciloscópio, o comportamento dos mais diversos possíveis circuitos que podem ser montados utilizando o LM386 como base, com o intuito de obter os efeitos potenciais que podem ser mostrados ao inserir ou remover elementos do circuito. Ao final, foi feita uma análise e compilação das causas e efeitos das falhas.

O resultado foi uma caixa de som que possui chaves para ligar e desligar partes do circuito, ou seja, inserindo ou removendo efeitos no alto-falante, como ruído excessivo, perda de ganho, distorção e resposta em frequência, além de ser possível comparar o desempenho utilizando dois alto-falantes de comportamento distinto. Portanto, todos os objetivos traçados foram atingidos.

Recomenda-se aos usuários deste amplificador de som a construírem os seus próprios protótipos utilizando placas de prototipagem e diferentes valores de resistores, capacitores, impedâncias de alto-falantes e tensões e tipos de fontes de alimentação. Também sugere-se criar protótipos baseados no circuito interno do LM386 ou, inclusive, circuitos mais complexos baseados em transistores ou outros chips. Um estudo sobre o interesse dos alunos no uso de protótipos educacionais nas

aulas pode identificar a efetividade dos mesmos, podendo também ser de interesse dos professores e monitores de laboratório para aprimorarem suas aulas.

6 REFERÊNCIAS

BELHOT, R. V. **Reflexões e Propostas Sobre o “Ensinar Engenharia” para o Século XXI**. 1997. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 1997. Disponível em: https://www2.eesc.usp.br/aprende/images/arquivos/Renato_Tese_LD.pdf. Acesso em: 09 abr. 2021.

BATISTA, J. D.; MAESTRIA, M. Desenvolvimento de Protótipo Educacional para Aprimorar a Aprendizagem na Disciplina Linguagem de Programação. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA. 47., 2019, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: 2019. Disponível em: https://www.abenge.org.br/sis_artigo_doi.php?e=COBENGE&a=19&c=1857. Acesso em: 09 abr. 2021.

ALMEIDA, P. R. A.; MUNIZ, P. R. Painel didático para ensino-aprendizagem de inspeção termográfica aplicada à manutenção elétrica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA. 46., 2018, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: 2018. Disponível em: https://www.abenge.org.br/sis_artigo_doi.php?e=COBENGE&a=18&c=1039. Acesso em: 09 abr. 2021.

AZÊVEDO, W. V. S.; PAZ, E. M.; ALVES FILHO, M. E.; ALBUQUERQUE NETO, D. P.; VIEIRA, E. F. L. Sobre Experimentação e Consecução de Projetos na Disciplina Laboratório de Circuitos Elétricos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA. 47., 2019, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: 2019. Disponível em: https://www.abenge.org.br/sis_artigo_doi.php?e=COBENGE&a=19&c=2217. Acesso em: 09 abr. 2021.

COSTA, M. G. R. S. **VEMAGIC: Projeto de um Kit Educacional de um Autorama Magnético**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: https://ele.ufes.br/sites/engenhariaeletrica.ufes.br/files/field/anexo/matheus_g_r_s_costa.pdf. Acesso em: 09 abr. 2021.

CABRAL, A. C. **Desenvolvimento de um Protótipo Didático para Ensino e Pesquisa: Sistema de Controle de Temperatura - Sistema Térmico**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará., Tucuruí, 2010. Disponível em: https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/bitstream/prefix/449/1/TCC_DesenvolvimentoPrototipoDidatico.pdf. Acesso em: 09 abr. 2021.

CONCEIÇÃO, L.; BRATCH, F. Como o som se origina. **Aulas eScience UNICAMP**. Disponível em: <http://educacaoedifusao.iqm.unicamp.br/-/como-o-som-se-origina>. Acesso em: 09 abr. 2021.

BRAGA, N. C. **Amplificadores de Áudio**. 1. ed. São Paulo: AgBook, 2019. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/index.php/42-newton-c>

braga/biblioteca/16355-e-book-amplificadores-de-audio-download-gratuito.html.
Acesso em: 09 abr. 2021.

ANJOS, T. A. O ouvido Humano. **MUNDO EDUCAÇÃO**. Disponível em:
<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/o-ouvido-humano.htm>. Acesso em: 09 abr. 2021.

DAREZZO, D. Escalas Musicais. **CURSO DE VIOLA CAIPIRA**. Disponível em:
<https://violaparainiciantes.blogspot.com/2015/06/escalas-musicais.html>. Acesso em:
09 abr. 2021.

MÚSICA. *In*: DICIONÁRIO Aulete Digital. Rio de Janeiro: Lexikon Editora Digital,
2021. Disponível em: <https://www.aulete.com.br/m%C3%BA>sica. Acesso em: 09 abr.
2021.

CORDELL, B. **Designing Audio Power Amplifiers**. 1st ed. New York: McGraw-Hill,
2010.

STAFFORD, A. History of the Amplifier: Valve vs Solid-State. **PRO AUDIO LAND**,
2012. Disponível em: <https://proaudioland.com/news/history-of-the-amp/>. Acesso em:
09 abr. 2021.

BLACK, S. C. What is Sensitivity in Headphones?. **HOME STUDIO BASICS**. 2017.
Disponível em: <https://homestudiobasics.com/what-is-sensitivity-in-headphones/>.
Acesso em: 09 abr. 2021.

JBL. **Cinema Sound System Manual**. JBL Professional, 2003. Disponível em:
https://jblpro.com/en/site_elements/jbl-professional-cinema-sound-system-manual.
Acesso em: 09 abr. 2021.

SELF, D. **Audio Power Amplifier Design Handbook**. 5th ed. Massachusetts: Focal
Press, 2009.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice
Hall, 2007.

POUPET, Boris. Amplifier Classes. **Electronics Lab**, s.d.. Disponível em:
<https://www.electronics-lab.com/article/amplifier-classes/>. Acesso em: 7 out. 2021.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. **Circuitos Elétricos**. 10. ed. São Paulo: Pearson
Education do Brasil, 2016.

SATTEL, S. Linear Regulated vs. Switch Mode Power Supply. **AUTODESK EAGLE
ACADEMY**. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/linear-regulated-vs-switch-mode-power-supply/>. Acesso em: 18 ago. 2021.

SILVA, A. H. C. Aplicação da Metodologia FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)
para Realização de Análise de Falhas em um Sistema de Pontes de Embarque de
um Aeroporto. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 27.,

2007, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: 2007. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR570432_0566.pdf. Acesso em: 18 ago. 2021.

TOLEDO, J. C.; AMARAL, D. C. **FMEA - Análise do Tipo e Efeito de Falha**. São Paulo, s.d. Disponível em: <http://www.gepeq.dep.ufscar.br/wp-content/arquivos/FMEA-APOSTILA.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2021.

AGUIAR, M. C. **Análise de Causa Raiz: levantamento dos métodos e exemplificações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/23437/23437.PDF>. Acesso em: 18 ago. 2021.

RODRIGUES, L. A. **Aplicabilidade de Análise de Falhas no Setor de Manutenção**. Dissertação (Especialização em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10410/1/PG_CEEP_2015_1_19.pdf. Acesso em: 18 ago. 2021

Texas Instruments, **LM1875 20W Audio Power Amplifier**, Folha de Dados do LM1875 [Revisão Maio 2004]. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1875.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2021.

STMicroelectronics, **TDA2003 10W CAR RADIO AUDIO AMPLIFIER**, Folha de Dados do TDA2003 [Revisão Outubro 1998]. Disponível em: <https://www.electroschematics.com/wp-content/uploads/2009/02/tda2003-datasheet.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2021.

Texas Instruments, **LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier**, Folha de Dados do LM386 [Revisão Maio 2017]. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm386.pdf?ts=1629330043764&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ecosia.org%252F. Acesso em: 18 ago. 2021.

LM386 Analysis. **ElectroSmash**. Salisbury, Reino Unido, s.d. Disponível em: <https://www.electrosmash.com/lm386-analysis>. Acesso em: 18 ago 2021.

CAMPBELL, S. Build a Great Sounding Audio Amplifier (with Bass Boost) from the LM386. **Circuit Basics**. Estados Unidos, 2015. Disponível em: <https://www.circuitbasics.com/build-a-great-sounding-audio-amplifier-with-bass-boost-from-the-lm386/>. Acesso em: 18 ago 2021.

SZYNALSKI, T. P. **Online Tone Generator**. Wroclaw, Poland, 2012. Disponível em: <https://www.szynalski.com/tone-generator/>. Acesso em: 20 ago. 2021.

APÊNDICE A – CONSULTA COM ALUNOS SOBRE AULAS EM LABORATÓRIO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Foi realizada uma pesquisa entre os dias 30 e 31 de março de 2021 utilizando a plataforma Google Forms em que eram realizadas três perguntas relacionadas às aulas em laboratório e sua formação profissional. O objetivo era obter um retrato da situação atual da influência destas aulas para a formação profissional voltada ao mercado de trabalho. Neste período foram registradas 52 respostas de alunos ingressados no curso entre 2015 e 2017.

Foram feitas as seguintes questões:

1. Como você avalia as aulas de laboratório do curso de Eng. Elétrica para a sua formação acadêmica? Em outras palavras, o quanto os experimentos te ajudaram a entender a matéria;
2. Como você avalia as aulas de laboratório do curso de Eng. Elétrica para a sua formação profissional? Em outras palavras, o quanto os experimentos te ajudaram a resolver problemas reais da sua área de atuação;
3. Você acha que experimentos envolvendo problemas reais, como simulação de defeitos em equipamentos e motores, podem melhorar a formação de um engenheiro?

As Perguntas 1 e 2 tinham opções de resposta em escala de 1 a 5, onde 1 representava péssimo e 5 representava excelente. A pergunta 3 tinha três opções de resposta: Sim, Não e Não tenho certeza.

O Quadro 2 mostra os resultados obtidos, extraídos diretamente da plataforma.

Quadro 2 – Respostas da Pesquisa realizada pelo Autor.

Pergunta	Respostas				
	1 (Péssimo)	2 (Ruim)	3 (Regular)	4 (Bom)	5 (Excelente)
Pergunta 1	2	3	13	23	11
Pergunta 2	7	10	22	9	4
	Sim		Não		Não Tenho Certeza
Pergunta 3	51		0		1

Fonte: Produção do Próprio Autor.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
HELIOMAR GUIMARAES GUZZO - SIAPE 295045
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT
Em 15/10/2021 às 14:05

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/288811?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
ANTONIO MANOEL FERREIRA FRASSON - SIAPE 298130
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT
Em 15/10/2021 às 16:47

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/289086?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
ANDRE FERREIRA - SIAPE 1713400
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT
Em 15/10/2021 às 17:12

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/289128?tipoArquivo=O>