UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LEONARDO MENEGHETTI CHICONELLO

AMPLIFICADOR COM GANHO AJUSTÁVEL REMOTAMENTE

São João da Boa Vista
2022

LEONARDO MENEGHETTI CHICONELLO

AMPLIFICADOR COM GANHO AJUSTÁVEL REMOTAMENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. André Alves Ferreira

São João da Boa Vista

2022

C533a

Chiconello, Leonardo Meneghetti
Amplificador com ganho ajustável remotamente / Leonardo Meneghetti Chiconello. -- São João da Boa Vista, 2022
46 p. : il., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Prof . Dr. André Alves Ferreira

1. Microeletrônica. 2. Amplificadores de audiofrequência. 3. Modulação (Eletrônica). 4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Arduino (Controlador programável). I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AMPLIFICADOR COM GANHO AJUSTÁVEL REMOTAMENTE

Aluno: Leonardo Meneghetti Chiconello
Orientador: Prof. Dr. André Alves Ferreira

Banca Examinadora:
- André Alves Ferreira (Orientador)
- Marcelo Jorge Filho (Examinador)
- Wilian Miranda dos Santos (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 093/2021)

São João da Boa Vista, 31 de janeiro de 2022

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem que me deu durante toda esta longa caminhada e a minha família que sempre me apoiou durante todos esses anos de formação.

Ao meu orientador Professor Dr. André Alves Ferreira, que me auxiliou durante todo o desenvolvimento do trabalho e durante toda a trajetória da minha graduação. Alguns momentos foram difíceis mas sempre tive o seu apoio e sua consideração. Uma pessoa que tenho como exemplo de comportamento e respeito com o próximo, seja no seu trabalho ou na sua vida pessoal.

Ao Assistente de Suporte Acadêmico Marcelo Jorge Filho, que juntamente ao meu orientador, não mediram esforços para me ajudar nas dificuldades do curso e suas matérias.

A minha médica Dra. Eliza Martha De Paiva Barretto, excelente profissional, que foi fundamental para minha evolução psicológica e também como ser humano. Tive sua ajuda nas horas mais conturbadas e também nas horas boas, e isso sempre vou levar como agradecimento e aprendizado.

Ao meu Psicólogo Rafael Augusto Biaco Breda, por ser uma pessoa extremamente cautelosa e atenta. No meio e no último momento da minha graduação precisei de sua ajuda e ela nunca foi negada. Uma pessoa que transmite responsabilidade e bom senso, tanto como ser humano como profissional.

A empresa Donima Serviços e Construções Elétricas – LTDA pela oportunidade de estágio na área de Redes de Distribuições Elétricas. Em tempos difíceis, vocês me abraçaram e me deram uma oportunidade única. Só tenho a agradecer a toda a equipe.

E finalmente, aos meus amigos que durante todo esse tempo me alavancaram para ser uma pessoa melhor e mais presente. Temos irmãos de sangue e de vida...Obrigado a todos vocês.

RESUMO

É fácil de notar que a tecnologia tem avançado exponencialmente, tornando possível coisas inimagináveis a poucos anos atrás. Como forma de evitar esforços desnecessários, os aparelhos com comandos por meios remotos são os mais aplicados hoje em dia, seja por meios computacionais, por comando de voz, ou outros. Pensando nisso, esse projeto irá demonstrar o uso e aplicação de amplificadores com adendo para ajustes por meio remoto, onde será colocado em prática todas as características de circuito, componentes, entre outros.

Antes das conclusões finais sobre o projeto em si, passaremos um pouco sobre a história e maiores aplicações dos amplificadores operacionais, mais especificamente os amplificadores da classe D, os quais são os mais indicados na aplicação de sistemas de áudio. Será abordado ainda sobre algumas outras classes de amplificadores, bem como seus princípios de funcionamento, arquitetura e aplicações.

Traremos também os resultados, práticos e teóricos, demonstrando boa concordância com os objetivos buscados na fase de projetos e também outros similares na literatura. A execução do projeto trará uma visão bem ampla da aplicação do comando de ganho de amplificadores através de acesso remoto, abrindo novas oportunidades de aplicações e usos em várias vertentes, além de trazer a curiosidade e incentivar as pesquisas no mundo da microeletrônica.

PALAVRAS-CHAVE: Amplificador. Áudio. Classe D. Eficiência.

ABSTRACT

As we can see in our day-to-day, technology has advanced exponentially, making possible things unimaginable just a few years ago. As a form of unnecessary effort, devices with remote commands are the most common nowadays, whether by computational means, by voice command, among others. With that in mind, this article will demonstrate the use and application of amplifiers with addendum for remote adjustments, where it will be placed on all circuit characteristics, components, among others.

Before the final exclusions about the project itself, we pass a little about the history and major applications of operational amplifiers, more specifically the class D amplifiers, which are the most indicated in the application of audio systems. We will also cover some other classes of amplifiers, as well as their working principles, architecture and applications.

We will also bring the results, practical and theoretical, demonstrating good agreement with the objectives sought in the design phase and also similar ones in the literature. The execution of the project will bring a very broad view of the application of the amplifier gain command through remote access, opening up new opportunities for applications and uses in various aspects, in addition to bringing curiosity and encouragement as research in the world of microelectronics.

KEYWORDS: Amplifier. Audio. Class D. Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Símbolo de circuito do amplificador. 11
Figura 2 - Característica de transferência de um amplificador de tensão linear com ganho de tensão Av. 12
Figura 3 - Amplificador que necessita de duas fontes cc para operar. 14
Figura 4 - Característica de transferência de um amplificador. 15
Figura 5 - Amplificador Classe A. 17
Figura 6 - Amplificador Classe B. 18
Figura 7 - Amplificador Classe AB. 20
Figura 8 - Esboço da corrente de saída em um amplificador Classe AB. 21
Figura 9 - Amplificador Classe C. 22
Figura 10 - Amplificador Classe D. 23
Figura 11 - Gerador de onda triangular composto por um integrador inversor (bloco 1) e um comparador com histerese (bloco 2). 24
Figura 12 - Filtro Butterworth de 2º ordem. 24
Figura 13 - Diagrama de blocos do circuito integrado do amplificador Classe D. 25
Figura 14 - Cabo RCA com suas conexões exemplificadas. 27
Figura 15 - Exemplo de cabo AV. 27
Figura 16 - Arduino UNO. 28
Figura 17 - Exemplo de uma linha de código no software Arduino Software (IDE). 29
Figura 18 - Robô seguidor de linha controlado por Arduino. 31
Figura 19 - Acionador de uma lixeira através de um sensor ultrasônico. 31
Figura 20 - Exemplo de comunicação sem fio aplicada no dia-a-dia. 32
Figura 21 - Esquemático do projeto no Proteus 34
Figura 22 - Filtro Butterworth do amplificador projetado 34
Figura 23 - Código C++ do projeto. 36
Figura 24 - Tensão aplicada de 5V VCC. 37
Figura 25 - Tensão aplicada de -5V VCC. 38
Figura 26 - Onda do sinal digital (IN), em 2,57V. 38
Figura 27 - Onda do sinal analógico amplificado (OUT). 39
Figura 28 - Onda do sinal analógico amplificado (OUT), ampliada. 40
Figura 29 - Frequência de corte do circuito projetado. 41
Figura 30 - Frequência fundamental em 1kHz e a segunda harmônica em 2kHz 40

Figura 31 - Comparação dos sinais no osciloscópio.....41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 7

1.1 MOTIVAÇÃO 7

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 7

1.3 OBJETIVOS 8

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 9

2 AMPLIFICADORES 10

2.1 AMPLIFICAÇÃO DE SINAL 10

2.2 SÍMBOLO DE CIRCUITO DO AMPLIFICADOR 11

2.3 GANHO DE TENSÃO 11

2.4 GANHO DE POTÊNCIA E GANHO DE CORRENTE 12

2.5 GANHO EXPRESSO EM DECIBÉIS 13

2.6 FONTES DE ALIMENTAÇÃO DO AMPLIFICADOR 13

2.7 SATURAÇÃO DO AMPLIFICADOR 15

2.8 TIPOS DE AMPLIFICADORES 16

***2.8.1 Classe A* 16**

***2.8.2 Classe B* 17**

***2.8.3 Classe AB* 19**

***2.8.4 Classe C* 21**

***2.8.5 Classe D* 22**

3 ARDUINO 28

3.1 COMUNICAÇÃO SEM FIO 32

4 ANÁLISE PRÁTICA 33

4.1 FILTRO BUTTERWORTH 34

4.2 CÓDIGO C++ 34

4.3 ANÁLISE GRÁFICA 35

5 CONCLUSÃO 42

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Tendo uma presença já bem difundida em meios industriais, a automação tem sido uma área que tem recebido uma atenção cada vez maior nas aplicações do nosso cotidiano. Em seus diversos níveis de aplicação, ela pode proporcionar o controle automático e remoto de uma grande variedade de dispositivos. Esse controle por meios remotos tem sido cada vez mais procurado na área eletrônica, devida à facilidade de operação e conforto, em sua vasta gama de aplicação

Aliado com o gosto pela amplificação de sinais, pela música e pela área da microeletrônica em geral do autor, tendo em vista a evolução da comunicação remota e suas vertentes, viu-se a oportunidade da construção desse projeto, o qual se trata de um amplificador com adendo para ajustes de ganho por meios remotos, pondo em prática toda as características acompanhadas durante a integralização do curso e também como forma de se aproximar ainda mais da área de amplificação, em suas formas gerais, uma área de suma importância ao se tratar de circuitos eletrônicos de baixa tensão.

Neste trabalho será realizada uma breve pesquisa bibliográfica introduzindo sobre a tecnologia de amplificadores, a fim de preparar o leitor para o entendimento do trabalho. Em seguida será apresentado o desenvolvimento do projeto, envolvendo todo o planejamento, simulação e testes

1.2 Revisão Bibliográfica

Na eletrônica em geral, os sinais oriundos de sensores, transdutores ou de biopotenciais costumam ser muito baixos. Isto os torna incompatíveis com os circuitos tradicionalmente utilizados para ler estes sinais em um computador. Por esta razão costuma ser necessário amplificá-los antes que eles sejam processados. Amplificar nada mais é do que multiplicar o sinal por uma constante. Quando a constante é maior do que 1 ela é chamada de ganho, e quando ela é menor do que 1 é chamada de atenuação. Também é muito comum interligar dispositivos para produzir um novo instrumento de medida ou sistema de medição, neste caso os níveis de tensão e

corrente aceitos pelos diferentes dispositivos devem ser garantidos. Para isto os sinais normalmente precisam ser amplificados, atenuados ou somados a alguma constante. Neste trabalho de conclusão de curso será abordado formas de amplificar, atenuar e somar sinais de forma eletrônica e veremos quando e onde devemos utilizar estas ferramentas.

O elemento básico para tais procedimentos será o “amplificador operacional” (AO).

A origem do termo “operacional” vem dos antigos computadores analógicos, onde estes amplificadores eram utilizados como elemento para a realização de operações matemáticas. O nome “amplificador operacional” foi usado pela primeira vez em uma publicação de 1947, feita por John Ragazzini, o qual descrevia as propriedades de circuitos capazes de amplificar a diferença entre dois sinais analógicos. O artigo, que teve como base trabalhos anteriores, realizados entre 1943 e 1944, considerava as condições de realimentação linear e não-linear. Hoje em dia o AO é o circuito integrado analógico mais utilizado.

Por ter sido projetado para ser versátil e funcionar em circuitos com realimentação negativa este amplificador é construído com ganhos extremamente elevados. Tão elevados que na maioria das vezes vamos considerar que seu ganho é infinito. O erro desta suposição é, na maioria das vezes, desprezível.

1.3 Objetivos

Os objetivos gerais serão voltados à análise dos resultados colhidos através do desenvolvimento do trabalho, dando prioridade à eficiência dos amplificadores Classe A, B, AB, C e, principalmente, os da Classe D, além do dimensionamento de potência e facilidade de alteração de ganho, visto o uso do recurso remoto. Será apresentado também resultados das simulações, como esquemáticos da montagem dos componentes, parâmetros obtidos e gráficos de resposta.

Busca-se também investigar um conjunto de soluções que melhor se adapte aos pontos fortes e limitações dos componentes utilizados, ampliando suas funcionalidades por meio de funções implementadas em microcontrolador externo, de modo a melhor atender as necessidades de uma rede de comunicação remota.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo 1 será feita uma introdução falando sobre a Motivação, Revisão Bibliográfica e Objetivos do trabalho. No Capítulo 2 será discutida toda a teoria que envolve os amplificadores operacionais, fazendo uma análise detalhada das equações que as envolvem e toda a teoria que está dentro deste assunto. No Capítulo 3, será abordada a teoria do Arduino, onde também foi abordada a teoria acerca do assunto, envolvendo a comunicação sem fio. E finalmente no Capítulo 4 será apresentada a conclusão do trabalho.

2 AMPLIFICADORES

Em um contexto mais amplo, amplificadores são dispositivos utilizados para o controle de uma grande quantidade de energia, onde sua principal função na eletrônica é amplificar o sinal de entrada [SEDRA, 2007]. Sua aplicação abrange grande parte dos sistemas eletrônicos, sendo usado em transmissores, receptores de rádio e televisão, entre outros.

Para condições ideias, podemos considerar que o amplificador possui como características um ganho infinito em malha aberta, resposta de frequência infinita, impedância de entrada infinita e impedância de saída igual a zero [BOYLESTAD, 2004]. Será abordado cada um desses parâmetros a seguir.

2.1 Amplificação de sinal

Dentre as principais funções dos amplificadores, a mais simples e mais utilizada é a amplificação de sinal. Essa função surgiu da necessidade de aumentar a energia do sinal de entrada, já que os transdutores fornecem sinal de baixíssima tensão, na ordem de milivolt ou até em microvolt. Devido a sua ordem de grandeza, esses sinais não geram um processamento confiável, tornando necessário o aumento da sua amplitude.

Um cuidado que se deve ter ao amplificar um sinal de entrada é manter a linearidade nos amplificadores, já que não podemos modificar nenhuma informação contida nele, além de não adicionar nenhuma informação nova. Desse modo, ao alimentar um amplificador com um sinal, é esperado que o sinal de saída seja idêntico ao sinal de entrada, porém, com sua amplitude aumentada. As modificações indesejadas no sinal de saída são chamadas de distorções e devem ser anuladas.

A equação que rege a operação dos amplificadores de sinal, descrevendo assim seu formato de onda, é demonstrada abaixo.

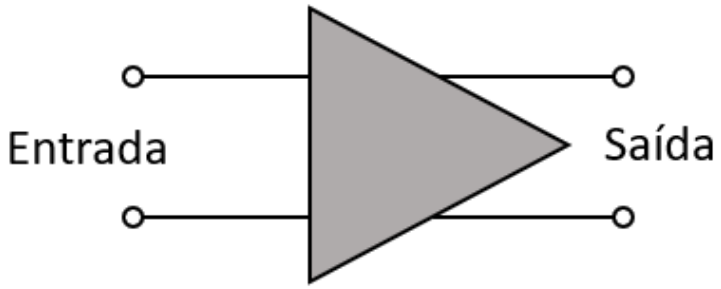
$$v_0(t) = Av_1(t) \tag{1}$$

onde v_0 e v_1 são sinais de saída e de entrada, respectivamente, e A representa o ganho do amplificador, também conhecido como fator de amplificação.

2.2 Símbolo de circuito do amplificador

O amplificador de sinal, sendo um quadripolo, pode ser representado pelo bloco de circuito da Figura 1, onde pode-se notar facilmente os pontos de entrada e saída, ficando evidente o fluxo de sinal da operação.

Figura 1 - Símbolo de circuito do amplificador.

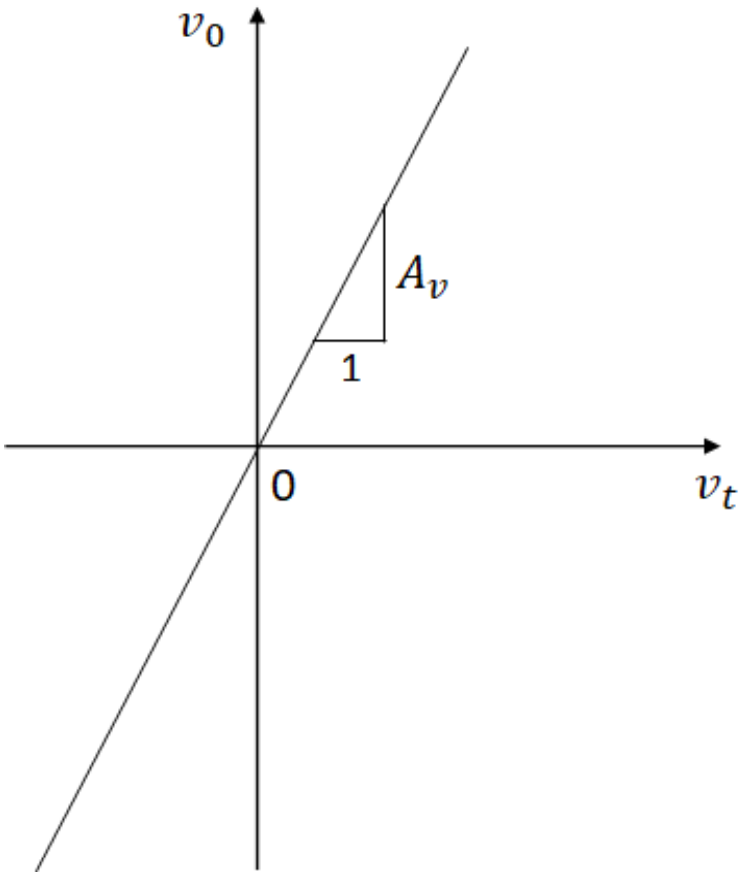


Fonte: [SEDRA, 2007]

2.3 Ganho de tensão

Por definição, o ganho de tensão é dado pela razão entre a tensão de saída pela tensão de entrada, sendo assim, a última sendo uma réplica aumentada [SEDRA, 2007]. Isso ocorre quando esse ganho é maior que 1, para valores entre 0 e 1, a saída é atenuada. A Figura 2 demonstra o comportamento de um amplificador e como é possível achar o ganho através do mesmo.

Figura 2 - Característica de transferência de um amplificador de tensão linear com ganho de tensão Av.



Fonte: [SEDRA, 2007]

2.4 Ganho de potência e ganho de corrente

Como principal diferença para o transformador, o amplificador sempre aumenta a potência do sinal, tendo assim um ganho de potência característico [SEDRA, 2007]. Esse ganho pode ser calculado pela razão entre a potência induzida na carga e a potência na entrada do circuito. Como a potência pode ser deduzida pela tensão multiplicada pela corrente, chegamos à seguinte expressão para o cálculo do ganho de corrente:

$$A_p = \frac{i_0}{i_t} \tag{2}$$

$$A_p = A_v \, \Delta_i \tag{3}$$

onde A_p é ganho de corrente e Δ_i é a razão da corrente de saída pela corrente de entrada do circuito, considerando uma resistência R_L.

2.5 Ganho expresso em decibéis

Para facilitar o entendimento da grandeza e do comportamento dos ganhos dos amplificadores, adotou-se o uso de uma medida logarítmica, que é expressa em decibéis, por razões até históricas. Especificamente, chegamos às seguintes fórmulas:

$$Ganho\ de\ tensão(dB) = 20log|A_v| \tag{4}$$

$$Ganho\ de\ corrente(dB) = 20log|A_i| \tag{5}$$

$$Ganho\ de\ potência(dB) = 10log|A_p| \tag{6}$$

A constante da relação do ganho de potência é alterada devido à potência ser uma relação quadrática da tensão ou da corrente.

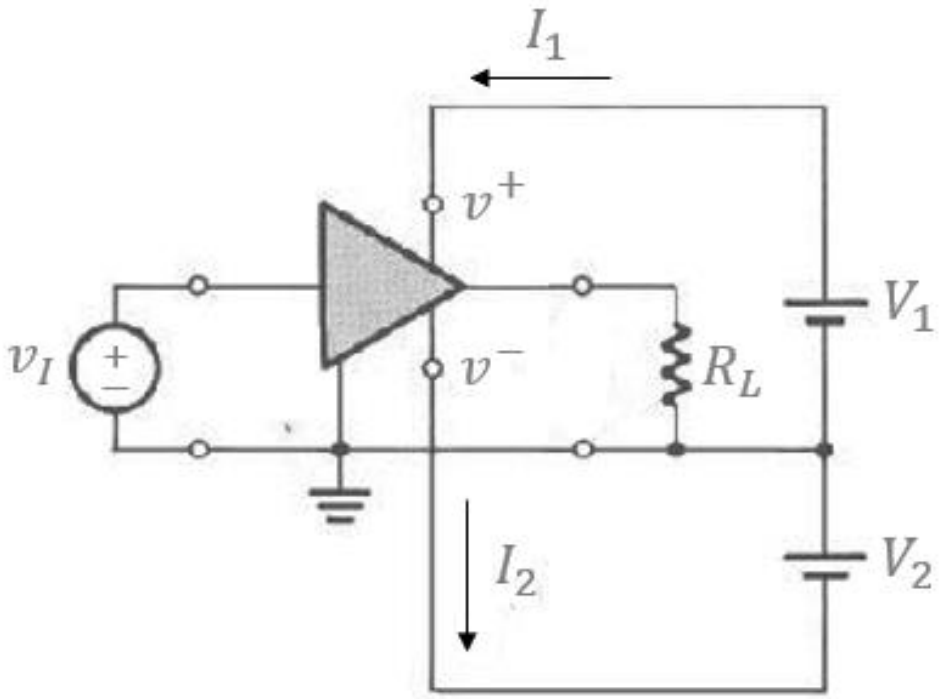
Analisando as relações, quando dizemos, por exemplo, que um amplificador tem ganho de 30dB, significa que o mesmo aumenta a sua potência de entrada em 1.000 vezes. O ganho expresso pode também apresentar valores negativos, o que significa que o sinal de entrada foi atenuado.

2.6 Fontes de alimentação do amplificador

Como visto anteriormente, a função dos amplificadores é aumentar a potência entregue à carga partindo da fonte, surgindo um problema: qual a origem dessa potência adicional? Desse princípio surge a necessidade de adicionar fontes de alimentação de corrente contínua para a aplicação dos amplificadores [BOYLESTAD,

2004]. A Figura 3 mostra como as fontes são ligadas internamente nos circuitos internos.

Figura 3 - Amplificador que necessita de duas fontes cc para operar.



Fonte: [SEDRA, 2007]

Pode-se notar que pelo desenho que o circuito possui uma fonte positiva V_1 e uma fonte negativa V_2, onde o amplificador drena uma corrente I_1 e a fonte negativa drena uma corrente de valor I_2, respectivamente. Dessa análise podemos deduzir a seguinte fórmula para o cálculo da potência cc entregue ao amplificador:

$$P_{cc} = V_1 I_1 + V_2 I_2 \tag{7}$$

Considerando a potência dissipada no circuito, pode-se chegar à relação da potência dissipada no circuito pela seguinte fórmula:

$$P_{cc} + P_t = P_L + P_{dissipada} \tag{8}$$

onde P_t é a potência drenada da fonte de sinal e P_L é a potência fornecida à carga do circuito.

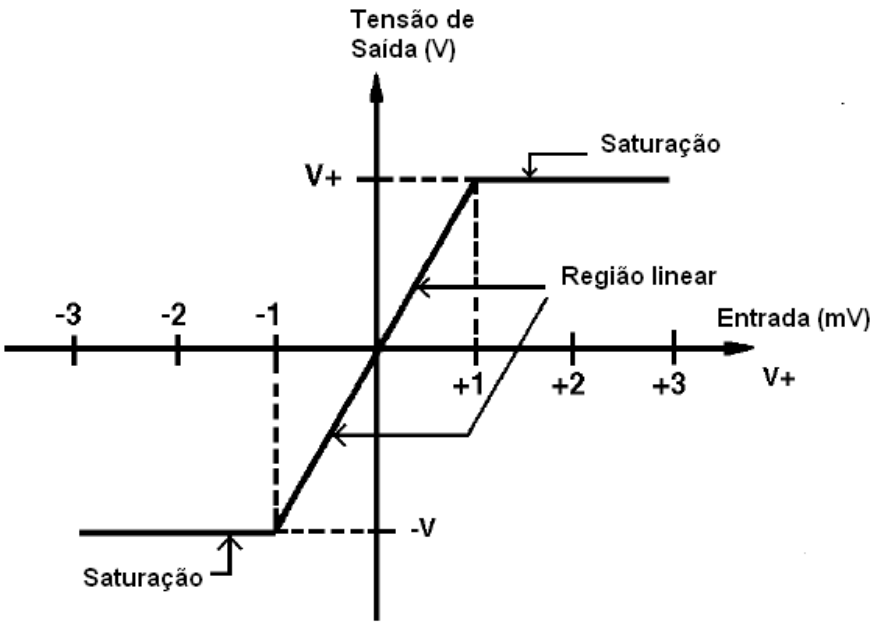
Para o cálculo da eficiência do amplificador, considerando a potência drenada da fonte de sinal desprezível, chegamos à seguinte relação:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{cc}} \, x \, 100 \qquad (9)$$

2.7 Saturação do amplificador

Em condições ideais, qualquer valor de entrada seria amplificado pelo circuito amplificador, porém sabe-se que na prática não é assim. A tensão de saída fica limitada pelas fontes de alimentação, não podendo exceder determinado limite positivo, não podendo também ser menor que certo limite negativo. É possível notar na Figura 4 a característica de transferência do amplificador e seus limites de saturação.

Figura 4 - Característica de transferência de um amplificador.



Fonte: [SEDRA, 2007]

2.8 Tipos de amplificadores

Dependendo do sinal a ser amplificado, seja ela de tensão ou corrente, e da forma que se deseja obter, também seja ela tensão ou corrente, existem quatro tipos básicos de amplificadores: amplificador de tensão, corrente, transcondutância e transresistência. A partir desses quatro modelos podemos representar qualquer outro amplificador, em termos de modelo.

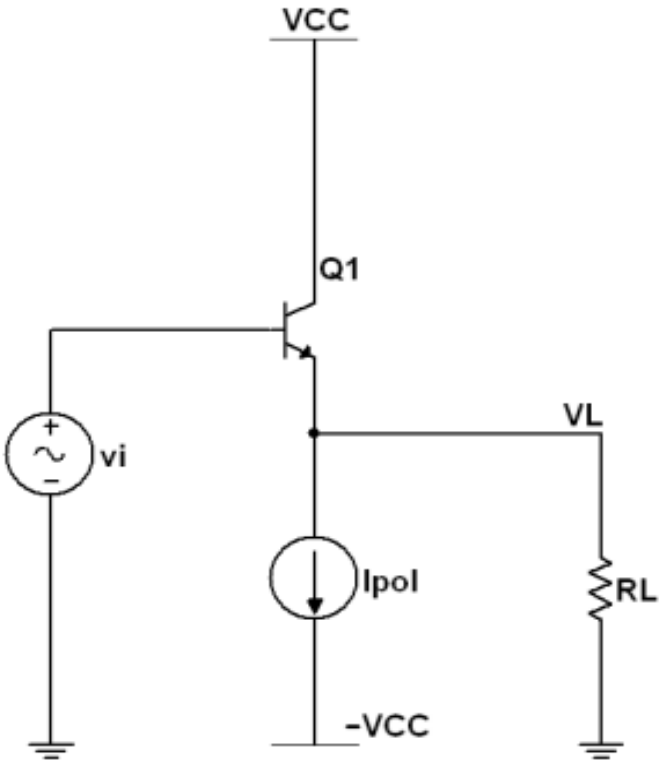
Em sua vasta aplicação, os amplificadores podem ser mais facilmente encontrados em equipamentos de áudio, somado com a construção e acústica do aparelho [PERTENCE JÚNIOR, 2003]. A amplificação de sinais de áudio veio da necessidade de passar uma mensagem, seja ela artística ou não, para o maior número de pessoas possível.

Durante os anos, houve a necessidade de aperfeiçoar cada vez mais esses equipamentos, surgindo assim as classes de amplificação. Essas classes descrevem o comportamento da corrente na saída dos equipamentos em questão, onde podemos extrair informações como linearidade e eficiência energética do sistema. Falaremos sobre as principais classes que existe na microeletrônica a seguir.

2.8.1 Classe A

A primeira classe a surgir, em meados de 1917, foi a Classe A, sendo chamada assim somente após o surgimento da Classe B, sendo uma das melhores configurações para reprodução de áudio de alta qualidade, quando implementado juntamente com um seguidor de emissor padrão. A principal característica desses equipamentos é a corrente de polarização que percorre o andar final do circuito, fluindo por todos os dispositivos de saída, mesmo que o sinal de entrada seja nulo, conseguindo assim baixa distorção no sinal e uma maior linearidade, quando comparada com outras classes [SEDRA, 2007].

Figura 5 - Amplificador Classe A.



Fonte: [PERTENCE JÚNIOR, 2003]

Um ponto negativo encontrado nesse tipo de configuração seria o baixo rendimento devido à própria corrente de polarização que passa pelo andar de saída, mesmo que a entrada do sistema seja nula. Um valor estimado de rendimento seria na casa dos 20%, onde surge a necessidade de diminuir a dissipação térmica utilizando grandes dissipadores térmicos, o que aumenta consideravelmente o peso, custo e manutenção do equipamento. Outra forma de aumentar a eficiência dessa configuração seria a implementação de um projeto simétrico com dois transistores, todavia, não passando dos 50%.

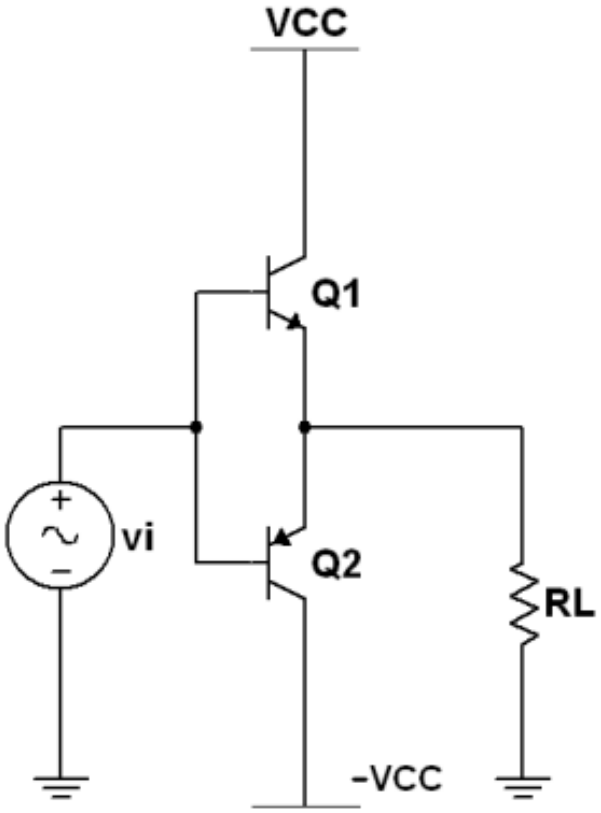
2.8.2 Classe B

Em seguida, perto de 1945, surge a segunda classe de amplificadores de áudio, denominada Classe B. Os amplificadores desta classe utilizam de um par de transistores e possuem polarização zero DC, já que os transistores são polarizados no corte. Com essa nova configuração surge um um novo problema, onde cada um

dos elementos presentes na malha de saída conduz apenas durante metade do período da onda, sendo que um conduz na parte positiva e o outro na negativa.

Na Figura 6 é notável uma configuração de emissor com transistores bipolares, onde foi utilizado um transistor bipolar PNP, que pode ser chamado de andar com simetria complementar.

Figura 6 - Amplificador Classe B.



Fonte: [PERTENCE JÚNIOR, 2003]

Um ponto positivo dessa classe seria o aproveitamento energético, que nesse caso pode chegar a cerca de 80%, que só pode ser obtido quando a tensão de saída tem amplitude máxima igual à tensão de alimentação. Porém, esse sinal possui uma distorção no sinal de saída, dado pelo fato de as tensões mínimas de polarização de cada transistor, considerando o sinal de entrada do circuito entre os valores da tensão entre a base e o emissor do transistor Q1 e entre o emissor e a base do transistor Q2, os transistores encontram-se em corte, mesmo o sinal de entrada não sendo nulo, a saída é igual a zero. Essa distorção encontrada na saída do circuito pode ser chamada de distorção de cruzamento ou *crossover distortion*.

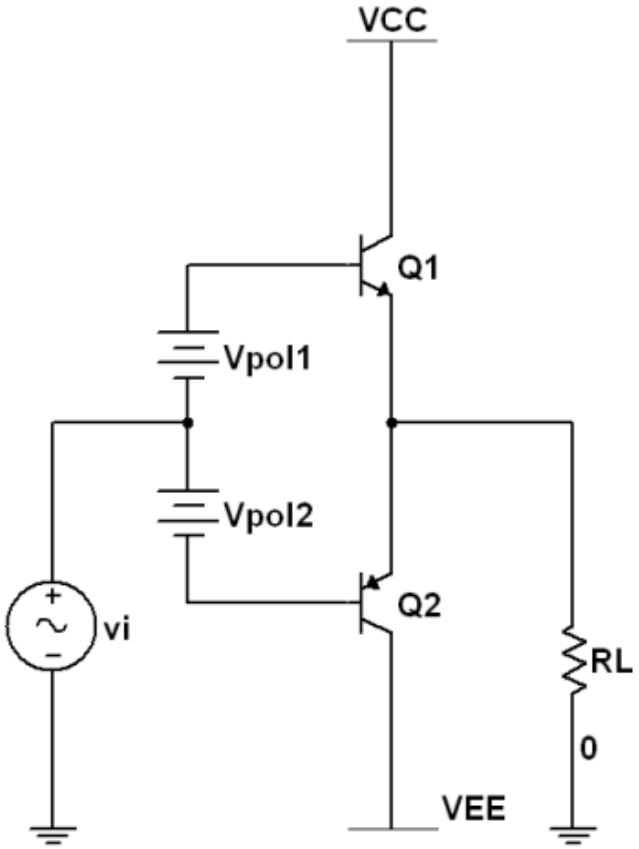
Por outro lado, uma maior eficiência permite que uma maior potência de saída seja obtida com dissipadores de calor bem menores, além do uso de feedback negativo pode, com um projeto extremamente cauteloso, reduzir as distorções a níveis desprezíveis. Essa classe de amplificadores costuma ser usada em métodos de operação para amplificadores com CI em níveis de potência de até 15W de saída.

2.8.3 Classe AB

Com o intuito de solucionar os problemas de perdas energéticas sem alterar a qualidade do sinal amplificado, foi proposto juntar as melhores características das classes citadas anteriormente, sendo os tipos mais comumente usados em sua grande maioria pelos fabricantes de amplificadores de áudio de potência. Da Classe A, temos um sinal que amplifica linearmente, sem distorções, e da Classe B que utiliza dois dispositivos para amplificar a forma de onda completa, assim conseguindo um valor de eficiência significativamente alto.

A Figura 7 mostra um amplificador da Classe AB, onde podemos notar a inserção de tensões de polarização, com o intuito de garantir as tensões mínimas de polarização de ambos os transistores, assim, anulando a descontinuidade da tensão de saída existente na Classe B.

Figura 7 - Amplificador Classe AB.

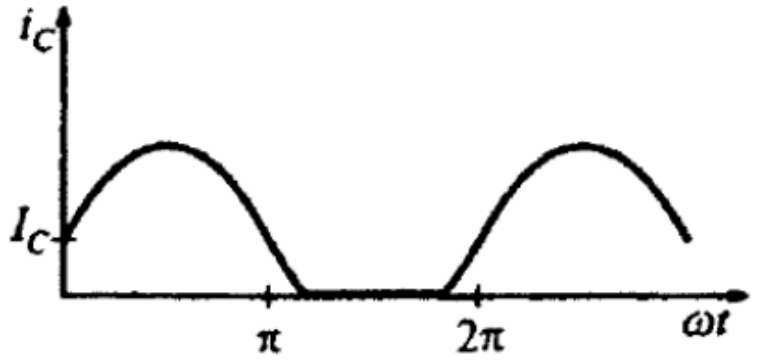


Fonte: [PERTENCE JÚNIOR, 2003]

Se observarmos o comportamento do sinal de saída após ser amplificado, notamos que a corrente flui durante um pouco mais do que meio período do sinal de entrada, onde o ângulo de condução do transistor fica situado entre 180° e 360°. Podemos observar também que essa classe é menos linear que as citadas anteriormente, onde os dois transistores têm uma tensão de polarização muito pequena, normalmente de 5 a 10% da corrente quiescente para polarizar os transistores logo acima de seu ponto de corte. Resumindo, em um projeto de amplificador de Classe AB, cada um dos transistores em configuração push-pull está conduzindo por um pouco mais do que meio ciclo de condução na Classe B, mas muito menos do que o ciclo completo de condução da Classe A.

A figura 8 a seguir demonstra esse comportamento, considerando um sinal de entrada genérico.

Figura 8 - Esboço da corrente de saída em um amplificador Classe AB.



Fonte: [PERTENCE JÚNIOR, 2003]

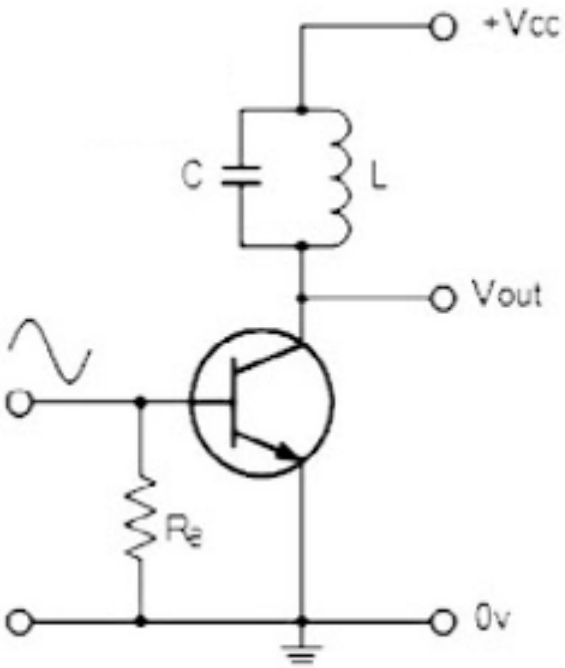
2.8.4 Classe C

Mesmo não sendo recomendada para amplificação de áudio quando aplicada sozinha, a Classe C pode ser bastante útil quando associada com outras classes de amplificação, obtendo-se uma nova classe de amplificação. Essa classe tem como característica principal uma grande eficiência, no entanto, a linearidade são as menores das classes de amplificadores mencionados até aqui.

Resumidamente, essa classe é fortemente polarizada, de modo que a corrente de saída seja zero por mais da metade de um ciclo senoidal de entrada com o transistor ocioso em seu ponto de corte. Esse circuito conduz menos da metade do período de onda na saída do conjunto, o que causa uma grande anomalia no sinal, também chamado de distorção de cruzamento, a qual não é aceitável na amplificação de áudio e só possui utilidade nessa área quando usada para complementar outras classes para formar outras novas, onde pode-se citar a Classe G. Essa classe também tem como característica do transistor operar na região ativa com menos de 180° do ciclo alternado do sinal. Com isso, o ponto de condução é muito menor que 180°, consequentemente, percebemos um trem de pulsos estreitos no terminal do coletor do transistor.

Abaixo temos o circuito característico dos amplificadores da Classe C e os respectivos componentes que o compõem.

Figura 9 - Amplificador Classe C.



Fonte: [PERTENCE JÚNIOR, 2003]

Mesmo tendo a linearidade afetada, essa classe de amplificadores possuem uma eficiência muito boa, sendo em torno de 80%, devido a forma de polarização dos transistores.

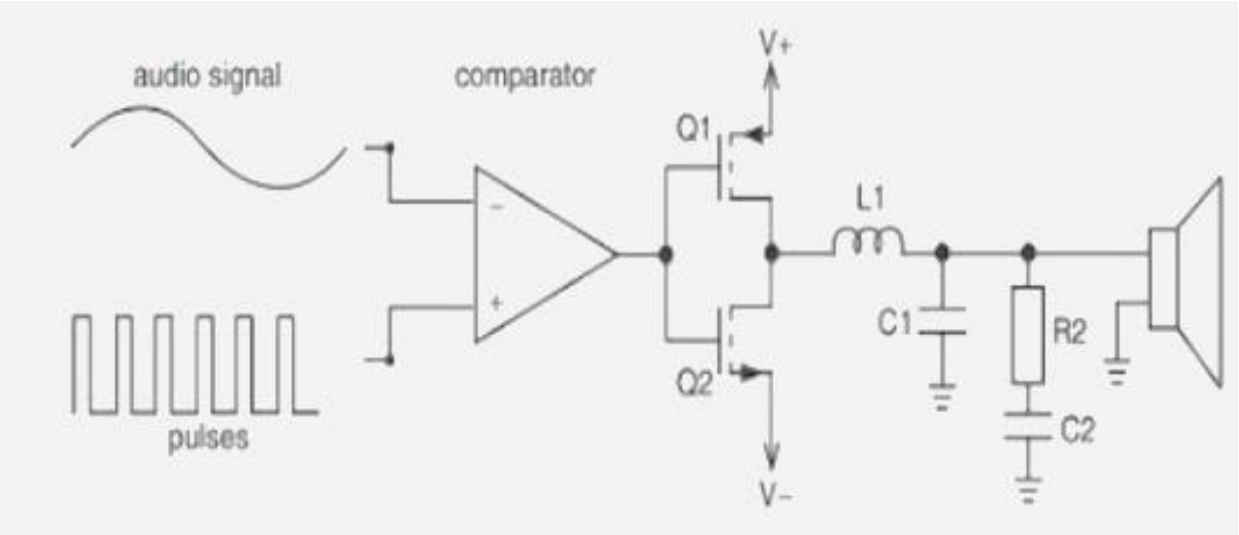
Por não terem muito utilidade para circuitos de áudio, a Classe C é mais comumente usada em osciladores de onda senoidal de alta frequência e certos tipos de amplificadores de frequência de rádio, já que os pulsos de corrente produzidos na saída do amplificador podem facilmente ser convertidos em ondas senoidais completas de uma determinada frequência pelo uso de circuitos ressonantes do tipo LC em seu circuito coletor [SEDRA, 2007].

2.8.5 Classe D

Sendo a classe de amplificadores mais utilizada para sistemas de áudio, a Classe D teve como objetivo de otimizar o aproveitamento energético, grande problema encontrado nas classes anteriores. Esses amplificadores alternam

continuamente a saída de um ciclo para outro em uma frequência supersônica, controlando a relação marca/espaço, a fim de fornecer uma média que representa o nível instantâneo do sinal de áudio. A Figura 10 ilustra um circuito básico dessa classe de amplificadores.

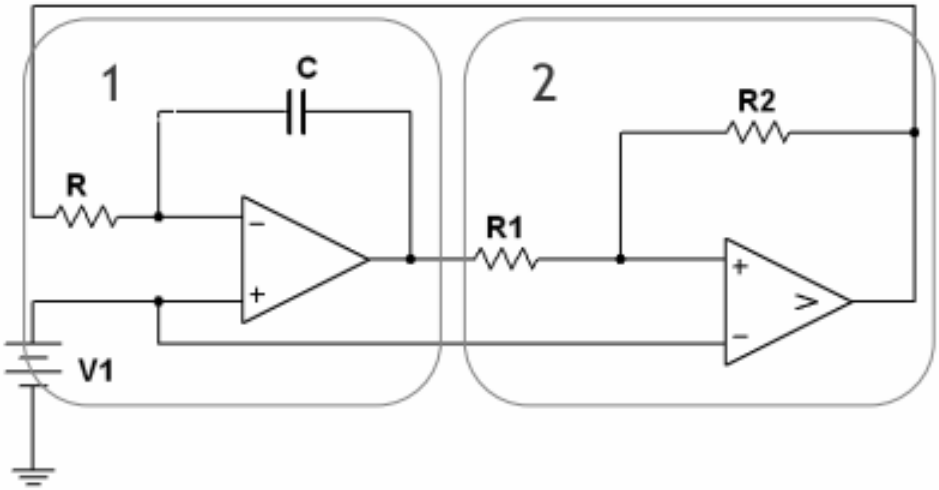
Figura 10 - Amplificador Classe D.



Fonte: [BOYLESTAD, 2004]

Seu princípio de funcionamento consiste na utilização de interruptores de potência controlados por uma modulação de largura de pulso (PWM), provinda da comparação do sinal de entrada com uma onda moduladora triangular. Para que esse sistema funcione corretamente, espera-se que a frequência fundamental seja, no mínimo, duas vezes maior do que o valor de frequência máximo do sinal de entrada. O gerador de onda triangular utilizado no circuito é exemplificado na Figura 11.

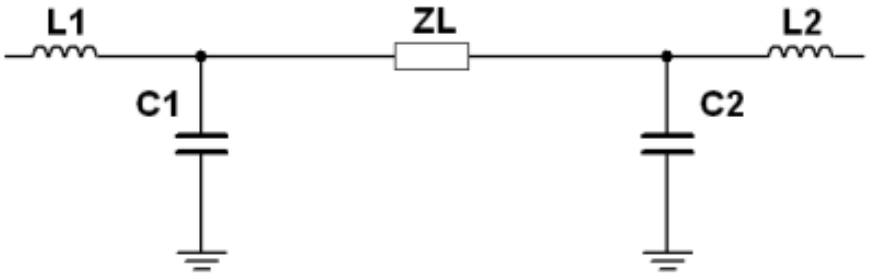
Figura 11 - Gerador de onda triangular composto por um integrador inversor (bloco 1) e um comparador com histerese (bloco 2).



Fonte: [BOYLESTAD, 2004]

Como resultado desses sinais de entrada, temos uma onda quadrada na saída do sistema com um ciclo de trabalho variável, sendo seus valores limitados pelas tensões aplicadas no amplificador. Essa onda ainda passará por um refinamento utilizando filtros passa-baixo passivo, que eliminará todas as componentes de frequência acima da frequência máxima existente no sinal de entrada, aproximadamente 20 kHz. Esse filtro é a parte constituinte do amplificador responsável pela demodulação do sinal de saída da parte de potência, normalmente sendo utilizado o filtro Butterworth, o qual é demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Filtro Butterworth de 2º ordem.



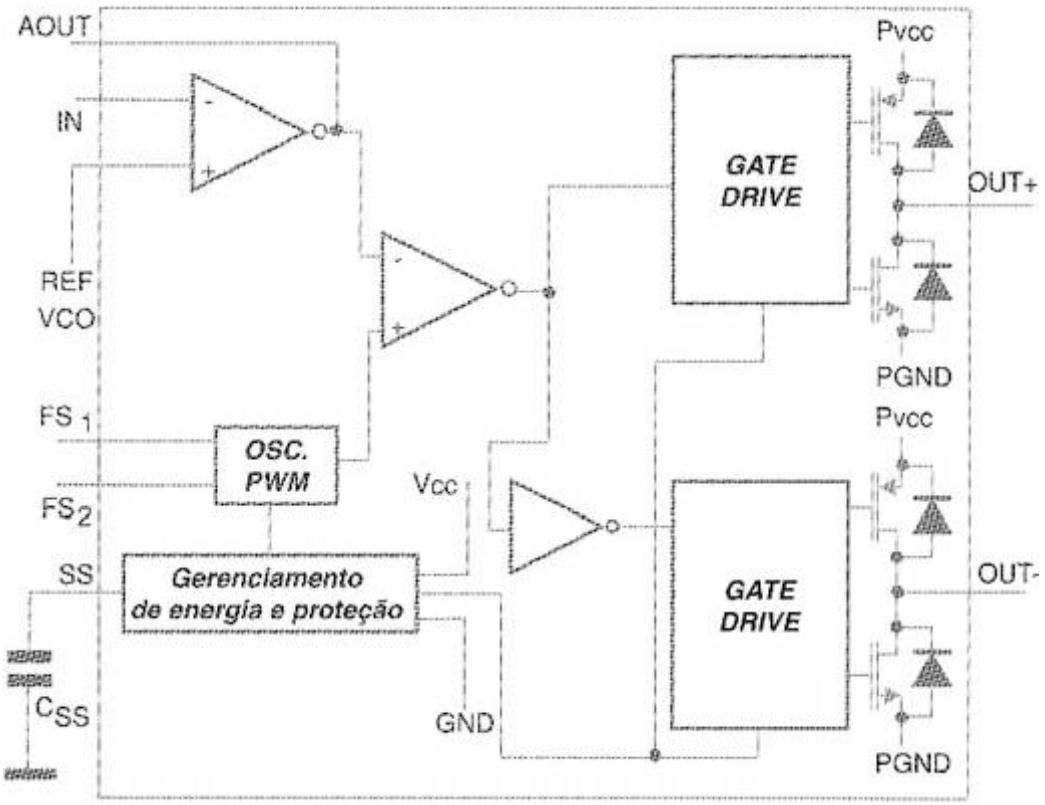
Fonte: [PERTENCE JÚNIOR, 2003]

Na teoria essa configuração de amplificadores apresenta um aproveitamento energético bem próximo de 100%, porém sabe-se que isso não é possível na prática. A justificativa seria os tempos de comutação, considerados não nulos, além da

resistência de condução do circuito. O fato de os semicondutores usados não possuírem um tempo nulo de comutação, torna necessário que seja inserido um tempo morto entre as comutações dos diferentes dispositivos, o que leva a uma grande distorção harmônica. Na prática, um tempo morto de 40ns leva a uma distorção harmônica total de 2%, onde pode-se diminuí-la para 0,2% se alterarmos o tempo morto para 15ns. Com base nessas afirmações, é possível notar que essa classe de amplificadores possui grande porcentagem de aproveitamento energético, podendo chegar na ordem dos 90% em amplificadores bem dimensionados.

Na Figura 13 temos um amplificador completo em Classe D com seus blocos como encontramos em circuitos integrados usados em telecomunicações.

Figura 13 - Diagrama de blocos do circuito integrado do amplificador Classe D.



Fonte: [PERTENCE JÚNIOR, 2003]

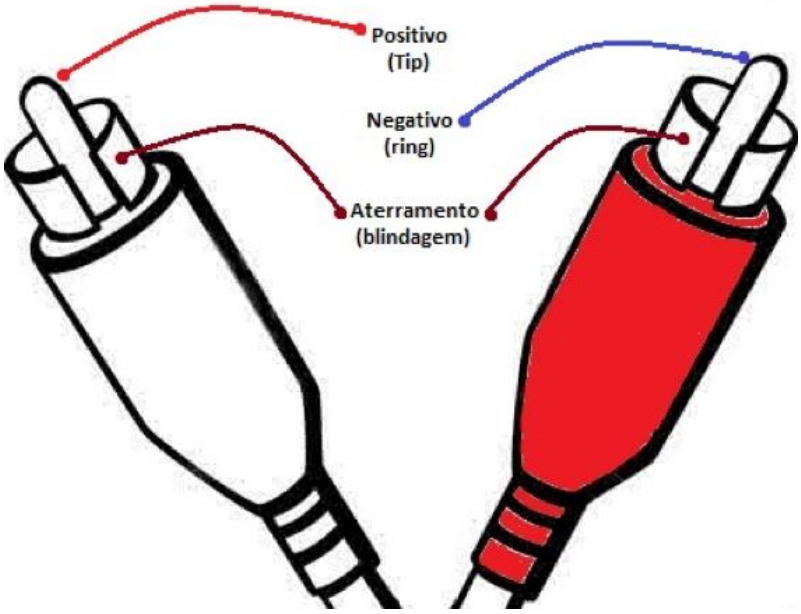
Para um bom projeto de amplificador e uma eficiência energética elevada, alguns pontos devem ser levados em conta na hora de projetar um amplificador Classe D, onde podemos listar:

- a escolha de semicondutores de potência visando a obtenção de um baixo valor de resistência de condução R_{ON};
- a redução das capacidades intrínsecas dos dispositivos eletrônicos, evitando assim distorções e ruídos indesejados na saída do circuito;
- o cálculo exato da corrente de gate que deve ser capaz de carregar as capacidades dos semicondutores em um curto espaço de tempo, conseguindo assim uma rápida ativação ou desativação dos transistores;
- a placa de circuito impresso e as ligações da carga do sistema, visto que ligações mal feitas ou maus contatos levam à produção de ruídos indesejados, o que diminui significativamente a eficiência do sistema. Recomenda-se o uso de cabos blindados, distância segura do amplificador até a carga e um dimensionamento cuidadoso das pistas dos circuitos.

Com o intuito de aperfeiçoar essa classe de amplificação, grandes esforços e engenhosidades foram devotados a essa abordagem, pois a eficiência é, em teoria, muito alta, mas as dificuldades práticas são extremamente graves, especialmente em um mundo de legislação EMC cada vez mais rígida. A distorção não é inerentemente baixa e a quantidade de feedback negativo global que pode ser aplicada é severamente limitada pelo pólo, devido à frequência efetiva de amostragem direto do feedback. Em sistemas de áudio em geral, principalmente sistemas que utilizam baterias, os amplificadores da classe D acabam trazendo grandes vantagens sobre os demais, além do baixo consumo temos também o fato de serem fáceis e simples de serem instalados, apresentando ótima fidelidade e qualidade sonora. O fato de serem simples para a instalação, leva em conta o uso de entradas e cabos RCA.

RCA é a sigla para “Radio Corporation of America”, nome da empresa que desenvolveu o cabo na década de 1940. O objetivo era fazer a conexão entre tocadores mono e amplificadores. Por esse tipo de cabo oferecer qualidade de áudio excelente, com alta fidelidade de sinal, ele se tornou padrão para muitos sistemas de sons. O RCA também é utilizado em câmeras de vídeo, TV’s, DVD’s, entre outros, nesse caso eles são conhecidos como cabos AV (Áudio/Vídeo).

Figura 14 - Cabo RCA com suas conexões exemplificadas.



Fonte: [COSTA, 2013]

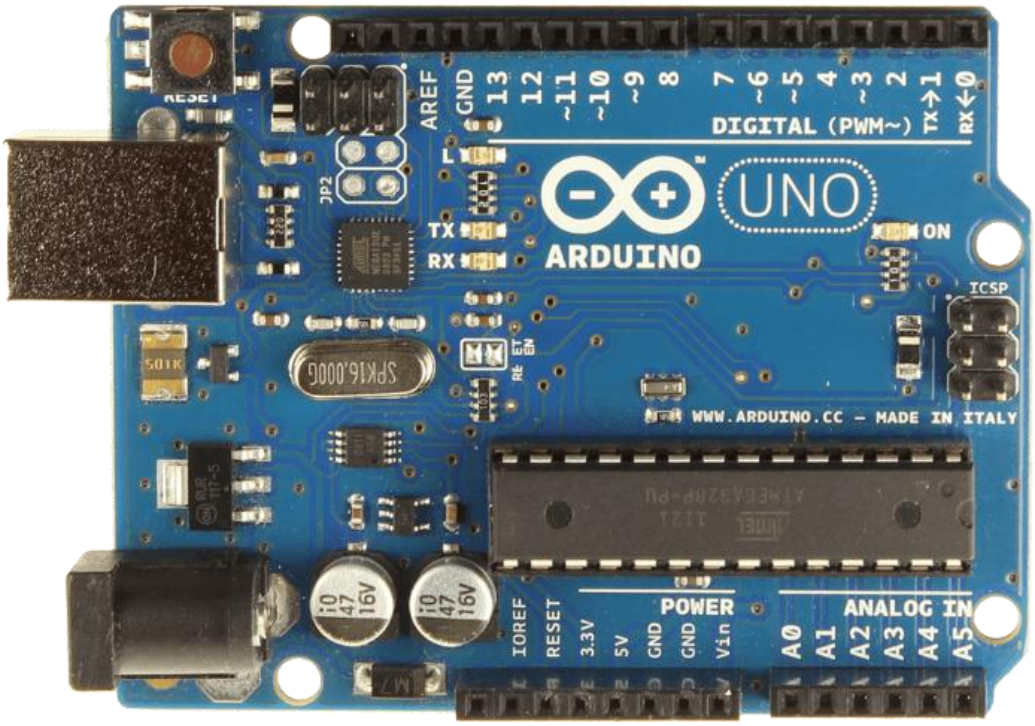
Figura 15 - Exemplo de cabo AV.

Fonte: [COSTA, 2013]

3 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar. As placas Arduino são capazes de ler entradas, como luz em um sensor, o clique de um botão ou uma mensagem do Twitter e transformá-la em uma saída ativando um motor, ligando um LED, publicando algo online. Pode-se dizer à sua placa o que fazer enviando um conjunto de instruções para o microcontrolador da placa. Para fazer isso, deve-se usar a linguagem de programação Arduino (baseada em Wiring), e o Arduino Software (IDE), baseado em Processing.

Figura 16 - Arduino UNO.



Fonte: [MCROBERTS, 2015]

Figura 17 - Exemplo de uma linha de código no software Arduino Software (IDE).

Fonte: Autoria própria.

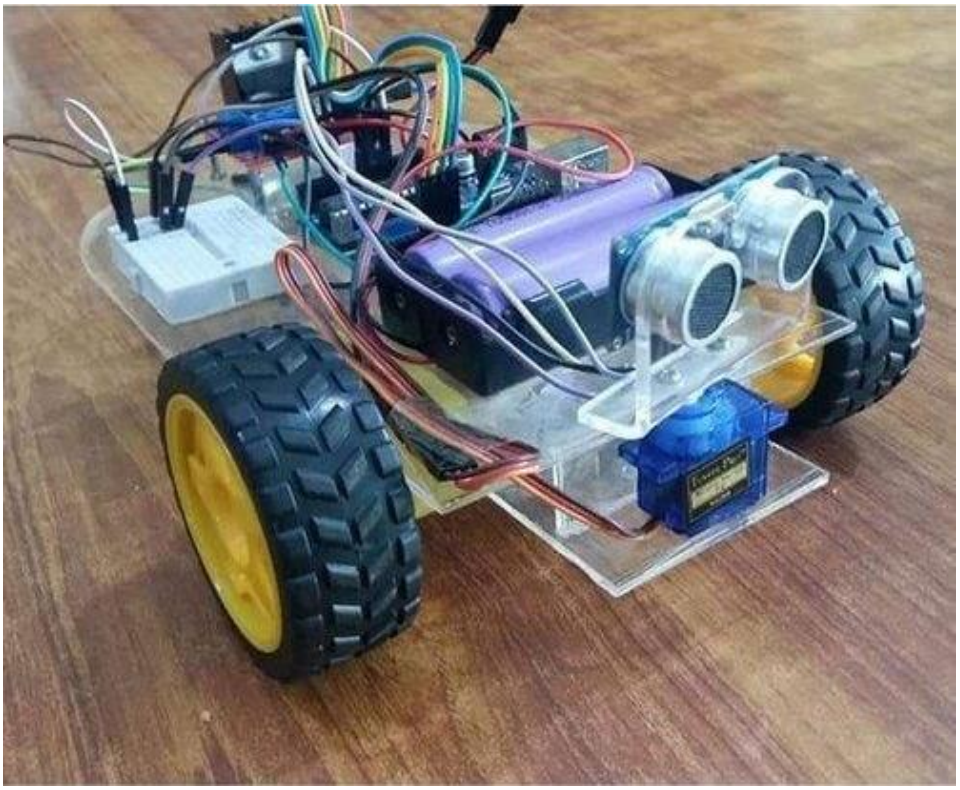
Ao longo dos anos, o Arduino tem sido o cérebro de milhares de projetos, desde objetos do cotidiano até instrumentos científicos complexos. Uma comunidade mundial de criadores, como estudantes, amadores, artistas, programadores e profissionais reuniram-se em torno desta plataforma de código aberto, suas contribuições somaram uma quantidade incrível de conhecimento acessível que pode ser de grande ajuda para novatos e especialistas.

O Arduino nasceu no Ivrea Interaction Design Institute como uma ferramenta fácil de prototipagem rápida, voltada para alunos sem formação em eletrônica e programação [MCROBERTS, 2015]. Assim que alcançou uma comunidade mais ampla, a placa Arduino começou a mudar para se adaptar às novas necessidades e desafios, diferenciando sua oferta de placas simples de 8 bits a produtos para aplicações IoT, vestíveis, impressão 3D e ambientes integrados. Todas as placas Arduino são totalmente de código aberto, permitindo que os usuários as criem de forma independente e, eventualmente, adaptem-nas às suas necessidades particulares [COSTA, 2013]. O software também é de código aberto e está crescendo por meio das contribuições de usuários em todo o mundo.

Professores e alunos o usam para construir instrumentos científicos de baixo custo, para provar os princípios da química e da física ou para iniciar a programação e a robótica. Designers e arquitetos constroem protótipos interativos, músicos e artistas usam para instalações e para experimentar novos instrumentos musicais. Os criadores, é claro, o usam para construir muitos dos projetos exibidos na *Maker Faire*, que é uma convenção de entusiastas do faça você mesmo iniciada pela revista Make em 2006, como exemplo. O Arduino é uma ferramenta fundamental para aprender coisas novas. Qualquer pessoa - crianças, hobistas, artistas, programadores - pode começar a mexer apenas seguindo as instruções passo a passo de um kit ou compartilhando ideias online com outros membros da comunidade Arduino.

Existem muitos outros microcontroladores e plataformas de microcontroladores disponíveis para computação física, como a Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, MIT's Handyboard e muitos outros, que oferecem funcionalidades semelhantes. Todas essas ferramentas pegam os detalhes complicados da programação do microcontrolador e os envolvem em um pacote fácil de usar. O Arduino também simplifica o processo de trabalho com microcontroladores, mas oferece algumas vantagens para professores, alunos e amadores interessados em relação a outros sistemas. As figuras 18 e 19 trazem exemplos de projetos utilizando o Arduino.

Figura 18 - Robô seguidor de linha controlado por Arduino.



Fonte: [OLIVEIRA, 2015]

Figura 19 - Acionador de uma lixeira através de um sensor ultrassônico.

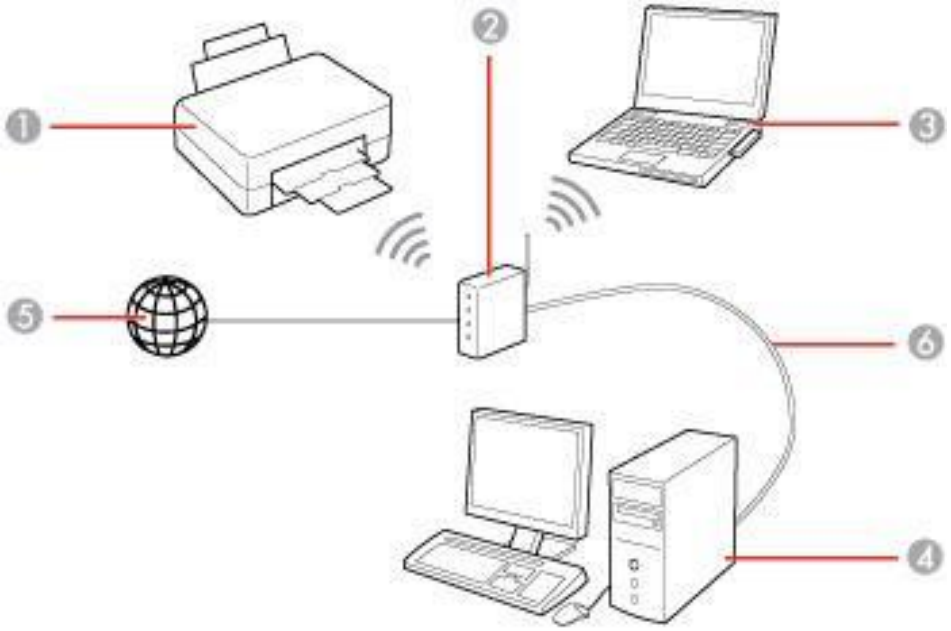
Fonte: [OLIVEIRA, 2015]

3.1 Comunicação sem fio

Com o intuito de facilitar algumas tarefas do dia-a-dia, a comunicação sem fio foi criada em meados do século XIX na Europa e vem ganhando novas atualizações durante os anos. Mais conhecida como wireless, esse tipo de comunicação é um dos modos de conectividade mais desejado entre dois ou mais dispositivos e seu princípio de funcionamento consiste no tráfego de dados por meio de ondas eletromagnéticas, como frequências de rádio, infravermelho e satélite, substituindo cabos e fios.

Uma das principais vantagens do uso da comunicação sem fio seria a diminuição das interferências, além do grande alcance e facilidade de manuseio, comparado aos cabos e fios. Em contrapartida, temos algumas desvantagens como a baixa taxa de transferência de dados e o custo elevado dos equipamentos responsáveis por essa comunicação. A figura 20 traz um exemplo de comunicação sem fio aplicada no cotidiano atual.

Figura 20 - Exemplo de comunicação sem fio aplicada no dia-a-dia.



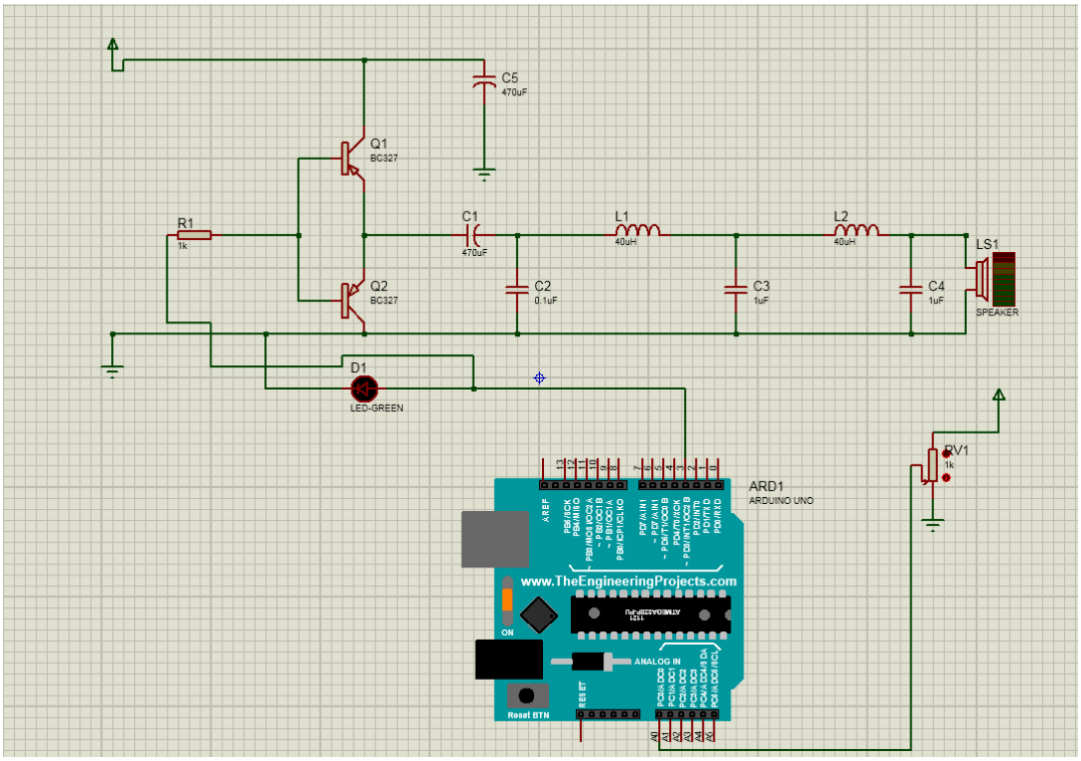
Fonte: [COSTA, 2013]

4 ANÁLISE PRÁTICA

Os transistores de um amplificador classe D atuam como interruptores, passando todo o seu tempo totalmente ligados ou totalmente desligados. Os amplificadores de classe D só podem criar ondas quadradas, moduladas por largura de pulso (Pulse Width Modulation - PWM) semelhantes aos pinos de I/O do Arduino, mas com uma corrente de saída maior. A corrente para o Arduino é limitada a 5mA (5V/1000 ohms) através de R1.

A amplificação do sinal é fornecida por Q1 e Q2, que são definidos como um estágio de saída push-pull. Uma pequena corrente fluindo para dentro ou para fora das bases dos transistores permite que uma corrente consideravelmente maior flua para dentro ou para fora de seus emissores. Podemos utilizar uma variedade de transistores PNP e NPN, nesse caso foi utilizado o BC327 pois é relativamente simples e fornece boas respostas no circuito. Na figura 21, encontra-se o esquemático do projeto.

Figura 21 - Esquemático do projeto no Proteus

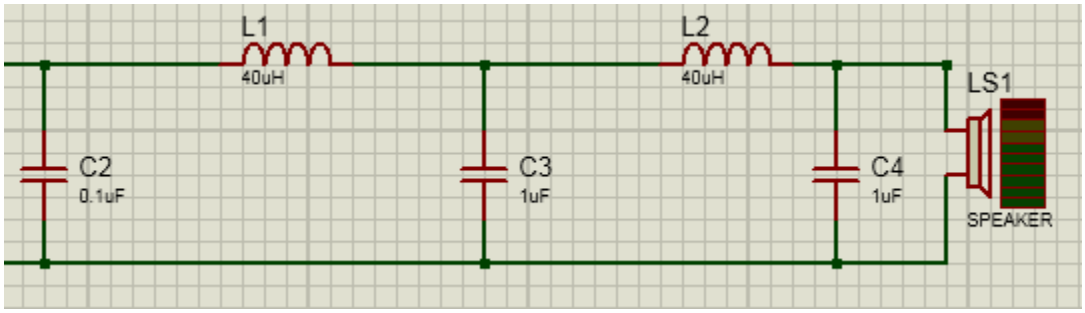


Fonte: Autoria própria.

4.1 Filtro Butterworth

O circuito formando um filtro passa-baixa, do tipo Butterworth, foi composto por L1, L2, C2, C3 e C4. O sinal digital modulado, por largura de pulso, é convertido em uma saída analógica por esses componentes. Na figura 22, encontra-se os componentes do filtro Butterworth do amplificador projetado.

Figura 22 – Filtro Butterworth do amplificador projetado.

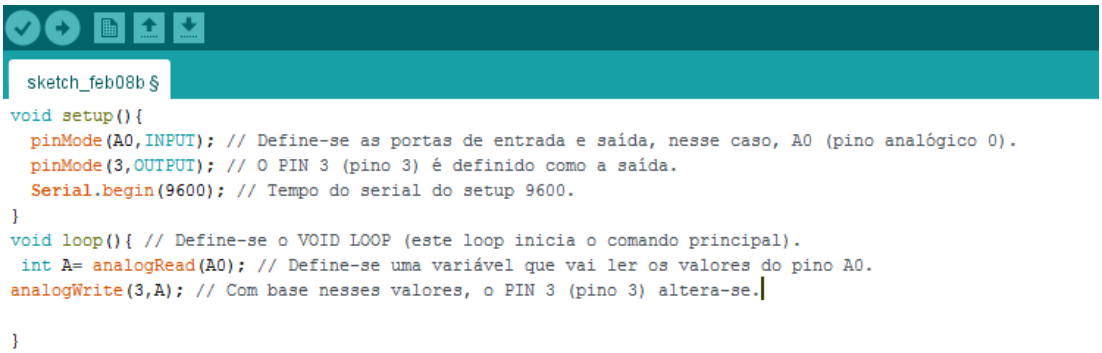


Fonte: Autoria própria

4.2 Código C++

Na figura 23, temos o código C++ referente ao circuito citado no item anterior:

Figura 23 – Código C++ do projeto.



```
sketch_feb08b §
void setup(){
  pinMode(A0,INPUT); // Define-se as portas de entrada e saída, nesse caso, A0 (pino analógico 0).
  pinMode(3,OUTPUT); // O PIN 3 (pino 3) é definido como a saída.
  Serial.begin(9600); // Tempo do serial do setup 9600.
}
void loop(){ // Define-se o VOID LOOP (este loop inicia o comando principal).
 int A= analogRead(A0); // Define-se uma variável que vai ler os valores do pino A0.
analogWrite(3,A); // Com base nesses valores, o PIN 3 (pino 3) altera-se.

}
```

Fonte: Autoria própria.

Primeiro, a configuração VOID no loop, basicamente define-se as portas de entrada e saída, nesse caso, A0 (pino analógico 0) como entrada e o PIN 3 (pino 3)

como saída. Depois disso, definimos o VOID LOOP (este loop inicia o comando principal, nesse caso, quer-se controlar o circuito usando o potenciômetro, portanto, define-se uma variável que vai ler os valores do pino A0). Com base nesses valores, o PIN 3 (pino 3) vai variar. Se L = 40uH C = 1uC, sendo que:

$$Fc = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}} \tag{10}$$

Então, Fc = 25,16KHz.

A tensão DC, total, para o circuito projetado é +/-28,2V. A resistência do alto-falante é de 4 ohms. Então, convertendo a tensão DC em RMS equivalente: VRMS = 28,2x0,707 = 19,99396 V.

Para descobrir a potência que precisamos, devemos usar:

$$\mathrm{P} = \frac{(VRMS)^2}{R} \tag{11}$$

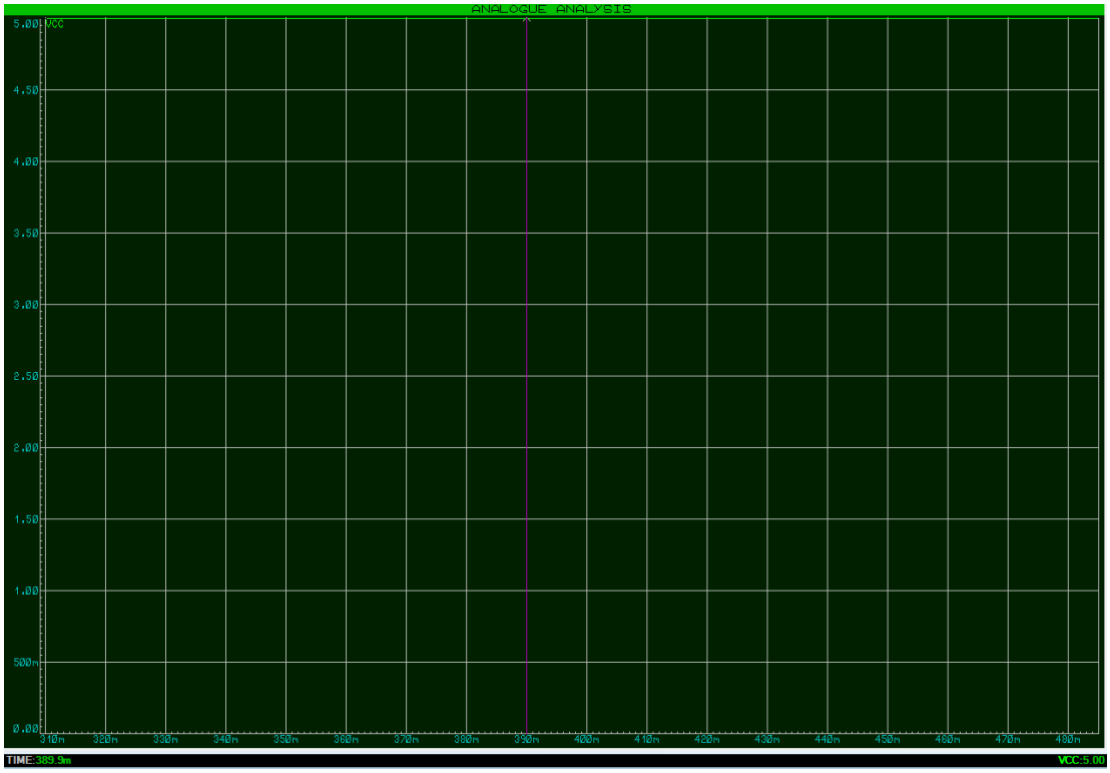
Portanto a potência máxima para esse amplificador é: P = 99,900025 Watts ou aproximadamente 100 Watts.

No capítulo 4, encontra-se a análise gráfica, juntamente com os resultados obtidos. Será analisado a tensão de entrada, a frequência de corte, o ganho, expresso em dB e as harmônicas do circuito.

4.3 Análise gráfica

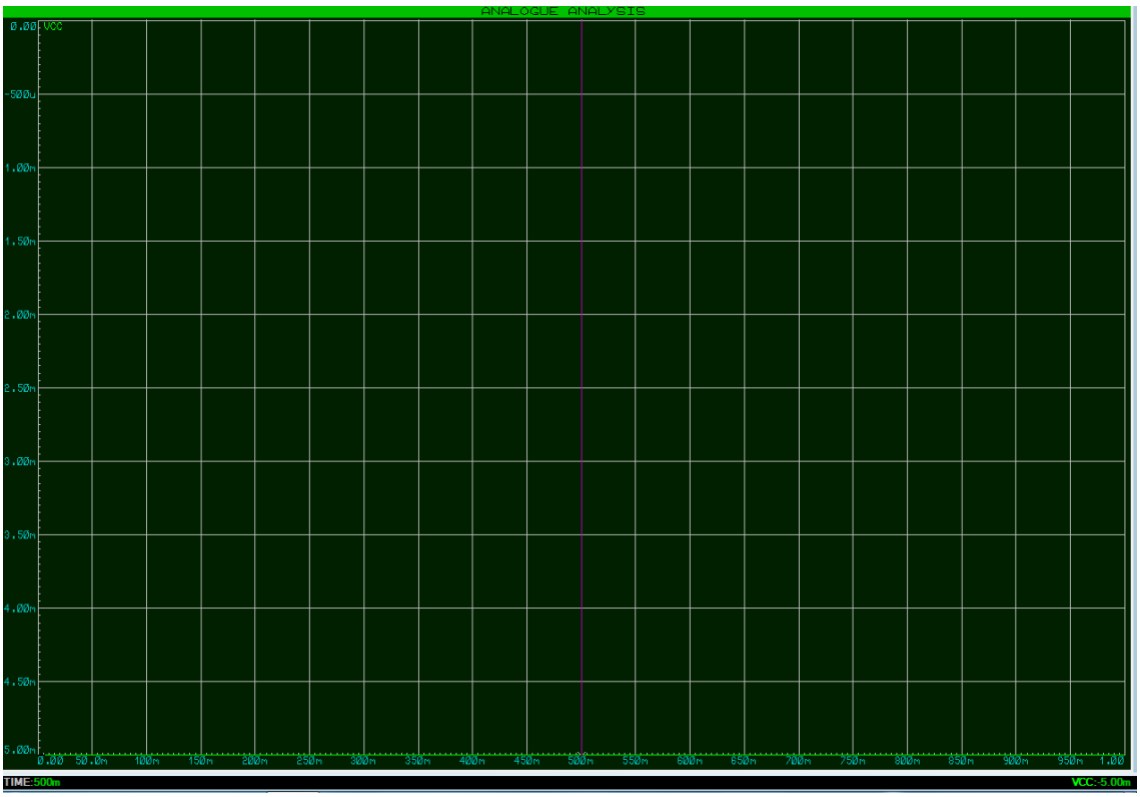
A tensão aplicada ao circuito é de 5V e -5V VCC, respectivamente, nas figuras 24 e 25. O Arduino trabalha com uma tensão máxima de entrada de 5V. Portanto, iremos utilizar essa tensão, que será alterada pelo potenciômetro. Não foi possível desenvolver o acesso remoto através do Bluetooth, por dificuldades encontradas na programação. Nesse caso, o potenciômetro, foi responsável pela variação.

Figura 24 - Tensão aplicada de 5V VCC.



Fonte: Autoria própria

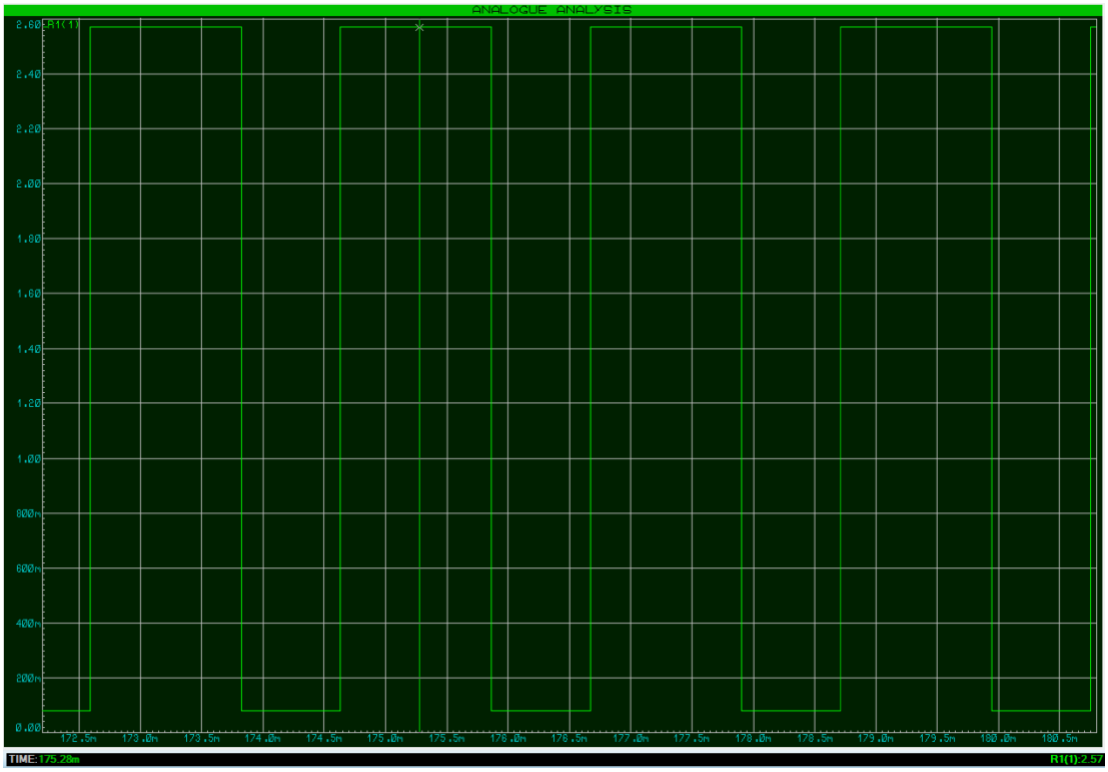
Figura 25 - Tensão aplicada de -5V VCC.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 26, tem-se a onda do sinal digital (entrada), em 2,57V, que foi definido usando o potenciômetro do circuito. O formato da onda segue o padrão binário de 0 e 1.

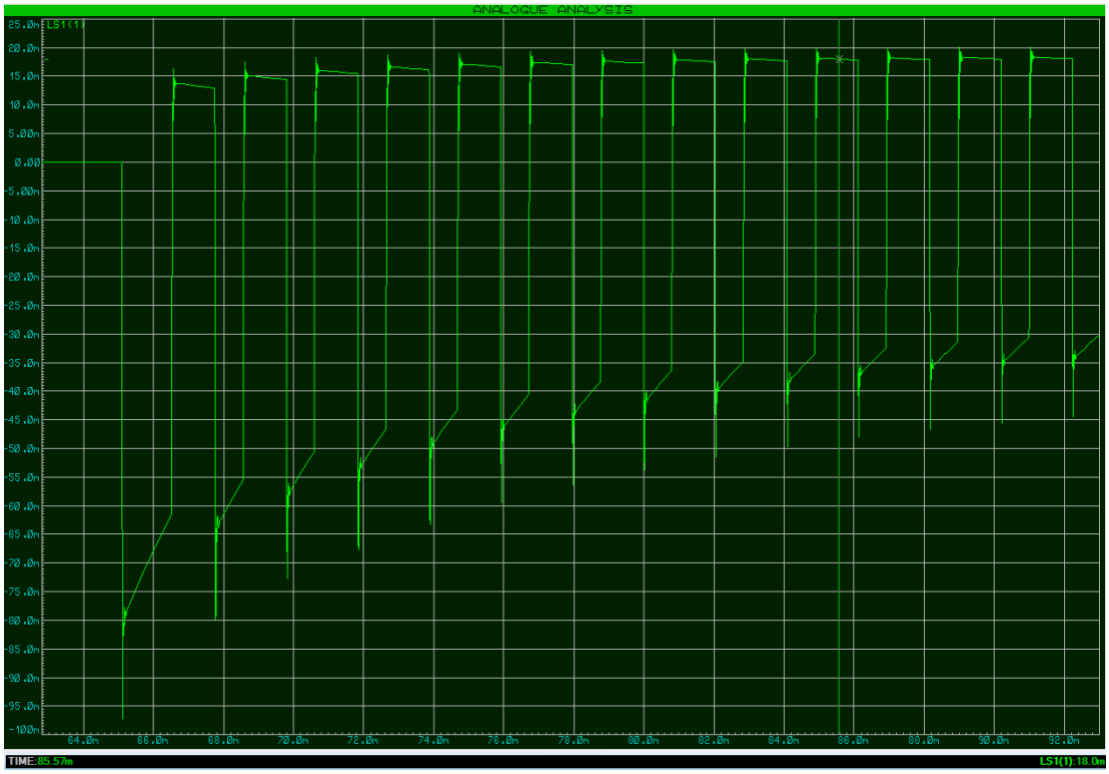
Figura 26 - Onda do sinal digital (IN), em 2,57V.



Fonte: Autoria própria.

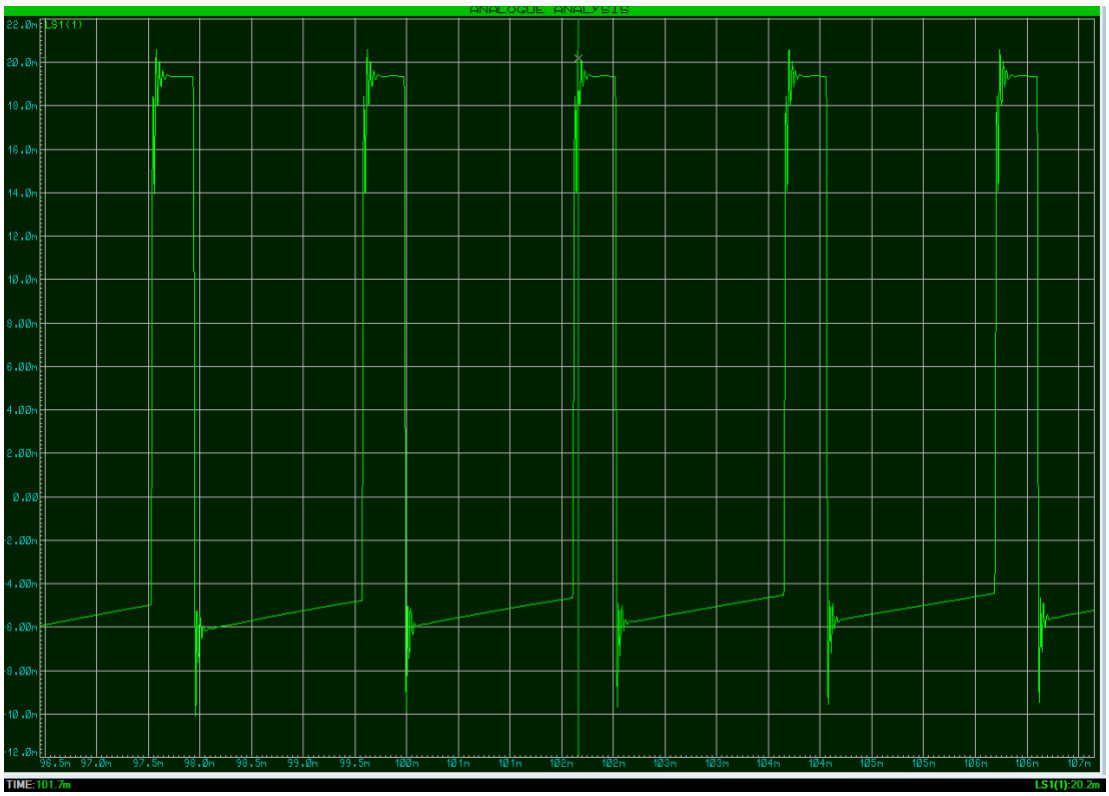
Na figura 27, tem-se a onda do sinal analógico (saída), que foi definido usando o mesmo parâmetro da figura 26. Vemos pela figura 27, as características analógicas do circuito. Pode-se citar os ruídos obtidos na conversão entre digital/analógico, além das tensões de Ripple, resultado da variação de um sinal em tensão contínua.

Figura 27 - Onda do sinal analógico amplificado (OUT).



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Onda do sinal analógico amplificado (OUT), ampliada.



Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo do ganho de tensão, vamos utilizar a equação 4:

$$Ganho\ de\ tensão(dB) = 20log|A_v| \tag{4}$$

Para o ganho de tensão, tem-se, através da equação 1:

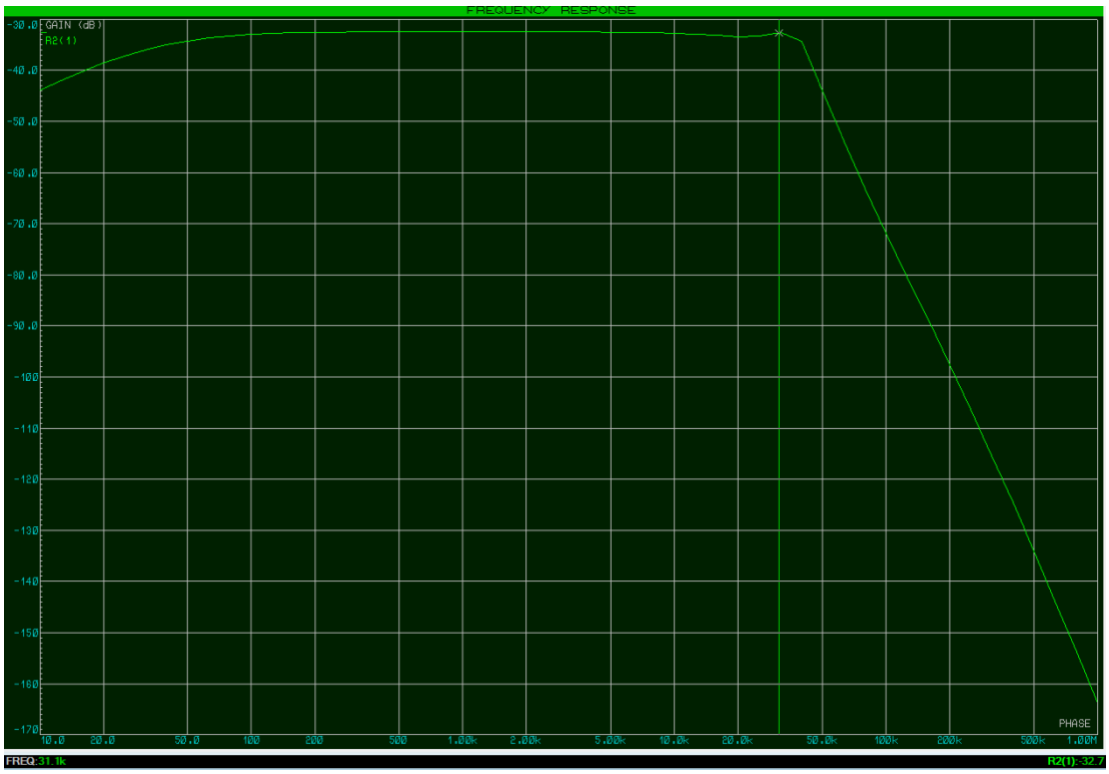
$$v_0(t) = Av_1(t) \tag{1}$$

Portanto:

$$Ganho\ de\ tensão(dB) = 20log|A_v| = 20\log|7{,}0038| = 16{,}9\ dB$$

Na figura 29, temos a frequência de corte estabelecida pelo circuito. É possível observar o comportamento do filtro passa-baixa do tipo Butterworth, em uma frequência de corte de aproximadamente 31 kHz (a primeira atenuação observada começa próximo a 25kHz).

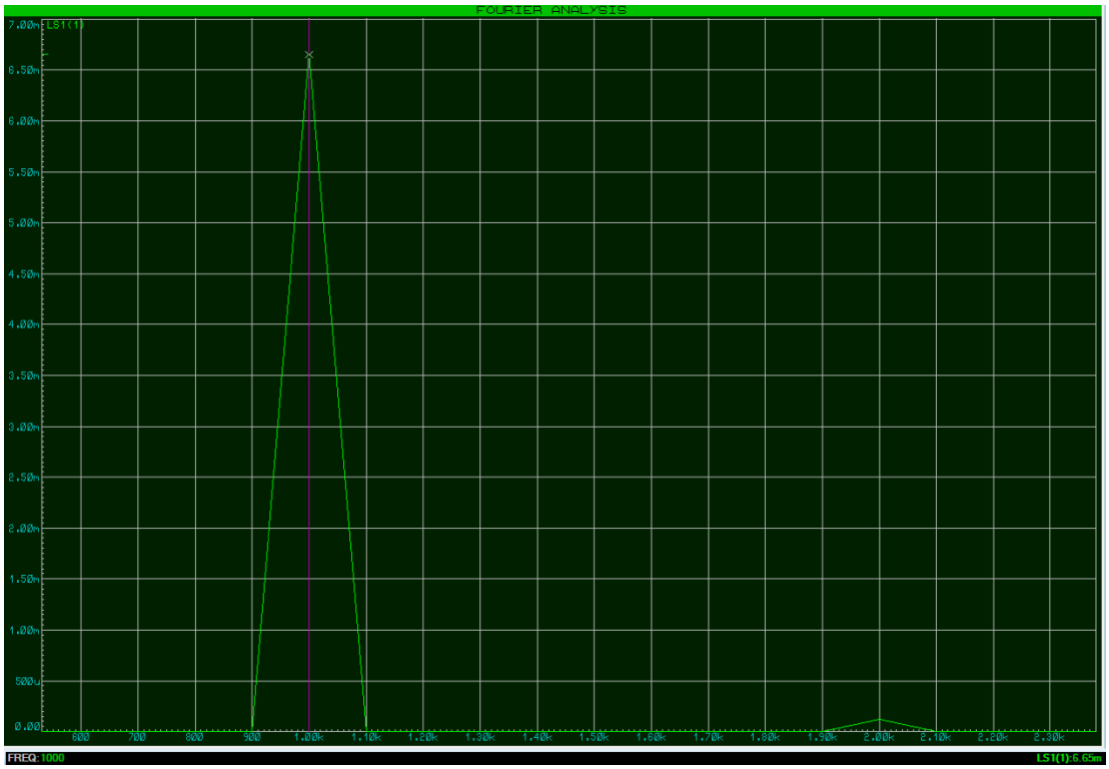
Figura 29 – Frequência de corte do circuito projetado.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 30, encontra-se o gráfico de Fourier, mostrando a frequência fundamental em 1kHz e a segunda harmônica em 2kHz.

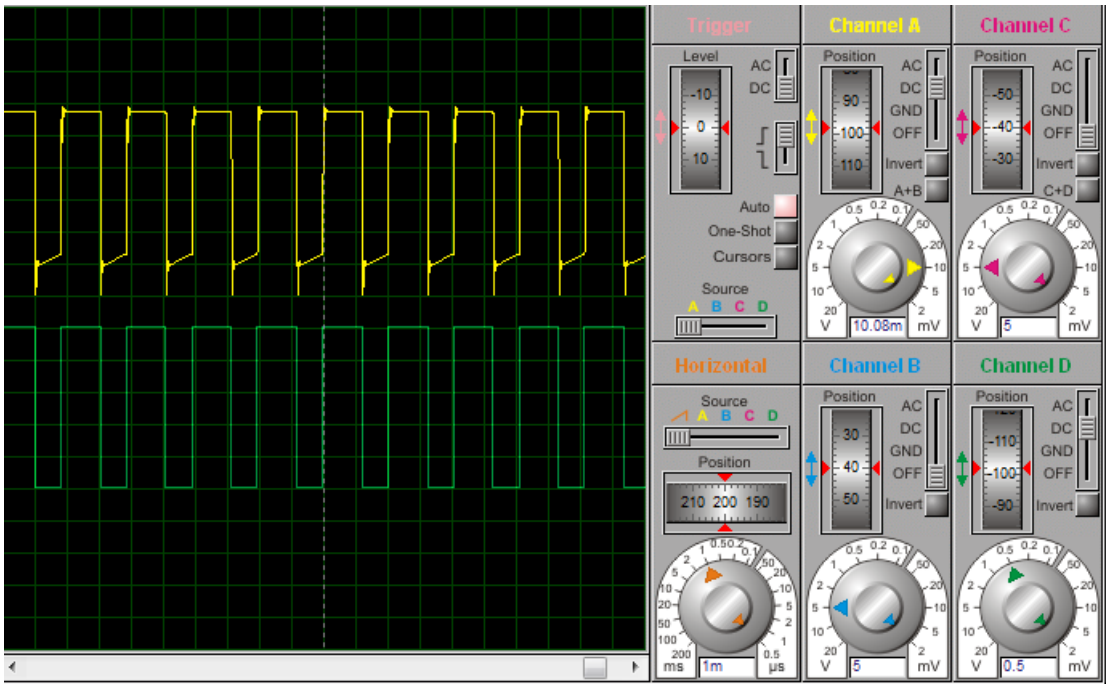
Figura 30 – Frequência fundamental em 1kHz e a segunda harmônica em 2kHz.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 31, o osciloscópio mostra a diferença das duas ondas, sendo a verde o sinal de entrada digital e a amarela o sinal de saída analógico. Essa é apenas uma comparação visual do comportamento de cada sinal.

Figura 31 - Comparação dos sinais no osciloscópio.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um estudo e implementação de um amplificador classe D com adendo para ajustes de ganho por meios remotos. O estudo começa por uma revisão bibliográfica das diferentes classes de amplificadores de áudio, contendo uma breve explicação de cada uma, seguindo para uma detalhada explicação do amplificador enfatizado pelo trabalho. O circuito do amplificador proposto tem seu funcionamento comprovado através de diversas simulações, bem como da implementação prática de um protótipo. Com todo o circuito funcionando adequadamente, foi realizada uma análise, especificando os parâmetros do mesmo.

Levando-se em conta o que foi observado, podemos dizer que as aplicações dos amplificadores operacionais estão presentes nos sistemas eletrônicos de controle industrial, na instrumentação industrial, na instrumentação médica, nos equipamentos de telecomunicação, nos equipamentos de áudio, nos sistemas de aquisição de dados, etc. Suas aplicações podem variar muito, porém são mais encontradas em amplificadores de áudio, tanto automotivo quanto musical.

Os amplificadores classe D também são conhecidos como amplificadores chaveados, por não operarem continuamente. Esta classe de operação é uma forma de amplificação que utiliza sinais pulsados (digitais), que permanecem ligados (utilizando potência) por um curto intervalo de tempo e desligados por um longo intervalo. Isso exige a utilização de técnicas digitais de modulação para possibilitar a obtenção de um sinal que varie sobre um ciclo completo (utilizando circuitos de amostragem e retenção) para recriar a saída a partir de vários trechos do sinal de entrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOYLESTAD, Robert L. NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 671 p.

COSTA, Cesar da. **Projetos de Circuitos Digitais com FPGA**.1ª ed. São Paulo: Érica, 2013. 208 p.

FLOYD, Thomas. **Sistemas Digitais: Fundamentos e Aplicações**. 9ª ed. São Paulo: Artmed, 2007. 888 p.

MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica Vol. II**. São Paulo: McGraw-Hill, 1987. 283 p.

MARQUES, Angelo Eduardo B.; CRUZ, Eduardo Cesar A.; CHOUERI JÚNIOR, Salomão. **Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores** - Estude e Use. 12ª ed. São Paulo: Érica. 408 p.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. 2ª ed. São Paulo: Novatec, 2015.

MUSITECH. **“Amplificadores de Áudio, Parâmetros principais”**. Disponível em: <http://www.musitec.com.br/blogs/classicos/?c=76> Acesso: 28/09/2021.

OLIVEIRA, Claudio Luis Vieira. ZANETTI, Humberto Augusto Piovesana. **Arduino Descomplicado: Como Elaborar Projetos de Eletrônica**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2015.

PERTENCE JÚNIOR, Antonio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 6ª ed.Porto Alegre: Bookman, 2003. 302 p.

SEDRA, A.S.; SMITH, K.C. **Microeletrônica**. 5ª ed. Saunders College Publishing, 2007.