



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Dissertação

Desenvolvimento de um amplificador de som

José Luis Espanhol Ramos

Orientador(es) | Fernando Manuel Janeiro

Luís Filipe Soldado Granadeiro Rosado

Évora 2021



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Dissertação

Desenvolvimento de um amplificador de som

José Luis Espanhol Ramos

Orientador(es) | Fernando Manuel Janeiro

Luís Filipe Soldado Granadeiro Rosado

Évora 2021



A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Mouhaydine Tlemcani (Universidade de Évora)

Vogais | Fernando Manuel Janeiro (Universidade de Évora) (Orientador)
Frederico José Lapa Grilo (Instituto Politécnico de Setúbal) (Arguente)

Desenvolvimento de um amplificador de som

Resumo

Este trabalho corresponde a dissertação de final de Mestrado de engenharia mecatrónica, e tem como âmbito o estudo sobre o funcionamento de um amplificador de som.

O objetivo inicial desta dissertação é a construção de um amplificador de som, para tal tivemos de estudar os diversos tipos de topologia de circuito, ou seja, valvulado, transistorizado e com o uso de amp-op, também tivemos de estudar as fases de amplificação, pré amplificação e amplificação de potência e as classes de amplificação.

Em seguida foi escolhido um circuito de amplificação, neste caso com o uso de amp-op, e em seguida foi implementado. Para ver a qualidade do circuito desenvolvido, tivemos de fazer a medição da THD, ou seja, a taxa de distorção harmónica.

Sound amplifier development

Abstract

This work is the result of the final dissertation of the master's degree of mecatronic engineering and it's about the study of the operation of a sound amplifier.

The main objective of this dissertation is the construction of a sound amplifier, for that we had to study the different topology of circuit, such as the, tube, transistorized and with the use of op-amp, we also need to study the amplification phases, that means the pre-amplification stage and power amplification stage, we also study the diferent classes of amplifier.

Then an amplification circuit was chosen, in this case the one with an op-amp, and then we implemented. To see the quality of the developed circuit, we had to measure the THD, the total harmonic distortion.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Amplificadores	2
1.2	Objetivo	3
1.3	Estrutura	4
2	História dos amplificadores	5
2.1	Aparecimento das válvulas	6
2.1.1	Surgimento da rádio	6
2.1.2	Lee de Forest	7
2.1.3	Vacuum triode tube ou Audion	9
2.2	Aplicação das válvulas em amplificadores	11
2.2.1	Rickenbacker International Corporation	11
2.2.2	Rickenbacker "electro" amplificador	13
2.3	Aparecimento dos transístores	14
2.3.1	Primeiro transístor	14
2.3.2	John Bardeen	15
2.3.3	William Shockley	17
2.3.4	Walter Brattain	19
2.4	Aparecimento de amplificadores operacionais	20
2.4.1	Primeiro Amp-OP	20
2.4.2	Aplicação em circuitos de amplificação	21
2.5	Surgimento de marcas importantes	22
2.5.1	Fender	22
2.5.2	Vox	27
2.5.3	Marshall	29
3	Amplificadores de som	31
3.1	Arquitetura de amplificadores	32
3.1.1	Diagrama de estados	32
3.1.2	Pré amplificação	33
3.1.3	Amplificação de potência	34

3.1.4	Classe	35
3.2	Tipos de amplificadores	41
3.2.1	Amplificadores valvulados	41
3.2.2	Amplificadores transistorizados	43
3.2.3	Amplificadores operacionais	44
3.2.4	Análise comparativa	47
4	Circuito amplificador desenvolvido	49
4.1	Amplificador transistorizado	50
4.2	Amplificador com amp-op	58
4.3	Validação das arquiteturas por simulação	60
4.4	Circuito desenvolvido	61
5	Resultados	63
5.1	Distorção Harmónica total	64
5.2	Sistema de medição da distorção	66
5.3	Medição	68
6	Conclusão	73

Capítulo 1

Introdução

1.1 Amplificadores

Nesta dissertação efetua-se um estudo sobre amplificadores, que, muito basicamente, é um aparelho eletrônico capaz de pegar num sinal elétrico muito pequeno, e torna-lo grande o suficiente, para alimentar uma coluna, seja esta externa ou interna, que irá torna-lo num sinal sonoro audível o suficiente para um determinado ambiente, seja este um palco para 10000 pessoas, seja para apenas um quarto com apenas uma pessoa.

Existem três tipos de amplificador, os valvulados, transístorizados e operacionais, onde a principal diferença entre os três é a a peça que utilizam para fazer a amplificação de sinal, as válvulas, os transístores e amp-op, respetivamente.

Será efetuado um resumo da evolução histórica dos mesmo, e da sua importância no desenvolvimento da cultura Jazz, Blues, Rock, entre muitas outras, pois o aparecimento de amplificadores permitiu que o tamanho das bandas fosse diminuído. Antes das do aparecimento desta tecnologia os concertos ao vivo eram praticamente só em formato de orquestra, com muitos músicos, e esta inovação permitiu o aparecimento, por exemplo, de power trios, que basicamente são uma banda com três instrumentos tocado por apenas três músicos, como é o caso dos Queen, Led Zeppelin, Jimmy Hendrix Experience entre muitos outros. E esta alteração fez, com que os concertos fossem mais rentáveis, pois o lucro será dividido por menos pessoas, havendo assim a possibilidade de aparecer mais e mais bandas capazes de inovar e criar estilos novos que derivavam dos anteriores.



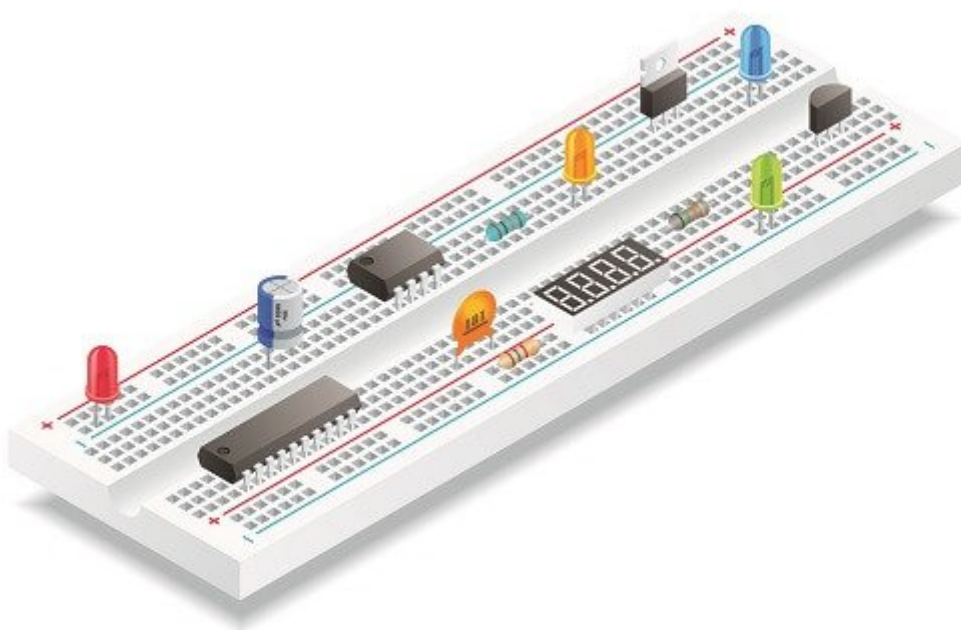
Fonte: <https://www.freeimages.com/pt/premium/amplifier-on-stage-1985306>

1.2 Objetivo

Esta dissertação tem o intuito falar sobre as diversas variantes de montagem de circuito de amplificação, e depois escolher uma, ou até várias, e implementar um circuito amplificador em bread board, de preferência, tendo assim uma parte mais prática nesta dissertação.

Depois de implementar o circuito será analisada a sua qualidade, neste caso o THD, que é a taxa de distorção harmónica, deste modo posso testar a fiabilidade do circuito e tirar-se-a conclusões com isto.

Para fazer este teste, usa-se as funcionalidades do LabView, que tem uma função que calcula o THD, vai-se ligar o circuito amplificador a um gerador de sinais, que servirá como sinal de entrada, que deste modo é mais controlável, e o sinal de saída do amplificador será ligado à myDAQ, que por cabo usb irá contactar com o computador, e será analisado pelo Labview o valor do THD, para cada frequência e tensão, de modo a tirar conclusões sobre este circuito.



1.3 Estrutura

Esta dissertação é dividida em 6 capítulos, o primeiro é apenas um capítulo introdutório. Tem como objetivo elucidar sobre o que irá acontecer no decorrer da dissertação. Em seguida temos um capítulo, que serve como enquadramento histórico, nele vai-se falar sobre o aparecimento de amplificadores. Para tal é importante perceber quem inventou, e como, as peças fundamentais de cada amplificador, ou seja, as válvulas, inventado em 1906 por Lee de Forest. Este equipamento foi o principal impulsionador do que se viria a chamar de broadcast e no surgimento de rádio, sendo peça chave e nos amplificadores valvulares. Os transístores, criados a 1946 por um grupo de 3 engenheiro, John Bardeen, William Shockley e Walter Brattain, por fim o Amp-OP, criado em 1941 pelo Dr. Karl Swartzel. No final deste capítulo vai-se falar um pouco sobre o surgimento das 3 principais marcas de amplificador, a Fender, Vox e Marshall.

No terceiro capítulo, vai-se falar sobre o funcionamento básico de qualquer amplificador, havendo então duas fase de amplificação principais, a pré amplificação e a amplificação de potência, sendo que estas poderão ser construídas com base em várias classes, mas as principais são a classe A,B,AB e C, sendo que vai-se abordar as sua diferenças. Na parte final deste capítulo iremos explorar as diferenças entre cada topologia de amplificador, bem como as suas vantagens e desvantagens, vai-se também tirar uma conclusão sobre qual será a melhor.

No quarto capítulo vai-se dar início à parte prática da dissertação, explicando os circuitos desenvolvidos, como foram desenvolvidos e o porquê de cada escolha bem como o resultado final.

No quinto capítulo, vai-se dar inicio ao estudo da THD, taxa de distorção harmónica, de modo a perceber como funciona o amplificador implementado no capítulo anterior, vai-se explicar as medições feitas, e a que conclusões se pode chegar com as mesmas.

O sexto, e ultimo, capítulo será a conclusão final do capítulo anterior, ou seja, o estudo da THD, vai-se falar sobre as facilidades e dificuldade de toda a dissertação, e uma análise geral sobre todo o trabalho realizado.

Capítulo 2

História dos amplificadores

2.1 Aparecimento das válvulas

2.1.1 Surgimento da rádio

Os primeiros passos para a descoberta da rádio foram dados em 1863 quando em, Cambridge, James Clerck Maxwell demonstrou a provável existência de ondas eletromagnéticas unificando todas as teorias até então descobertas. Maxwell era professor de física experimental, nascido em Edimburgo a 13 de junho de 1831, tendo falecido em Cambridge a 5 de novembro de 1879 sem nunca ter comprovado a sua teoria experimentalmente [1].

A partir desta descoberta vários outros cientistas se interessaram pelo assunto, entre eles destacara-se, Henrich Rudolph Hertz, um jovem estudante alemão nascido em Hamburgo a 22 de fevereiro de 1857, que impressionado pela teoria de Maxwell, construiu um aparelho em 1887 onde se verificava a deslocação de eletricidade através do ar. Assim Hertz conseguiu transportar energia elétrica entre dois pontos sem utilizar fios, provando então a teoria de Maxwell. Este aparelho produzia correntes alternadas de período extremamente curto, que variavam rapidamente, com esta experiência Hertz provou experimentalmente a teoria de Maxwell que a eletricidade viaja através da atmosfera em forma de onda mas não percebeu as vantagens desta experiência, que tornara possível a comunicação sem fios, Hertz faleceu a 1 de janeiro de 1894, em Bonn [2].

No entanto, o primeiro sistema de rádio surge por intermédio de Nikola Tesla, um cientista nascido na Sérvia, em Smiljan a 10 de julho de 1856, que contribuiu do ponto de vista prático e experimental para a descoberta do rádio. Em 1895, o italiano Guglielmo Marconi teve conhecimento das espantosas descobertas de Hertz e do seu sistema de rádio, então Marconi decide falar com Tesla para lhe pedir detalhes sobre a construção do sistema de rádio, para assim, o construir e registar a invenção como sendo sua, mas Tesla já o tinha registado antes. No entanto, existem algumas dúvidas até aos dias de hoje sobre qual destes dois cientistas inventou o rádio[3]. Em 1896, Marconi demonstra o funcionamento dos seus aparelhos de emissão e receção de sinais na própria Inglaterra e foi nesta altura que percebeu a importância comercial da telegrafia sem fios. Marconi foi o primeiro homem a enviar uma mensagem para o outro lado do oceano e devido à sua atividade e negócio, ele contribuiu para que a rádio se desenvolvesse, criando até a primeira companhia de rádio, mas não se imaginava, até então, a possibilidade do rádio transmitir a voz do ser humano, pois para tal era necessário um aparelho que amplifica-se o sinal elétrico, para que pudesse ser ouvido, de preferência a gasto reduzido, e foi então que em 1906 Lee De Forest inventou o audion, a primeira válvula amplificadora de sinal [4].

2.1.2 Lee de Forest

Não podemos falar do aparecimento de válvulas de amplificadores, da rádio em geral, sem falar de Lee De Forest (figura 2.1) um inventor/físico americano, autoproclamado de “pai da rádio”, foi ele o inventor do famoso audion ou vacuum triode tube, em 1906, tornando-se uma peça fundamental para a rádio, televisão, radares e até computadores, tornando possível o aparecimento da rádio ao vivo/ broadcast, sendo portanto a peça fundamental dos amplificadores anos mais tarde. Lee de Forest nasceu em Council Bluffs a 26 de agosto de 1873, tendo falecido em Hollywood a 30 de junho de 1961, filho de Anna Margaret e Henry Swift DeForest, o seu pai era um ministro de uma igreja, e anos mais tarde tornou-se presidente da American Missionary Association's Talladega College for Negroes, um colégio privado destinado a educar criança negras, e por isso o pai de Forest tinha esperanças que o filho lhe seguisse as pisadas e um dia se torna-se pastor de uma igreja, mas o gosto pela física revelou-se muito cedo e deitou por terra as esperanças do pai. Aos 13 anos de idade já era um entusiasta atento às novas invenções, como por exemplo a locomotiva a vapor, sendo o seu apetite por conhecimento insaciável. Anos mais tarde, em 1893, entrou na Sheffield Scientific School of Yale University, onde em 1899 se tornou doutorado em física, altura em que ele se tornou interessado em eletricidade, em particular pelo estudo da propagação de ondas eletromagnéticas, sendo esse o seu tema da dissertação de doutoramento, tendo sido possivelmente a primeira tese de doutoramento feita sobre o assunto em toda a América [4].

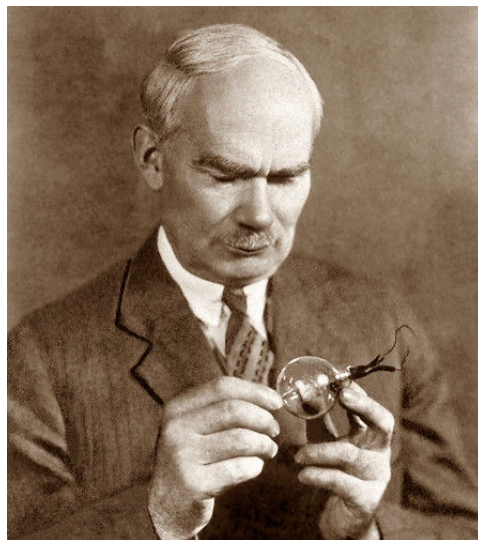


Figura 2.1: lee de forest

Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Lee-De-Forest>

O seu primeiro trabalho foi na Western Electric Company, em Chicago, no departamento de geradores elétricos, tendo subindo de posto na empresa, chegando ao sector dos telefones, e mais tarde ao departamento de investigação laboratorial. Ao mesmo tempo que trabalhava na Electric Company, ele desenvolvia os seus próprios projetos, e em 1902 fundou a De Forest Wireless Telegraph Company, tendo como seu principal investidor Abraham White que viu nas experiências de De Forest uma grande oportunidade de negócio, investindo seriamente na publicidade. Por exemplo, em 1903, equiparam um carro com um sistema de wireless, e anos mais tarde construíram uma torre de cerca de 90 metros de altura para transmissão de sinal. Mas apesar das boas ideias, e de um grande poder de marketing, as suas ideias não eram aplicáveis ao “homem comum” da altura, e em 1906 a companhia declarou insolvência, obrigando De Forest a embarcar em outro projeto, e nesse mesmo ano De Forest começou a desenvolver o seu grande projeto, o Audion [5].

2.1.3 Vacuum triode tube ou Audion

O vacuum triode tube, ou mais conhecido por Audion (figura 2.2), é o primeiro dispositivo eletrônico com a função de amplificar um sinal eletrônico, desenvolvido por Lee De Forest em 1906. O dispositivo consiste numa cápsula de vidro, idêntica à de uma lâmpada incandescente, e 3 condutores elétricos, daí o nome triode, o filamento, a grelha e uma placa [6].

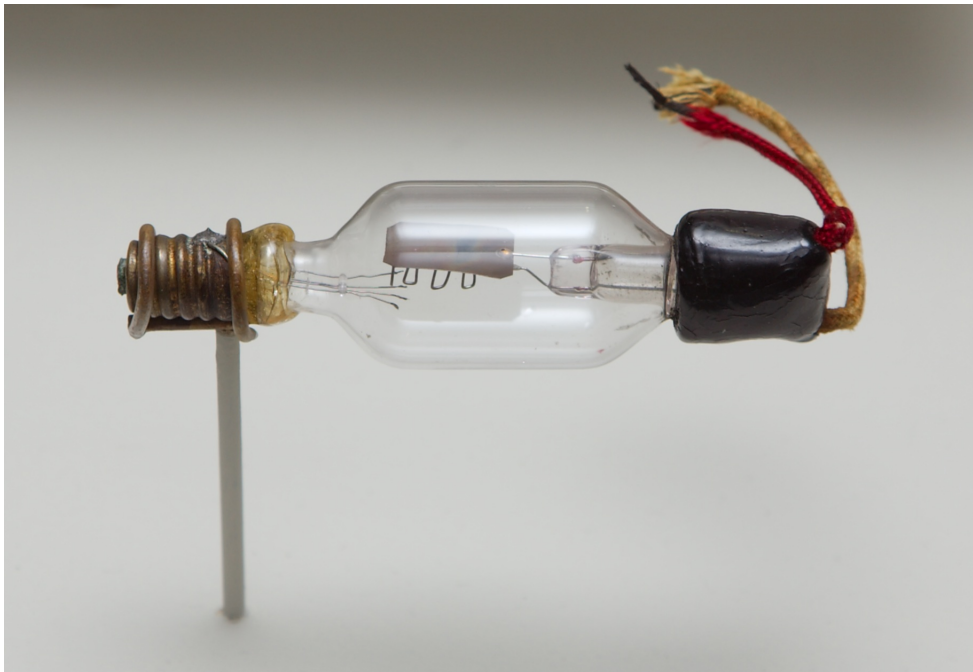


Figura 2.2: audion

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Audion>

Desde o meio do século 19 que se sabe que os gases inflamáveis são bons condutores de eletricidade, descoberta essa que se veio a revelar-se importante para o aparecimento de lâmpadas incandescentes, Por muito estranho que parece, foi nas lâmpadas incandescentes que De Forest se baseou para criar o Audion. De Forest descobriu que se enrolasse um fio á volta do casquilho, o dispositivo poderia servir como detetor de sinais de rádio. Além disto, De forest colocou uma placa de metal dentro da capsula da lâmpada que estava ligada ao terminal positivo de uma fonte de 22 volts (funcionando como um ânodo), sendo que a parte negativa era ligada à uma ponta do filamento (sendo então o cátodo). Quando o sinal é aplicado no enrolamento, isto faz com que os eletrões viajem da parte positiva para a negativa, a uma frequência igual á do sinal inicial, porém amplificado. No Audion, bem como

em qualquer outra válvula de amplificação, o cátodo (parte negativa) emite elétrons que viajam para o ânodo (parte positiva), como seria de prever, mas entre os dois existe uma grelha de controle que funciona como filtro. Se a grelha tiver uma tensão mais negativa, os elétrons irão ser repelidos de volta para o cátodo, mas se a sua tensão for positiva, a grelha vai deixar passar os elétrons viajarem para o ânodo, criando uma onda igual á original, porem amplificada [7].

Quando o sinal é aplicado no enrolamento, causa distorções na corrente, o que se traduzem em sinais sonoros amplificados do original, que podem ser reproduzidos em fones ou numa coluna de som. Na experiência original De Forest utilizou uns fones [6].

2.2 Aplicação das válvulas em amplificadores

2.2.1 Rickenbacker International Corporation

A Rickenbacker International Corporation (RIC) foi a primeira empresa criada com o objetivo de criar instrumentos musicais completamente elétricos, fundada a 1931 por Adolph Rickenbacker e George D. Beauchamp, que foram pioneiros na criação das primeiras guitarras elétricas. O primeiro amplificador de som, destinado ao uso em guitarras elétricas, foi o Rickenbacker "electro" [8], que viria a ser usado por guitarristas de slide, como Alvin Rey (figura 2.3) um dos pioneiros no uso de amplificadores em guitarras, pois á medida que a música era popularizada, havia a necessidade de ter mais volume, com o objetivo de ter espetáculos em recintos maiores, e com mais público, e foi assim que nasceu o "electro" em 1931.



Figura 2.3: Alvin Rey

Fonte: <https://www.historyforsale.com/alvino-rey-autographed-inscribed-photograph/dc177771>

Hoje em dia a Rickenbacker não é uma empresa tão popular como seria de esperar, pois, para além deste amplificador, a Rickenbacker é famosa pelo seu baixo (figura 2.4) e, em especial, pelo uso de guitarras Rickenbacker pela maior banda de sempre, os Beatles, como podemos ver na figura 2.4 em que os Beatles, num concerto em 1962, George Harrison e John Lennon estão a usar uma Rickenbacker. Havendo mais exemplos de guitarristas que usem estes instrumentos, como o Edge dos U2, Tame Impala entre outros. No entanto a companhia é ainda mais conhecida pelos seus baixos, usados por nomes como Paul McCartney dos Beatles, Chris Squire dos Yes e Roger Waters dos Pink Floyd.



Figura 2.4: The Beatles em 1962 com guitarras Rickenbacker
Fonte: <https://www.beatlesbible.com/1963/10/04/television-ready-steady-go/>

2.2.2 Rickenbacker "electro" amplificador

Em 1932, o Rickenbacker "electro" amplificador (figura 2.5) foi lançado, com o objetivo de servir guitarristas de slide, como o Alvin Rey, tornando-se num dos amplificadores mais consistentes e confiáveis até então desenhados, começando assim a sua produção em massa o que estabeleceu a marca durante vários anos. Isto que pode explicar a atitude um pouco despreocupada nos anos seguintes, fazendo com que a marca seja ultrapassada por outras mais consistentes. Independente disso a verdade é que a Rickenbacker é uma marca super importante no mundo da música como o conhecemos, e, conhecendo a influencia que a música tem, em toda a cultura em geral [8].



Figura 2.5: Rickenbacker "electro"

Fonte: <https://www.vintageguitar.com/1941/electrorickenbacher-amps/>

2.3 Aparecimento dos transístores

2.3.1 Primeiro transístor

O vacuum triode foi uma tecnologia revolucionário na historia da rádio, mas no entanto tinha vários problemas, como o seu tamanho, o gasto de energia e sobretudo o facto de aquecer após algumas horas de utilização, chegando até a reventar em alguns caso, o que obrigava a sua substituição. Sendo assim foi necessário desenvolver uma nova tecnologia, que se vinha a revelar tanto ou mais revolucionária: o transístor. É então que a Bells Labs, uma empresa de telecomunicações criada em 1925 por Walter Gifford, financiou , em 1946, um grupo de físicos para solucionar esta questão, e no ano seguinte era apresentado o primeiro transístor. Esse mesmo grupo de físico era liderado por três nomes em particular, Jonh Bardeen, William Shockey e Walter Brattain(figura 2.6) [9].



Figura 2.6: Os três inventores do transístor

Fonte: <https://www.greelane.com/pt/biography-of-william-shockley-4843200/>

2.3.2 John Bardeen

John Bardeen (figura 2.7) nasceu em Madison a 23 de outubro de 1908, tendo falecido em Boston a 30 de janeiro de 1991. Foi um dos físicos responsáveis pelo desenvolvimento do transistor, e foi a única pessoa a ser premiado com o prêmio Nobel da Física por duas vezes, a primeira delas foi pela descoberta do transistor, em 1956, ganha em parceria com William Shockley e Walter Brattain, e a segunda pelo desenvolvimento da teoria da supercondutividade, também esta em parceria com Leon N Cooper e John Robert Schrieffer [10].



Figura 2.7: John Bardeen

Fonte: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1972/bardeen/facts/>

Bardeen, nascido e criado em Wisconsin, era filho do reitor da universidade de Wisconsin Medical School, Charles Bardeen. Bardeen acabou o secundário com 15 anos, tendo então entrado na universidade de Wisconsin em 1923, onde se licenciou em engenharia eletrônica, enquanto trabalhava na Western Electric Company em Chicago no departamento de engenharia, onde continuou a trabalhar, mas já como licenciado por 2 anos, trabalhando em problemas matemáticos aplicados à geofísica e radiação de antenas parabólicas, sendo neste período que teve a sua primeira introdução em física quântica pelo professor, J.H. Van Vleck. Em 1930 o professor Leo J. Peters, que trabalhava com Bardeen, ganhou um lugar na Gulf Research Laboratories no Pittsburgh, Pennsylvania levando com ele Bardeen, que trabalhou lá por mais 3 anos, sendo que ao fim desses 3 anos, em 1933, decidiu tirar uma pós-graduação em matemática aplicada à física na universidade de Princeton, e foi sobre a liderança do professor E.P. Wigner que ganhou interesse em física das matérias. Antes de completar a sua tese foi-lhe oferecido o cargo de professor na Society of Fellows na universidade de Harvard, que frequentou

durante os próximos 3 anos, tendo também feito o seu doutoramento [10]. Entre 1938 e 1941, Bardeen foi assistente de professor de física na Universidade de Minnesota, e entre 1941 e 1945 trabalhou em Washington na Naval Ordnance Laboratory. Depois do seu serviço na 2^a guerra mundial Bardeen entrou para a Bell telephone Laboratories, onde ajudou a criar o primeiro transístor [9], tendo deixado a empresa em 1951. Foi nomeado professor de engenharia eletrónica e física na universidade de Illinois, em 1957. Bardeen e mais dois colegas, Leon N. Cooper e John Robert Schrieffer publicaram a teoria da supercondutividade, com base em pesquisas feitas em 1945 sobre condutividade eléctrica em semicondutores e metal [9].

2.3.3 William Shockley

William Shockley (figura 2.8), nascido em Londres a 13 de fevereiro de 1910, falecido a 12 de agosto de 1989 em Palo Alto, é filho de William Hillman Shockley, um engenheiro de minas de Massachusetts e Mary Bradford, inspetora mineral adjunta do Nevada. A sua família voltou para os Estados Unidos em 1913, para o estado da Califórnia, onde William Jr. foi educado, fazendo a sua licenciatura na California Institute of Technology, em 1932. Depois foi estudar para o Massachusetts Institute of Technology, onde tirou o seu doutoramento, em 1936. Nesse mesmo ano ele começou a trabalhar na Bell Telephone Laboratories, num grupo de trabalho liderado pelo Dr. C.J. Davison, trabalhando lá até 1955, onde ajudou a criar o primeiro transístor, em conjunto com John Bardeen e Walter Brattain (com uma pequena ausência para serviço militar na 2^a guerra). Nesse ano deixou o seu posto de trabalho e formou a Shockley Semi-conductor Laboratory of Beckman Instruments, Inc. na Califórnia, onde pesquisou e produziu novos transístores e outros dispositivos semicondutores. Em 1963 entrou na Universidade de Stanford, onde entrou numa carreira de professor de engenharia e ciência [11].

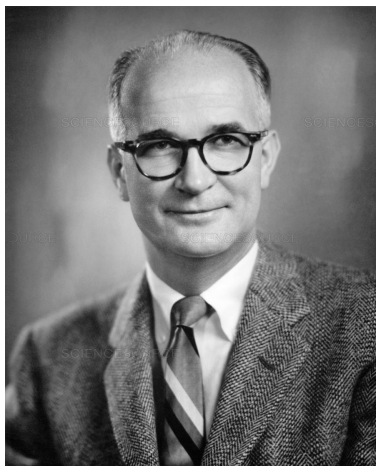


Figura 2.8: shockley

Fonte: <http://www.oexplorador.com.br/william-bradford-shockley/>

As suas pesquisas centraram-se na transferência de energia em materiais sólidos, teoria do vacuum tube, que veio a ser importante para o desenvolvimento do transístor e várias outras experiências nestes ramos, sendo que com o seu trabalho ganhou vários prémios, como uma Medalha de Mérito em 1946, pelo seu serviço na 2^o guerra mundial, o Morris Leibmann Memorial Prize of the Institute de Radio Engineers em 1952, no ano seguinte ganhou

o Oliver E. Buckley Solid State Physics Prize of the American Physical Society, e mais tarde nesse mesmo ano o Cyrus B. Comstock Award of the National Academy of Sciences. Mas a sua maior distinção foi sem dúvida o Nobel Prize for Physics a 1956, em conjunto com os seus antigos colegas da Bell Telephone Laboratories, John Bardeen e Walter H. Brattain [9]. O Dr. Shockley foi membro do Scientific Advisory Panel para o U.S. Army desde 1951, tendo feito serviço na Air Force Scientific Advisory Board desde 1958. Em 1962 chegou a ser presidente do Scientific Advisory Committee [11].

2.3.4 Walter Brattain

Walter H. Brattain nasceu em Amoy na China, a 10 de Fevereiro de 1902, tendo falecido a 13 de Outubro de 1987, filho de Ross R. Brattain e Otilie Houser, mudou-se para Washington, onde viveu a sua infância, e se formou na Whitman College em 1924, em 1926 fez o seu mestrado na universidade de Oregon, e o doutoramento no Minnesota, em 1929.

Dr. Brattain, foi membro da Bell Laboratories, desde 1929. Os seus primeiros trabalhos foram na área de emissão termo-eletrónica e camadas absorvidas em tungsténio, tendo seguido para o estudo de materiais semicondutores, aprofundando os seus estudos em silício, passando também para o germânio. Tendo em conta os seus estudos na matéria, Brattain chefiou a equipa que desenvolveu o primeiro transístor, composta pelo próprio, e os dois elementos atrás apresentados, William Shockley e John Bardeen.

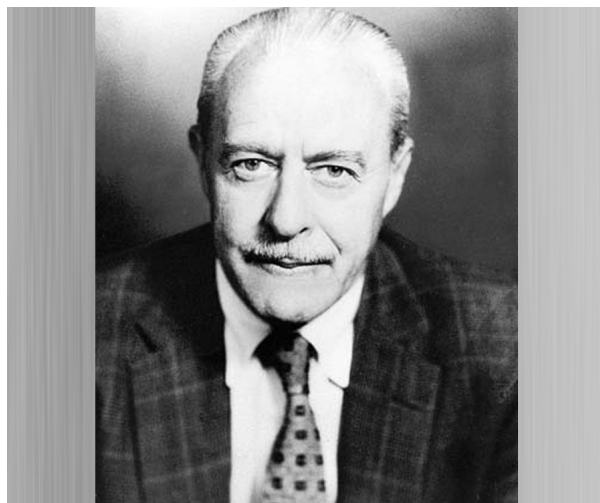


Figura 2.9: Brattain

Fonte: <https://famousbio.net/walter-houser-brattain-12019.html>

Brattain recebeu a honorary Doctor of Science degree em Portland, a 1952, em Whitman College na Union College a 1955, e da universidade do Minnesota em 1957 entre outros, sendo que a sua maior premiação, foi o prémio Nobel, pela descoberta do transístor.

Brattain é um membro da National Academy of Sciences, Fellow of the American Physical Society, American Academy of Arts and Sciences e American Association for the Advancement of Science.

2.4 Aparecimento de amplificadores operacionais

2.4.1 Primeiro Amp-OP

O amplificador operacional ou simplesmente Amp-OP, foi introduzido na década de 40, mais concretamente em 1941 pelo Dr. Karl D. Swartzel Jr da Bell Labs. Com apenas uma entrada e três válvulas conseguiu alcançar um ganho de 90 dB, o que é bastante elevado para a altura. Em 1952 George A. Philbrick Researches, com objetivo de realizar operações matemáticas, úteis à computação analógica inventou o K2-W (figura 2.10) que foi o pioneiro no que diz respeito a amplificadores operacionais. Porém possuía muitos inconvenientes como o facto de ser valvular, o que implicava grandes dimensões, dissipava muita potência, possuía altas tensões de trabalho e custo elevado, o que fazia com que não fosse ótimo para a utilização diária. Apesar disto, o K2-W era a melhor solução até então, sendo que a sua popularidade foi em constante subida, sendo um dos primeiros Amp-OP a ser comercializado [12].



Figura 2.10: K2-W: AmpOp com válvulas (1953)

Fonte: <https://www.wikiwand.com/pt/Amplificador-operacional>

2.4.2 Aplicação em circuitos de amplificação

Um amplificador operacional, é um dispositivo eletrônico de alto ganho, com uma entrada diferencial.

Os amplificadores operacionais tiveram a sua origem em computadores analógicos, eram utilizados para realizar operações matemáticas, como subtrações, adições, divisões e multiplicações, sendo por isso bastante versáteis o que fez com que crescesse a sua popularidade. Os amplificadores operacionais são amplamente utilizados em dispositivos eletrônicos atualmente, incluindo uma vasta gama de dispositivos de consumo, industriais e científicos [12].

No mundo da guitarra elétrica, os Amp-OP foram uma tecnologia revolucionária, pois permitiu o desenvolvimento de pedais de amplificação, que basicamente são pequenas caixas, que servem como amplificadores externos ao principal, o objetivo é aumentar o volume, ou a clipagem, do amplificador sem que se tenha de mexer nos parâmetros definidos no amplificador principal, sendo a troca mais rápida. Basicamente, aumentam o sinal de entrada que é gerado pela guitarra, ou outro instrumento, podendo aumentar a clipagem, promovendo a distorção, ou apenas o volume, mantendo o sinal de saída fidedigno ao de entrada. O primeiro pedal a utilizar este tipo de tecnologia, foi o MXR *distorcion+* (figura 2.11)[13].



Figura 2.11: MXR *distorcion+* 1975

Fonte: <https://smallaxemusic.com/products/1975-75-mxr-distortion-plus>

2.5 Surgimento de marcas importantes

2.5.1 Fender

Quando falamos de música, é impossível deixar de parte o nome Fender, e claro Leo Fender, o génio por detrás de tudo, seja as guitarras. As mais conhecidas são os modelos stratocaster e telecaster, seja pelos amplificadores, que pisaram palcos por todo o mundo. Desde os mais variados estilos musicais, desde o Rock mais agressivo, ao Jazz, o nome Fender está em todo o lado. Desde que em 1951, Leo Fender lançou a sua primeira guitarra de corpo sólido, a fender broadcaster, nome que teve de mudar, para telecaster, devido a direitos de autor. Em 1954, lançou a que, para muitos, a mim me inclui, a melhor guitarra de sempre, a stratocaster que se tornou um fenómeno enorme até aos dias de hoje, tal forma grande, que as guitarras pouco mudaram desde então.

Entre os anos 1946-1948 que os Fender "woodies" (figura 2.12) são lançados. Durante estes anos Leo lançou 3 modelos, o Princeton, que tinha 5 W de potência, e uma coluna de 8 polegadas, sendo considerado um amplificador para estudantes, o Fender deluxe, 10 W de potência e uma coluna de 10 polegadas e o Fender Professional, um modelo mais robusto, com 18 W de potência e uma coluna de 15 polegadas. Estes modelos são bastante raros hoje em dia, pelo que o seu preço também deve ser bastante elevado no mercado usado [14].



Figura 2.12: Fender Woodie

Fonte: <https://www.rainbowguitars.com/guitar/fender/woody-pro-exotic-bubinga/EXOTICWOODYPRO/FE>

No começo do ano de 1948, Leo Fender lançou o seu primeiro Fender Tweed, que eram revestido de tolex, o que protegia a madeira, tornando o amplificador mais durável. Esta gama que viria a tornar-se histórica, sendo que o primeiro modelo a ser lançado no mercado foi o Fender Dual Professional (figura 2.13), tem 16 W de potência, e uma coluna com 10 polegadas [15].



Figura 2.13: Fender Dual Professional

Fonte: <https://reverb.com/item/3184036-1947-fender-dual-professional-vintage-tweed-tube-amplifier-2x10-v-front-super>

Esta gama tweed era mais fácil de fabricar, que os woodies, devido ao seu design mais ergonómico, e simples, mas mesmo assim elegante. Esta gama ganhou vários tipos de design, como o Tv-Front (figura 2.14), que como o nome indica, era baseado na estrutura de uma televisão. Esta inspiração veio do facto que, Leo Fender trabalhou numa loja de reparações de televisões e rádios.

Esta gama contava com o Princeton, com uma coluna de 12 polegadas, o Deluxe, também com 12 polegadas, o Dual professional, que se viria a chamar Super, modelos idênticos aos anteriores. Mas esta gama contava com caras nova, o Champion 800 student, de 4 W e coluna de 8 polegadas, o Champion 600 student, de 3 W e coluna de 6 polegadas, e o Fender Bassman, o modelo mais robusto até então, com 26 W de potência, e uma coluna de 15 polegadas [15].



Figura 2.14: Fender TV-Front

Fonte: <https://www.pinterest.pt/pin/532550724659184176/>

Pegando no design dos Tv-Front, Leo fender decidiu inovar no look dos seus amplificadores, e decidiu encurtar os espaços laterais, renovando assim o look dos seus amplificadores, como mostra a figura 2.15.

Com esta nova alteração, lançou amplificadores novos, como o BandMaster, de 15 W, com 15 polegadas de coluna, ou com 25 W, com duas colunas de 12 polegadas cada. Estes amplificadores eram vendidos especialmente a músicos, que com o aumentar da potência dos seus amplificadores, ganhavam a possibilidade de tocar para mais público, com menos elementos nas suas bandas, tornado os seus espetáculos mais lucrativos [15].



Figura 2.15: Fender Wide Panel

Fonte: <http://www.audioworkshop.jp/en/profile-2/equipments2/amps-cabinets-stomps/>

Mais tarde lançou um novo design, desta vez com ainda menos madeira, tanto nas laterais, como por cima e por baixo, bem como o logótipo, ficando com a aparência da figura 2.16.

Com esta nova aparência, Leo Fender decidiu inovar ainda mais, criando o primeiro amplificador com a opção de tremolo, que basicamente é uma mudança constante de volume, criando um efeito de onda, lançando o Fender Vibrolux de 15 W e coluna de 10 polegadas, bem como Fender Tremolux de 15 W e coluna de 12 polegadas [15].



Figura 2.16: Fender Vibrolux 1962

Fonte: <https://www.worthpoint.com/worthopedia/1962-fender-brownface-vibrolux-guitar-78002090>

Ao longo dos anos os upgrade que têm vindo a ser desenvolvidos, têm sido o aumento da potência, o que aumenta inevitavelmente o volume, mudando também a cor do tolex para preto, ficando conhecido como os Fender "Blackface", mas a principal diferença entre o "blackface" e os "tweed" será o seu espectro de frequências, sendo que estes amplificadores são mais "mid-sculp", ou seja, o as frequências mais alta e as mais baixas são mais amplificadas comparativamente com as frequências do meio, cerca de 2000 Hz, dando-lhe um som mais elegante que os "tweed".

Em 1965, Leo Fender foi obrigado a vender a sua própria empresa devido a problemas de saúde, mas não sem antes deixar um legado incontornável na historias da música [15].

2.5.2 Vox

Jennigs organ company, que mais tarde se viria a chamar JMI, era uma empresa Inglesa em Dartford Kent que, como o nome indica, era dedicada à construção de pianos, fundada por Tom Jennigs em 1951. Em 1957 decidiu dedicar-se à construção de amplificadores, pois à data não existiam amplificadores feitos localmente, sendo todos importados a maioria Fender. Tendo em conta a procura e a grande explosão da guitarra elétrica em Londres, era uma grande oportunidade de mercado. Com isso em mente, Jennigs contratou Dick Denney com o intuito de criar o primeiro amplificador Vox, que pudesse satisfazer as necessidades de um artista de Jazz, que precisa de um amplificador capaz de manter a clareza do seu sinal a volumes elevados, mas também de obter tens apropriados para o Rock, que estava em expansão na altura.

Os amplificadores mais antigos usavam tanto corrente D.C. como A.C., o que causava volumes demasiado altos, e sendo assim Dick Denney decidiu usar apenas corrente A.C. e deixou isso bem claro no nome dos amplificadores, Vox AC. Então, no final do ano de 1957, a Vox lançou os seus primeiros amplificadores, o Vox AC 2/30, que tinha capacidade tanto para guitarras como para microfones, com 30 W de potência e coluna de 12 polegadas, e o Vox AC 1/15, apenas para guitarra, com 15 W de potência e coluna de 12 polegadas. Para além da diferença de potências, o Vox AC 2/30 tinha uma pequena alteração na sua estação de pré amplificação, deixando-o mais apropriado para guitarras. Apesar desta mudança, o amplificador que teve mais sucesso, foi o Vox AC 1/15, que com o aumento do seu sucesso, criou mais necessidade para mais volume, ou seja, mais potência, e assim nasceu o primeiro Vox AC 30 (figura 2.17).



Figura 2.17: Vox AC 30 1963

Fonte: <https://www.mattsguitar.shop/en/vendues/vox-ac-30-1963>

Mesmo com este aumento de potência, era necessário algo mais, especialmente devido ao, cada vez maior, crescimento da Fender, que tinha amplificadores cada vez mais potentes. Mas havia um problema; Tom Jennings não queria um amplificador demasiado grande, e que não coubesse na bagageira de um carro. Assim Dick Denney teve a ideia, de mudar as válvulas de EL34 para EL84, que são maiores, mas coloca-las de lado, em configuração push-pull, o que veio a trazer mais volume, capaz de satisfazer as necessidades de uma audiência cada vez maior. No entanto as válvulas estavam demasiado próximos da madeira, e como sabemos as válvulas aquecem bastante, então Dick Denney teve de fazer umas grelhas na parte de cima de cada amplificador, de modo a refrigerar o circuito. Mais tarde, a Vox decidiu trabalhar com a Celestion para desenhar altifalantes customizados para a marca, e assim nasceram os Celestion Blue, que se tornaram característicos do som de um amplificador Vox AC 30.

Ao fim de tantas mudanças no design dos amplificadores, o circuito parece, por fim, ter estabilizado, ganhando cada vez mais adeptos por toda a Inglaterra, até que certo dia em 1962, um grupo de jovens de Liverpool decidiram usar Vox como os seus principais amplificadores. Esse grupo dava como nome, The Beatles. O sucesso deste grupo foi estratosférico na altura, sendo provavelmente a banda de maior sucesso a nível mundial, e com esse sucesso, veio o reconhecimento internacional da Vox, vendendo amplificadores para todas as partes do globo. Para além dos Beatles outros grandes nomes da música usava Vox's, Brian May, dos Queen, Keith Richards, dos Rolling Stones e Jimmy Page, dos Led Zeppelin apesar de anos mais tarde ter trocado para a Marshall [16].



Figura 2.18: Beatles a usarem amplificadores Vox

Fonte: <http://obaudoedu.blogspot.com/2016/03/the-beatles-vox-its-whats-happening.html>

2.5.3 Marshall

Jim Marshall, fundador da empresa que se tornou um verdadeiro património cultural, foi na verdade baterista e professor de bateria, e em 1959 abriu a sua loja de instrumentos musicais em Hanwell, Londres, onde vendia instrumentos e dava aulas de música, em particular rock and roll sendo conhecido por isso.

Com o passar do tempo, ganhou notoriedade, e começou a ter clientes como Ritchie Blackmore, fundador dos Deep Purple, Big Jim Sullivan e Pete Townshend, que viriam a fundar os The Who, artistas estes, que estavam descontentes com os seus amplificadores, que eram caros, e tinham de ser importados da América sendo a maioria das vezes Fender. Para além disso, não tinha a sonoridade que desejavam, e foi então que Jim Marshall, com a ajuda de Ken Bran e Dudley Craven, construiu o seu próprio amplificador baseando o circuito num Fender Bassman, sendo que da gama Fender é o que tem mais ganho apesar de não ser o modelo mais recente da altura. A sua primeira tentativa foi uma recriação exata do Bassman, com algumas mudanças nos valores de alguns componentes, sendo alguns até diferentes dependendo do que havia disponível localmente, usando válvulas 12AY7 usaram o equivalente, ECC83, o que criou um amplificador capaz de distorcer muito mais rápido que o Bassman, e é essa mesmo a característica dos Marshall, o ganho. Nasceu assim o Marshall JTM 45 (figura 2.19), o modelos mais icónico de toda a marca, tendo 45 W de potência.



Figura 2.19: Marshall JTM 45 com uma cabine 2x12

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Marshall-JTM45>

Este amplificador era de tal forma potente que Jim Marshall foi obrigado a fazer a sua própria cabine com colunas específicas, pois os Celestion G12, usados na altura, não aguentava a potência de 45 W, construindo assim uma cabine com 4 colunas Celestion G12M, sendo que mais tarde foram melhoradas, para aguentar com 25 W cada uma [17].

Outros modelos foram lançados mais tarde, como o Marshall Bluesbreaker, a pedido de Eric Clapton, que queria um amplificador potente, mas que coubesse na bagageira do seu carro, e foi com esse mesmo amplificador que Clapton, gravou o álbum John Mayall and the bluesbreakers, criando tons de guitarra completamente icónicos, mudando o som do rock para sempre.

Em 1959 a pedido de Pete Townshend, que buscava volumes cada vez mais altos, foi lançado o Marshall super lead model, Marshall Plexi, como é mais conhecido.

Mas apesar do grande sucesso da empresa, e do seu crescimento, a Vox ainda era a marca dominante, muito por causa do acordo a que chegaram com os Beatles, que eram utilizadores da Vox, e usavam esses amplificadores em todos os concertos, dando-lhe grande publicidade. Mas em setembro de 1966 Jimmy Hendrix, (figura 2.20) muda-se para Londres com o incentivo de Chas Chandler, que o apresentou a Eric Clapton, e os dois tocaram juntos. Reza a lenda que Hendrix meteu o volume no máximo, criando uma onda de feedback, e fez um cover de Hey Joe, deixando toda a gente de queixo caído, Hendrix não era apenas um mestre na guitarra, era uma força da natureza capaz de mover multidões, daí seu sucesso meteórico, e foi essa a melhor publicidade que a Marshall podia ter.



Figura 2.20: Jimmy Hendrix no Woodstock 1969 a usar um Marshall

Fonte: <https://www.dn.pt/pessoas/familia-de-jimi-hendrix-continua-em-guerra-por-direitos-de-imagem-5751808.html>

Capítulo 3

Amplificadores de som

3.1 Arquitetura de amplificadores

3.1.1 Diagrama de estados

Para percebermos como funciona um amplificador, devemos primeiro perceber como flui o sinal elétrico. Na figura 3.1, está esquematizado todo o percurso que o sinal faz, desde os pickups de uma guitarra (mas que pode ser outro instrumento qualquer) até aos nossos ouvidos.

Então, temos o sinal proveniente do nosso instrumento, que passa pelos pedais de efeito. Esta fase é opcional e o sinal pode ir diretamente para o amplificador. No amplificador podemos ter de dois tipos, o Combo, que tem a coluna ligada diretamente a fase de amplificação, ou a Head, em que a cabine, portanto as colunas, são em separado. Em seguida temos uma das fases mais importantes de todo o processo, a pré-amplificação, que é a fase onde vamos preparar o sinal, para a amplificação de potência, onde as grandes amplificações ocorrem. Estas duas fases vão ser explicadas em mais detalhe mais em frente. Entre as duas fases, temos o FX-Loop, esta fase também é opcional, e serve para colocar efeitos entre a pré-amplificação e a amplificação de potência.

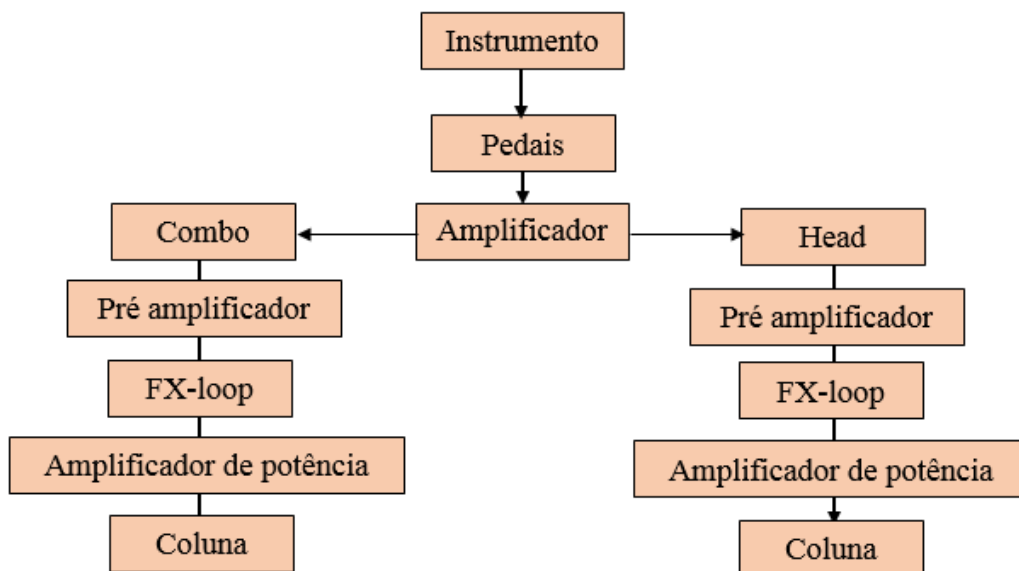


Figura 3.1: Aqui vimos o fluxo de sinal de um amplificador

3.1.2 Pré amplificação

A função principal de um pré amplificador, é a partir de um sinal muito fraco, como o de uma guitarra ou microfone, torná-lo audível e com o mínimo ruído possível. Para entender melhor precisamos de saber como funcionam os microfones. A explicação mais prática é, a partir de num sinal sonoro, cria uma onda elétrica com a mesma frequência. Mas o nível á saída do transdutor é baixo, e é ai que precisamos de um pré-amplificador que traga mais volume ao sinal para a próxima fase: a amplificação de potência, onde as grandes amplificações de corrente acontecem.

Um pré amplificador ideal, terá uma resposta linear, ou seja, cria um sinal fidedigno ao inicial sem grande distorção e pouco ruído, tendo alta impedância de entrada, e baixa de saída oferecendo ganho a nível da voltagem, cerca de 10 mV para 1 V por exemplo. Mas não tem grande ganho de corrente, sendo este ultimo fornecido pela amplificação de potência.

Os pré amplificadores são utilizados não só em amplificadores, mas também em mesas de DJ, interfaces e até em fones. Tudo o que necessite de reproduzir um sinal elétrico em sinal sonoro, tem de uma forma ou outra, um pré amplificador [18].



Figura 3.2: Exemplo de um pré amplificador

Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A9-amplificador/media/Ficheiro:Musicfirstaudioclassicpreamplifier.jpg>

3.1.3 Amplificação de potência

A amplificação de potência, é o ultimo estado de qualquer amplificador, e é nesta fase que ocorrem os maiores ganhos de corrente. A principal função nesta fase, é ter ganhos suficientemente elevados para alimentar uma coluna, que depois irá transformar o sinal elétrico em sonoro.

Esta fase necessita de uma corrente de entrada elevada, que respeite um certo threshold, dependendo do amplificador. Então em vez de passar o sinal de áudio diretamente da fonte, seja ela qual for, é necessário um pré amplificador que prepare o sinal para tal, como se viu anteriormente.

Os amplificadores de potência são divididos em classes, A, B, AB e C dependendo do seu ângulo de condutividade, que é o ângulo ao qual cada dispositivo de amplificação, pode ser um transistor, uma válvula ou um OP-Amp, está em funcionamento. Existem mais do que estas 4 classes, mas nesta dissertação vamos falar apenas destas 4, visto que são as mais usadas [19].



Figura 3.3: Exemplo de um amplificador de potência
Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Audio-power-amplifier.jpg>

3.1.4 Classe

Classificação geral dos amplificadores

Existem 3 classes de amplificadores diferentes, que se distinguem pela gama de frequências em que atuam. Existem os amplificadores de áudiofrequência, que atuam em os 20 Hz e os 20 kHz, os de vídeo-frequência, que trabalham em gamas dos 20 kHz até aos 6 MHz, e os de rádio-frequência, que tem um funcionamento na gama desde os 30 kHz até aos vários GHz.

Amplificadores de áudiofrequência

Estes amplificadores atuam numa faixa de frequência entre os 20 Hz e os 20 kHz, ou seja, é a faixa sensível aos nossos ouvidos, e como tal vou olhar em mais detalhe para este tipo de amplificadores nesta dissertação. Estes amplificadores são encontrados em recetores de rádio, intercomunicadores e muitos outros aparelhos, sendo estes os mais utilizados.

Amplificadores de vídeo-frequência

Estes amplificadores abrangem uma ampla faixa de frequência que vai dos 30 kHz até aos 6 MHz. São utilizados em circuitos que amplificam sinais que devem ser vistos em telas de radares, televisores etc.

Amplificadores de rádio-frequência

Diferenciam-se dos outros dois tipos porque amplificam uma estreita faixa de frequência dentro do espectro de rádio-frequência, que vai de 30 kHz até vários GHz. São usados em vários equipamentos, quando sintonizamos uma emissora de rádio estamos deslocando a estreita faixa de amplificação do circuito, dentro do espectro de frequência [20].

Classes de amplificadores de audiofrequência

Nem todos os amplificadores são iguais, existindo diferentes tipos de classes o que se traduz numa diferença clara nos diferentes tipos de sinal de saída, havendo assim níveis da eficiência, linearidade e capacidade de potência de saída, o que faz com que seja melhor ou pior para determinadas situações.

As classes de amplificadores, termo utilizado para distinguir amplificadores, são distinguidas pela disposição do seu circuito, e método de operação. As classes representam a quantidade de sinal que varia durante um ciclo de operação. A classificação de um amplificador, depende do seu alcance, operação linear, que têm grande fidelidade de sinal, mas rendimento baixo, e de operação não linear, onde a fidelidade de sinal não é muito importante, sendo que o sinal pode tornar-se mais sujo, com muito ruído, mas são circuitos de alto rendimento.

Podemos dividir os amplificadores em duas classes. A primeira, e a mais comum, é a de amplificadores de ângulo de condução controlada, que são os de classe A, B, AB e C, cuja característica principal, é de ter sempre o mesmo condutor sobre uma certa parte da onda, sendo que os transístores trabalham em modo “fully-on” ou “fully-off”.

O segundo tipo de amplificadores são os chamados de “switching”, sendo os de classe D, E, F, G, etc, que usam sinal digital e modelação por largura de pulso (PWM) para mudar constantemente o sinal de “fully-on” para “fully-off”, o que faz com que os transístores cheguem á saturação e região de corte [21].

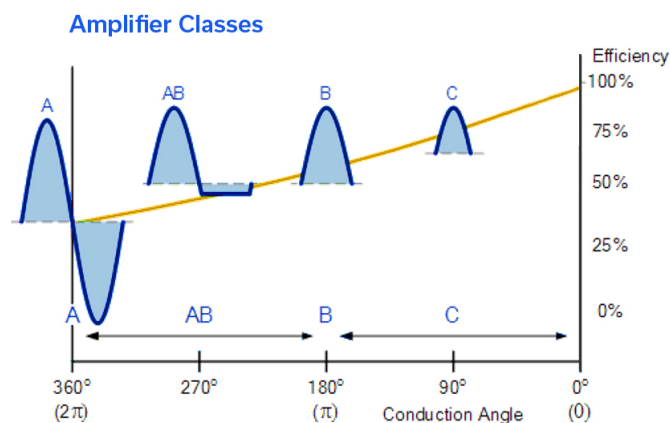


Figura 3.4: Comparação entre o ângulo de condutividade e a eficiência

Fonte: <https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>

Classe A

O dispositivo eletrônico de saída (neste caso o transistor) conduz durante os 360 graus, ou seja, usa apenas um transistor (Bipolar, FET, IGBT, etc), que atua nas duas semi-ondas e em torno do ponto de operação Q, como mostra a figura 3.5. Isto faz com que seja difícil que o transistor chegue ao sua zona de saturação, o que proporciona a melhor fidelidade ao sinal original (não distorcido), mas o transistor está sempre no estado “fully-on”, o que se torna em uma desvantagem, pois faz com que perca muita energia com o passar do tempo, o que se traduz numa eficiência muito baixa, cerca de 30 %. Sendo assim, os amplificadores de classe A necessitam de uma fonte de tensão de alta voltagem, o que faz com que apareçam problemas de hum, ou ruído externo, vindo da própria fonte de alimentação, e em seguida amplificados pelo próprio amplificador. Por causa disto, foi necessário criar amplificadores com uma taxa de rendimento superior, e que tenham a mesma fidelidade de sinal que os amplificadores de classe A.

Apesar disto, os amplificadores de classe A, são considerados os com melhor qualidade de som, pois devido à sua linearidade, conseguem apresentar muita fidelidade de sinal a ganhos mais elevados, especificamente quando dimensionados corretamente. No entanto são raramente utilizados em amplificadores de potência, devido aos seus requerimentos de alimentação energética, como já foi visto anteriormente.

O esquema do circuito de classe A pode ter muitas variações, mas baseia-se no circuito da figura 3.5 [21].

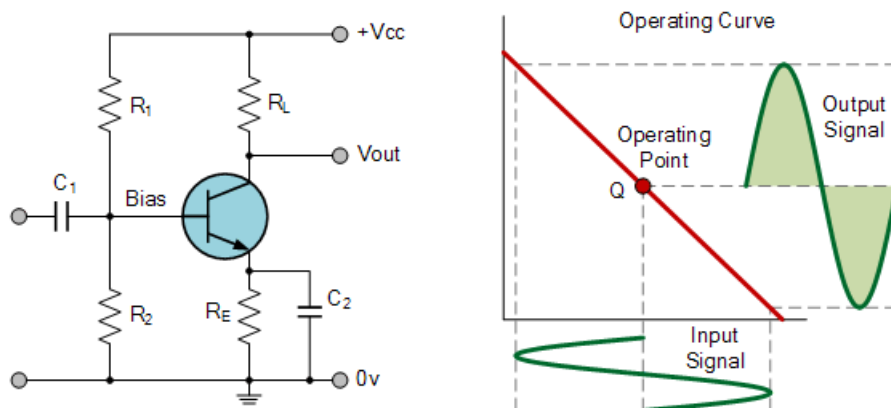


Figura 3.5: Circuito de classe A e a sua curva de operação

Fonte: <https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>

Classe B

Foi para resolver os problemas de eficiência e de aquecimento dos amplificadores de classe A, que os amplificadores de classe B foram inventados, e com sucesso nesse departamento, tendo um rendimento de cerca de 75 %. Este tipo de amplificadores utiliza dois transistores bipolares, sendo que cada um atua apenas numa semi-onda, ou seja, cada um conduz apenas numa semi-onda, estando montados na configuração “push-pull”, como mostra a figura 3.6.

Quando o sinal de input é positivo, o transistor npn, que na figura 3.6 é que está no topo, estará ligado, enquanto que o pnp, o que se encontra por baixo, estará desligado, quando o sinal de input for negativo, esta ordem será revertida, estado o transistor npn ligado, e o pnp desligado, atuando assim cada em sua semi-onda, o sinal de saída é resultado da soma das duas semi-ondas. Este tipo de construção, chamada de “push-pull”, tem um grande impacto na melhoria da eficiência do amplificador, tendo uma de melhoria de cerca de 50 % em relação aos amplificadores de classe A. Mas levanta outro problema, o de “crossover distroction”, devido à “dead band” dos transistores, entre -0.7 V e 0.7 V , o que resulta na onda da figura 3.6. Para fazer com que um transistor funcione, precisamos de cerca de 0.7 V , sendo assim, o transistor não para estará ligado quando a tensão estiver entre os 0 V e os 0.7 V , nem estará ligado entre os -0.7 V e os 0 V . Isto faz com que o sinal não seja reproduzido neste intervalos, criando a tal “crossover distortion” [21].

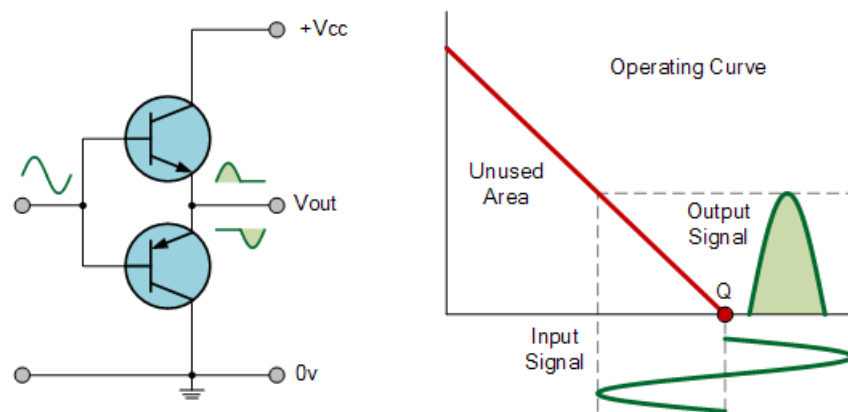


Figura 3.6: Circuito de classe B e a sua curva de operação

Fonte: <https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>

Classe AB

Foi para resolver o problema de “crossover distortion” que foram inventados os amplificadores de classe AB, que conseguem aliar à fidelidade de sinal característica dos amplificadores de classe A, com a alta eficiência dos amplificadores de classe B, daí seu o nome.

Estes amplificadores derivam dos amplificadores de classe B, só que neste caso, ambos os transístores estão ligados durante o ponto 0, ou seja, o seu grau de ação está entre os 180 e os 360 graus de uma onda, eliminando assim a “crossover distortion”, por outras palavras, os transístores estão ligados por mais de uma semi-onda, ao contrário dos de classe B, mas nunca uma onda inteira, como os de classe A, tendo a onda resultante da figura 3.7. Para que tal seja possível, é necessário colocar, por exemplo, dois díodos, de 0.7 V cada um, entre os terminais de base, dos dois transístores.

Podemos assim dizer que os amplificadores de classe AB, têm o melhor de dois mundo, tendo a fidelidade de sinal dos amplificadores de classe A, e ainda têm a alta eficiência dos amplificadores de classe B. Neste caso está entre os 50 % e os 60 %, não sendo tanto como os de classe B, mas ainda é um valor bastante elevado. Sendo assim, os amplificadores de classe AB, têm a configuração da figura 3.7 [21].

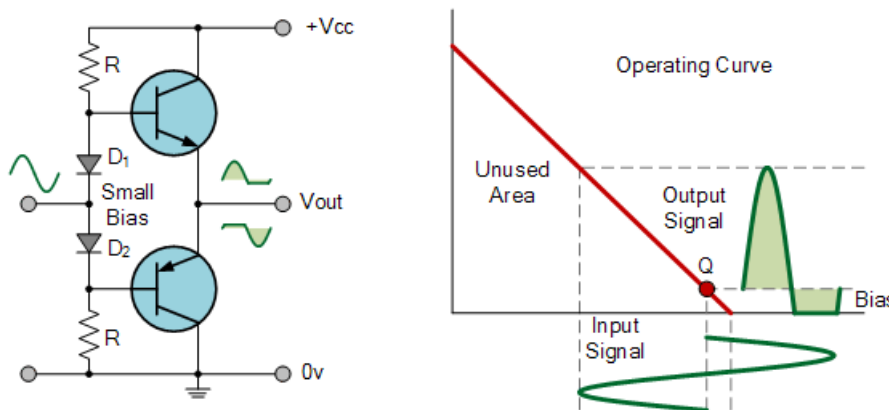


Figura 3.7: Circuito de classe AB e a sua curva de operação
 Fonte: <https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>

Classe C

Os amplificadores de classe C, são destinados a serem dispositivos com nível de eficiência muito elevado. Em alguns casos chegam a ter mais de 90 %, como mostra a figura 3.8 o seu ângulo de atuação é menor que 180 graus, o que significa que o transistor estará ligado durante menos que uma semi-onda. Como apenas têm um transistor, boa parte da corrente é 0, mas é graças a esta característica, que estes amplificadores têm níveis de eficiência tão elevados. No entanto a sua performance a nível de linearidade é fortemente prejudicada pela distorção, devido a este mesmo tipo de topologia.

Estes amplificadores, tal como os de classe A, só utilizam um transistor npn, e a sua característica diferenciadora dos demais, é o facto de terem uma bobine ligada em paralelo com um condensador, e ambos ligados ao terminal emissor do transistor, como podemos ver na figura 3.8.

Este tipo de amplificador é usado somente em circuitos destinados a comunicação a frequências muito elevadas, não sendo usado em Amplificadores de áudiofrequência [21].

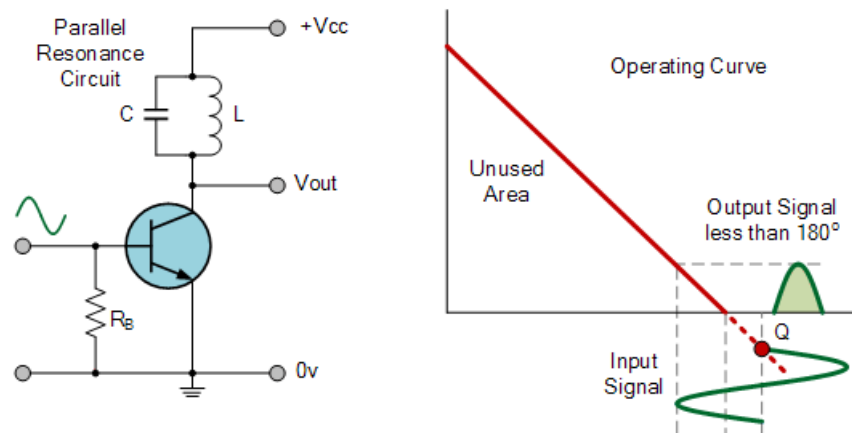


Figura 3.8: Circuito de classe C e a sua curva de operação

Fonte: <https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>

3.2 Tipos de amplificadores

3.2.1 Amplificadores valvulados

Os amplificadores a válvulas são, como o nome indica, amplificadores que utilizam válvulas como meio de, amplificar o seu sinal. Esta é a tecnologia mais ancestral de amplificadores de som, mas a verdade, é que continua a ser a mais usada no meio da música [22].

Desvantagens

- Problemas de linearidade, especialmente com fatores de feedback.
- Tendo em conta a existência de feedback, as válvulas tornam-se microfónicas, ou seja, as válvulas podem ser sensíveis ao som ou vibração, o que faz com que ajam como um microfone.
- As válvulas têm um grande problema de sobreaquecimento.
- As válvulas têm uma vida útil mais curta do que as restantes alternativas.
- As válvulas são significativamente maiores do que as restantes alternativas.
- Os tubos estão disponíveis com apenas uma polaridade, enquanto os transístores estão disponíveis em polaridades complementares (por exemplo, NPN / PNP).
- Os circuitos da válvula devem evitar a introdução de ruído das fontes do aquecedor CA [22].

Vantagens

- Eletricamente muito robustos, eles podem tolerar sobrecargas, que destruiriam um transistor bipolar em milissegundos.
- Suportam tensões de pico muito altas e sem danos, adequando-os a certas aplicações militares e industriais.
- Geralmente opera em tensões aplicadas bem abaixo de sua capacidade máxima, proporcionando uma vida longa.
- Clipagem mais suave ao sobrecarregar o circuito, o que muitos músicos acreditam dar um som mais agradável e musicalmente mais satisfatório.
- Mas, sobretudo, são os amplificadores mais utilizados em música, especialmente em músicas baseadas na guitarra [22].

3.2.2 Amplificadores transistorizados

Com o aparecimento dos transístores, as válvulas foram sendo substituídas por este novo dispositivo de amplificação de sinal, dando origem aos amplificadores transistorizados [22].

Desvantagens

- Eletricamente menos robustos que os amplificadores valvulados.
- A sua distorção é menos orgânica que a valvulados.
- O seu timbre característico é diferente do valvulado, visto que, em geral, amplifica as frequências mais altas, o que torna o som mais agudo, e por isso são muitas vezes preteridos aos valvulares.
- Mais difícil de reparar [22].

Vantagens

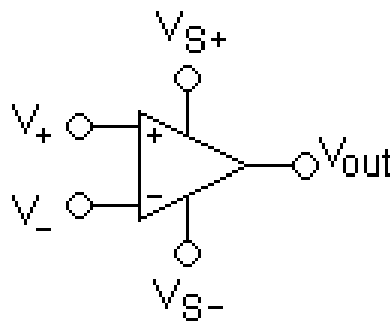
- Mais fáceis de fabricar, com um custo menor e com maior durabilidade.
- Tendo em conta a sua facilidade de fabricação, o preço para o consumidor também é inferior.
- Facilidade de fabricação em massa.
- Tendo em conta o seu tamanho inferior, é possível fazer um circuito mais pequeno, o que poupa bastante espaço, e peso, no produto final.
- Aquecem muito menos que os amplificadores valvulares [22].

3.2.3 Amplificadores operacionais

Os amplificadores operacionais, que usam amp-op para realizar a amplificação, são amplificadores criados especialmente para realizar operações matemáticas, daí o seu nome de operacional. Foram criados para implementar computadores analógicos .

Para perceber melhor como funcionam estes amplificadores, temos de perceber o que são os amp-op. Basicamente o amp-op é um dispositivo que usa o feedback, para fazer a amplificação de sinal, fundamentalmente da tensão. Dependendo da forma como estes amplificadores são desenhados, pode realizar diferentes operações matemáticas, daí o seu nome operacional [23].

Um símbolo elétrico para o amplificador operacional é mostrado abaixo:



Os terminais são:

- V_+ : entrada não inversora
- V_- : entrada inversora
- V_{out} : saída
- V_{s+} : alimentação positiva
- V_{s-} : alimentação negativa

Amplificador operacional ideal

Um amplificador operacional ideal é aquele que não deve receber corrente da fonte á entrada, e que a resistência de saída é, aproximadamente, 0. Portanto um amplificador que tenha um ganho infinito em malha aberta, logo, $r_d=\infty$, $r_0=0$, $i_p=i_N=0$ em que i_p e i_N são as correntes que entram nas entradas não inversora e inversora.

O amp-op ideal, pode ser dividido em três zonas de operação distintas, a zona de saturação positiva e negativa, e a zona ideal.

A zona mais utilizada é a zona ideal, onde a tensão no terminal de saída do amp-op é proporcional à diferença de potencial entre os seus terminais de entrada, com uma constante de proporcionalidade, o ganho. Sendo assim, nesta zona de funcionamento, a diferença de tensão entre os terminais de entrada é muito pequena, por ser inversamente proporcional. Então temos:

$V_0 = a(V_+ - V_-)(=)V_+ = V_-$ (considerando a o ganho, sendo este muito elevado)

As zonas de saturação positiva e negativa correspondem as zonas em que a tensão do terminal de saída é limitada pelas tensões de alimentação inferior e superior do amp-op, ou seja, quando o amplificador não está realimentado, ou está realimentado positivamente. Sendo consequência da tensão de saída ter superado os extremos de alimentação do circuito (aqui definidos com Vdd e Vss), saindo portanto da zona de operação linear [24].

Sendo assim, são válidas as seguintes expressões:

$V_O = V_{dd}(=)V_+ > V_-$ (realimentado positivamente)

$V_O = V_{ss}(=)V_+ < V_-$ (não realimentado)

Montagens

Realimentação negativa

As montagens mais comuns são as em que o amp-op está realimentado negativamente. Em circuitos não diferenciais, é usual o terminal positivo, v_+ , estar ligado à terra pelo que, devido ao ganho elevado do amp-op, o terminal negativo, v_- , tem um potencial próximo de 0 V. Nesta situação é comum referir o terminal v_- como terra virtual, dado que, embora não esteja ligado à massa, como acontece com v_+ , a sua tensão é aproximadamente 0 V [24].

Realimentação positiva

As montagens em que os amp-ops são realimentados positivamente, por exemplo, em montagens em que há uma realimentação entre a saída e o terminal positivo do amp-op, que são geralmente instáveis. Nestas caso, o amp-op opera nas zonas de saturação e, possivelmente, oscila. Há situações em que se tira partido deste comportamento, por exemplo os circuitos multivibradores (oscilador de Wien, o comparador Schmitt-triggered, entre outros) [24].

3.2.4 Análise comparativa

Havendo tantas opções, com vantagens e desvantagens diferentes em cada uma, uma pergunta se impõe. Qual é a melhor opção de entre as três?

Na verdade não há uma melhor opção, são "ferramentas" diferentes para trabalhos diferentes. Por exemplo, um músico que precise de um amplificador capaz de amplificar grandes volumes, e fazer vários concertos com o mesmo, a melhor opção será provavelmente o amplificador valvulado. Mas no caso de o utilizador necessitar de um amplificador que, amplifique o som, mas que não tenha um volume demasiado elevado, como da figura 3.9, então o amplificador transístorizado pode ser a melhor opção. Mas se o objetivo for fazer um circuito que tenha bastante ganho, mas de dimensões reduzidas, então o op-amp será a solução indicada, como referido anteriormente, são "ferramentas" diferentes, para trabalhos diferentes.



Figura 3.9: Exemplo de amplificador para uso "caseiro"

Fonte: <https://www.istockphoto.com/pt/fotos/girl-playing-electric-guitar>

Capítulo 4

Circuito amplificador desenvolvido

4.1 Amplificador transistorizado

Com o âmbito de desenvolver um amplificador experimental, temos de escolher uma de três opções, valvulados, transistorizado e amp-op, e tendo em conta que a utilização de válvulas de amplificação requer cuidados redobrados, visto que aquece, e a probabilidade de queimar é mais elevada, decidiu-se implementar um amplificador transistorizado.

Sendo assim vai-se implementar duas fases, a pré amplificação, e a amplificação de potência. Para tal, utilizou-se o software LTspice, que permite simular um certo circuito em ordem a experimentá-lo computacionalmente, antes da sua conceção física.

Pré Amplificação

Para o circuito de pré amplificação, optou-se por utilizar um esquema de classe AB, como mostra a figura 4.1, pois trata-se de uma construção, que, tal como os circuitos de classe A, tem uma grande fidelidade de sinal. Ou seja, o sinal de saída não apresenta muita distorção, tendo maior nível de amplitude e fase em relação ao sinal de entrada, o que não acontece nos circuitos de classe B, que têm um grande problema de distorção. Para além disto, tem um rendimento semelhante ao de classe B, na ordem dos 70 %. Sendo assim o circuito AB apresenta o melhor de dois mundos, é fidedigno como o de classe A, e tem alto rendimento como o classe B, daí ser a escolha mais lógica, sendo também o modelo de circuito mais utilizado.

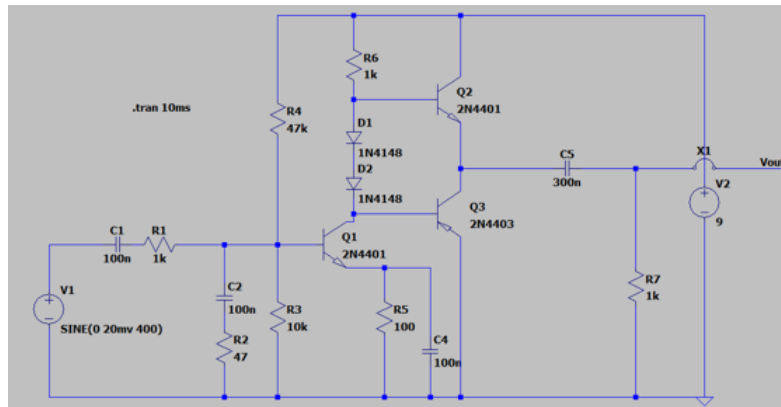


Figura 4.1: Esquema da simulação em LTSpice da pré amplificação

O sinal de entrada esta representado como V1, que é uma fonte que produz uma onda sinusoidal, que apesar de não coincidir com o funcionamento real, é a melhor aproximação que temos para testar o circuito, depois o sinal passa por C1 e por R1, que vão servir de filtro à corrente DC. O condensador C2 e a resistência R2 servem para impedir algum erro que possa existir no sinal de entrada. Em seguida a onda entra no esquema de amplificação de classe AB, depois a onda é filtrada novamente, pelo C5 e R7, e chega ao sinal de saída, Vout, esta onda ira ser direcionada para a amplificação de potência, mas se quiséssemos utilizar apenas este circuito, bastava liga-lo diretamente a uma coluna de som. V2 é a fonte de alimentação de 9 V que alimenta todo o circuito.

Utilizando as funcionalidades do LT spice, simulou-se o circuito, e pudemos medir a tensão de entrada, V_{in} , a onda a vermelho, e a tensão de saída, V_{out} , a onda a branco, figura 4.2.

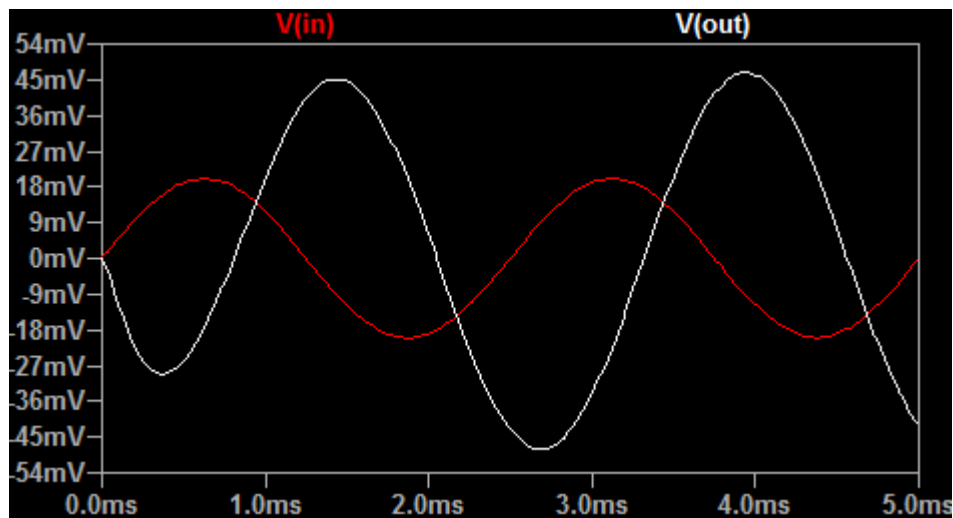


Figura 4.2: Onda de entrada e onda de saída do pré amplificador

Como podemos observar, houve um aumento de amplitude da onda, sendo que a tensão de entrada é de 20 mV, e a tensão de saída é cerca de 45 mV. Apesar disto, a amplificação não é suficiente, como tal vamos necessitar de uma segunda fase de amplificação, a amplificação de potência.

Amplificação de potência

Na figura 4.3, está o circuito completo, e em LTSpice, da fase de amplificação de potência. É um circuito de classe AB, pelas mesmas razões da fase de pré amplificação. Esta fase pode ser dividida em três seções, a long tailed pair, classe A e estágio de saída, desta forma é mais fácil explicar o que, à partida, parece um circuito bastante complexo.

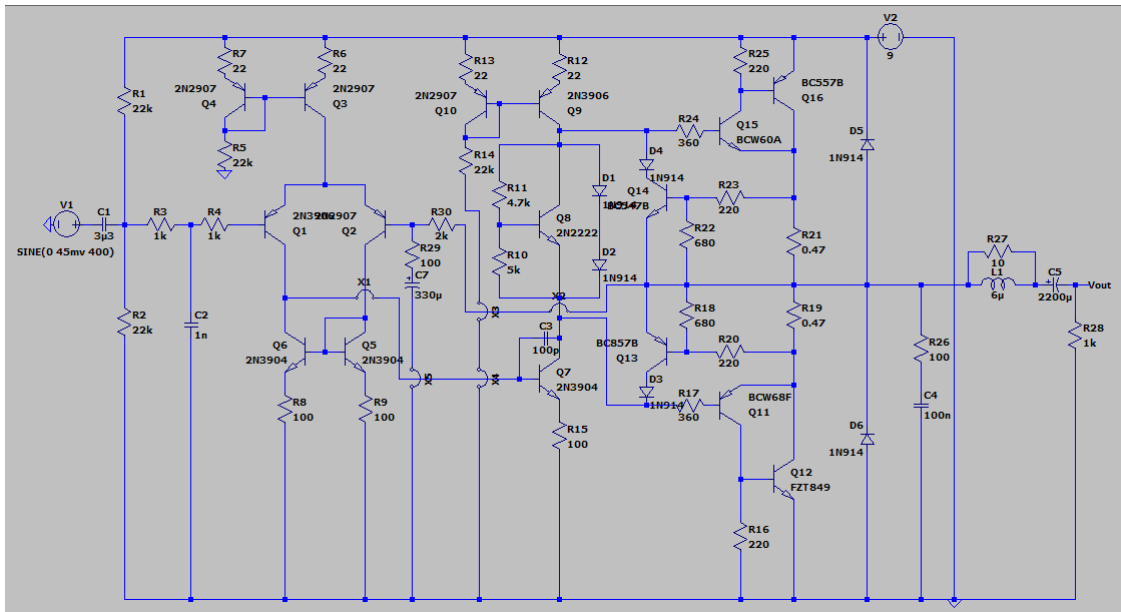


Figura 4.3: Circuito do amplificador de potência

Long tailed pair

A Long tailed pair, figura 4.4, a sua função principal, é tratar do sinal vindo da fase de pré amplificação, que neste caso é simulado por um gerador de onda sinusoidal, com a mesma tensão que a onda à saída da fase de pré amplificação, 45 mV. A sua função é filtra esse sinal, que é a função de C1 é copular a entrada, sendo que R1 e R2 polarizam o sinal de entrada, de modo a que haja o menor ruído possível, e em seguida amplificá-lo passando para a próxima fase, com circuitos de amplificação de classe AB em cascata, ou seja, um a seguir ao outro.

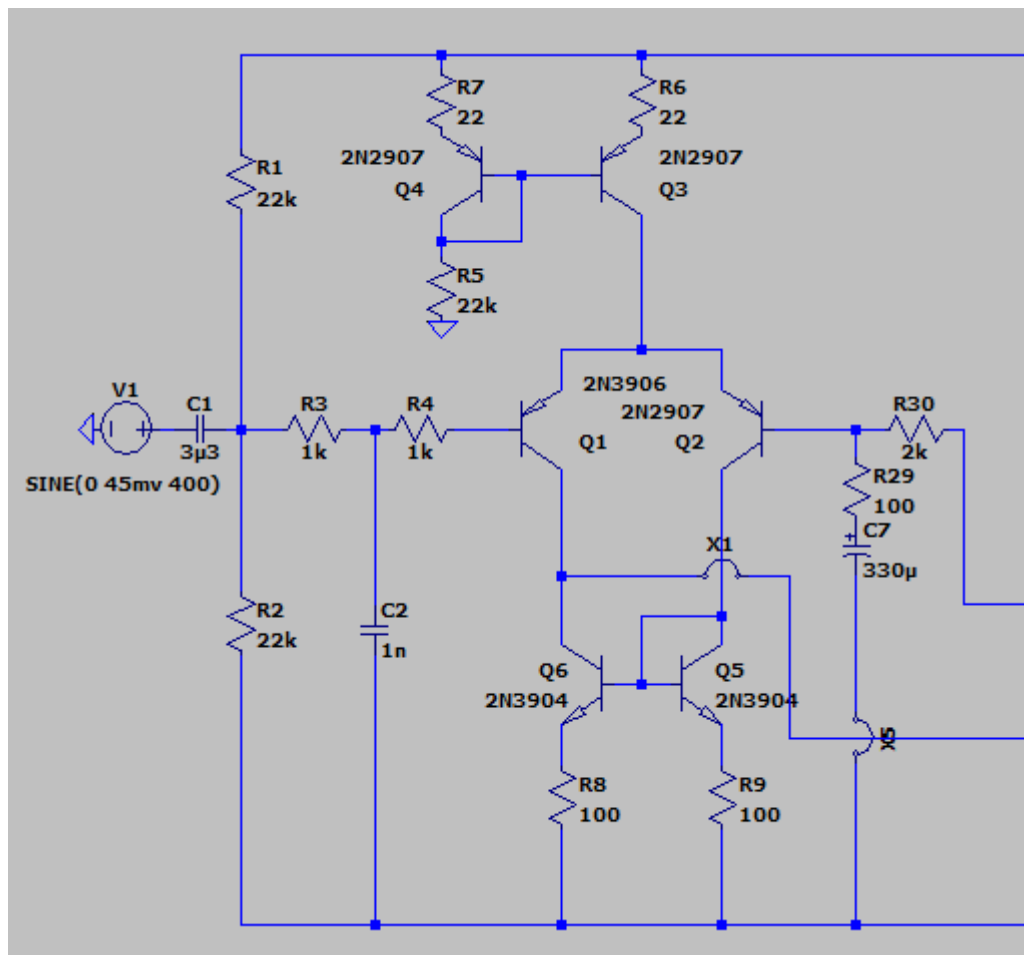


Figura 4.4: Long tailed pair

Circuito de classe A

O sinal de saída da Long tailed pair, é enviado para um circuito de classe A, figura 4.5, que é, mais uma vez, amplificado, é enviado para a fase final, a estágio de saída.

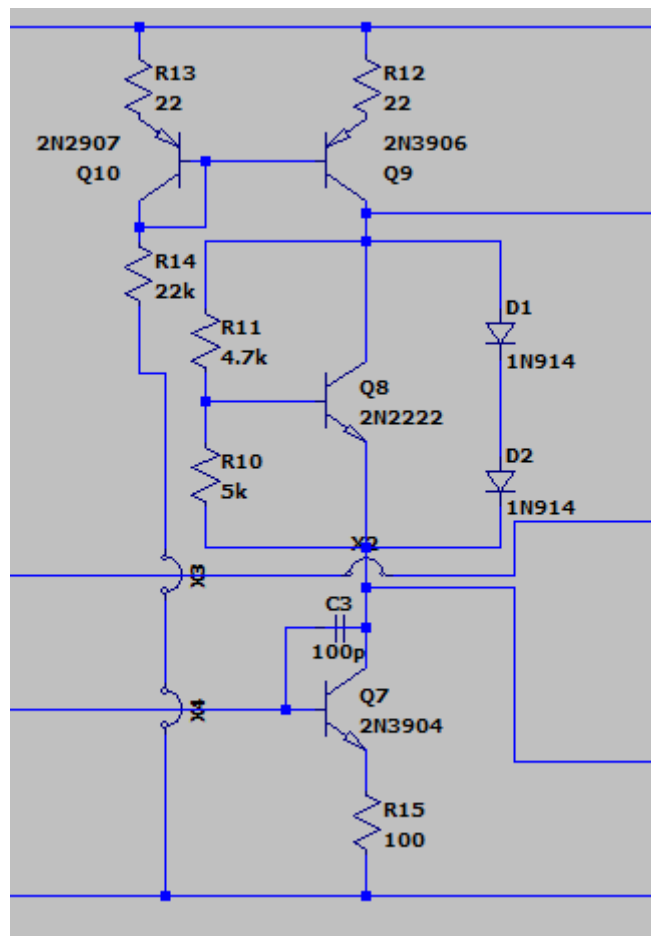


Figura 4.5: Circuito de classe A

Estágio de saída

E finalmente chegamos ao estágio de saída, representado na figura 4.6, que é onde ocorrem as maiores ampliações. Podemos ver as fases anteriores como uma preparação para esta, porque, em suma, todo este circuito são circuitos de amplificação simples, em cascata, seguidos uns aos outros como vimos anteriormente, que originam um sinal de saída grande o suficiente para alimentar uma coluna de som.

Os transístores Q15, Q16 e Q11, Q12 estão configurados em classe AB, e são responsáveis pela amplificação do sinal vindo de fases anteriores, bem como Q14 e Q13. No fim preparar-se o sinal para o sinal para ser enviado para uma coluna de som da a utilização de bobines, L1, e especialmente C5, que vão filtrar o sinal de saída.

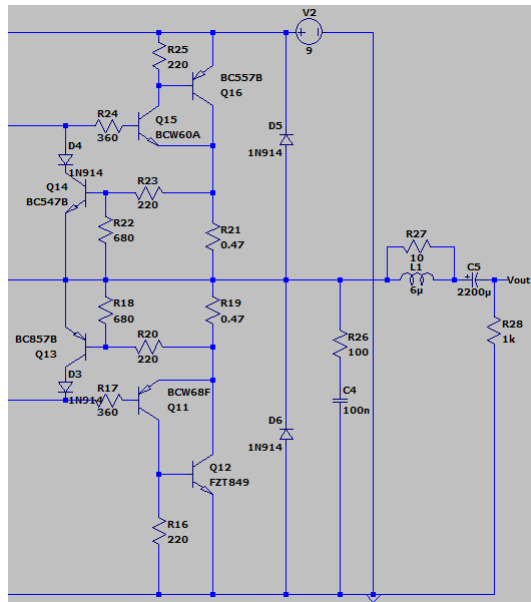


Figura 4.6: estágio de saída

Como podemos observar na figura 4.7, houve um aumento de amplitude da onda, sendo que onda inicial tinha uma tensão de 45 mV, e a final cerca de 1 V, sendo um sinal suficientemente elevado para alimentar uma coluna. Portanto se colocarmos as duas fases juntas, a pré-amplificação e a amplificação de potência, com uma onda inicial de 20 mV, o nosso resultado final, seria uma onda de cerca de 1 V.

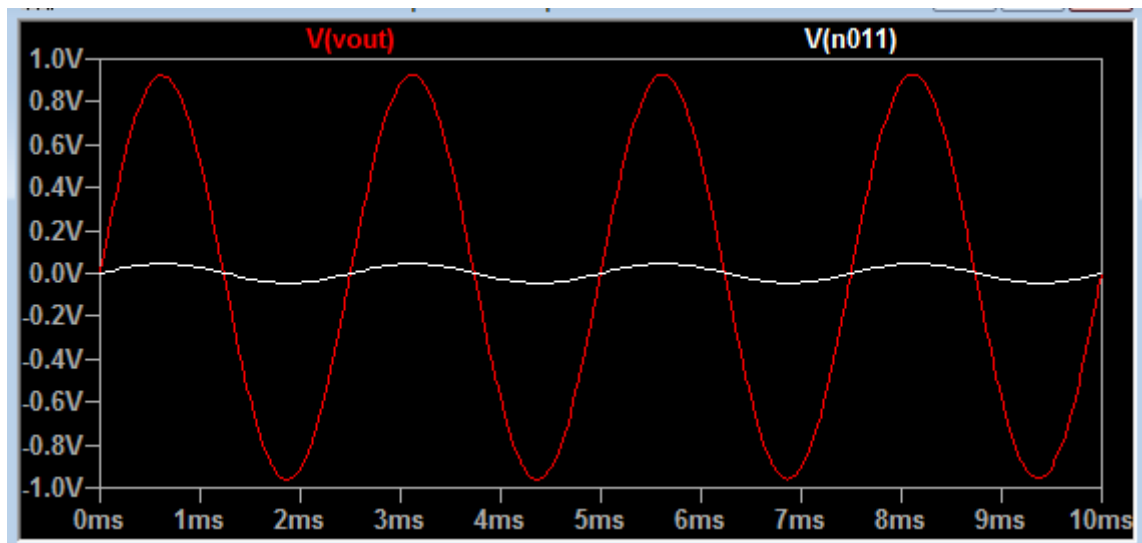


Figura 4.7: Onda resultante, em comparação com a provinda da fase de pré amplificação

4.2 Amplificador com amp-op

Tendo em conta que o circuito anterior, o transistorizado, é um circuito grande, e de certa forma complexo, decidiu-se optar por uma solução mais simples, o amp-op. É mais fácil de usar e tem um ganho muito maior que qualquer transistor ou válvula, o que faz com que o circuito seja mais pequeno, e portanto mais fácil de implementar, como podemos ver na figura 4.8.

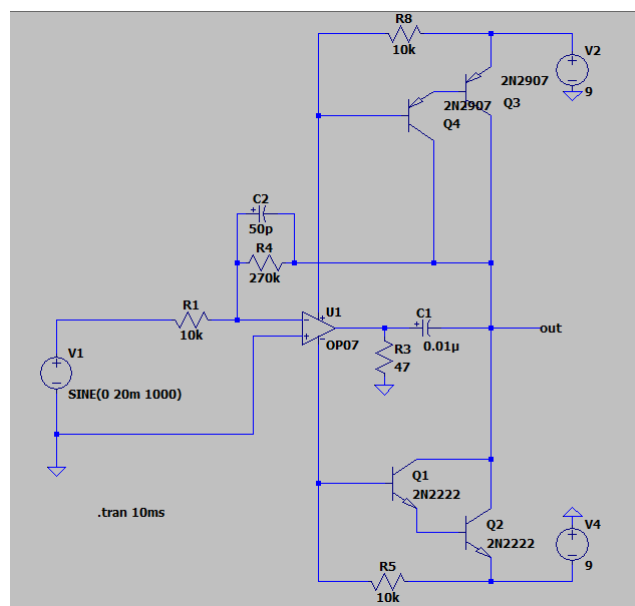


Figura 4.8: Circuito amplificador com amp-op

Neste circuito, o Amp-op está posicionado de maneira, a amplificar o sinal que será enviado para os transístores em configuração Darlington (Q1 e Q2 estão em montagem Darlington, tal como Q3 e Q4). R8 e R5 são na verdade dois potenciômetros, que estão ligados em série com a parte positiva, e negativa do amp-op o que irá variar a resistência, dando a habilidade de aumentar ou diminuir o sinal de saída. O amp-op está configurado como amplificador inversor, portanto o feedback é retirado do sinal de saída, para a entrada negativa, V-, do amp-op.

Quando o sinal de entrada é positivo, vai fazer com que a parte negativa do amp-op seja mais solicitada, e será Q1 e Q2 que farão as ampliações, quando o sinal é negativo, acontece o inverso, sendo Q3 e Q4, os mais solicitados, em seguida o sinal é enviado para o output, neste caso uma coluna de som.

Como podemos observar na figura 4.9, houve um aumento de amplitude da onda, sendo que onda inicial tinha uma tensão de 20mV, e a final cerca de 500mV, o que é um sinal suficientemente elevado para alimentar uma coluna, mas é inferior ao do amplificador transistorizado, então supondo que os dois terão a mesma intensidade de corrente e dado que $P=V \cdot I$, então este amplificador terá menos potência que o transistorizado.

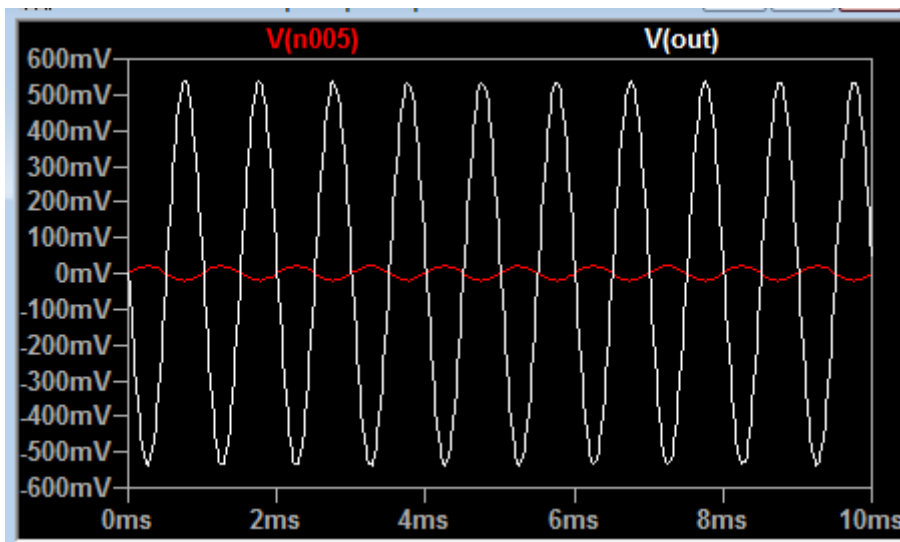


Figura 4.9: Resultado de onda do circuito amplificador com amp-op

4.3 Validação das arquiteturas por simulação

Como podemos verificar, ambos os amplificadores têm as suas vantagens, o transistorizado tem mais potência, enquanto que o amplificador operacional tem um circuito mais simples e fácil de montar.

Sendo assim a melhor solução será aquela que tiver o sinal mais fiável, como menos distorção, usando o LT spice aumentou-se o sinal de entrada de ambos os amplificadores para detetar qual distorce mais cedo. Primeiro aumentam-se os dois sinais de entrada para o dobro, 40 mV, o que aumentou o sinal de saída para cerca do dobro, 2.4 V no transistorizado, e 1.2 V no operacional. Mas as duas ondas mantiveram-se sem distorção. Quando se introduziu uma onda de 100 mV à entrada dos dois, obteve-se o resultado da figura 4.10 que mostra o amplificador transistorizado a adicionar distorção à onda, tornado-a quase quadrada, mas o operacional mantém-se fiel à onda sinusoidal, o que mostra que terá menos distorção, sendo então a melhor escolha de entre os dois.

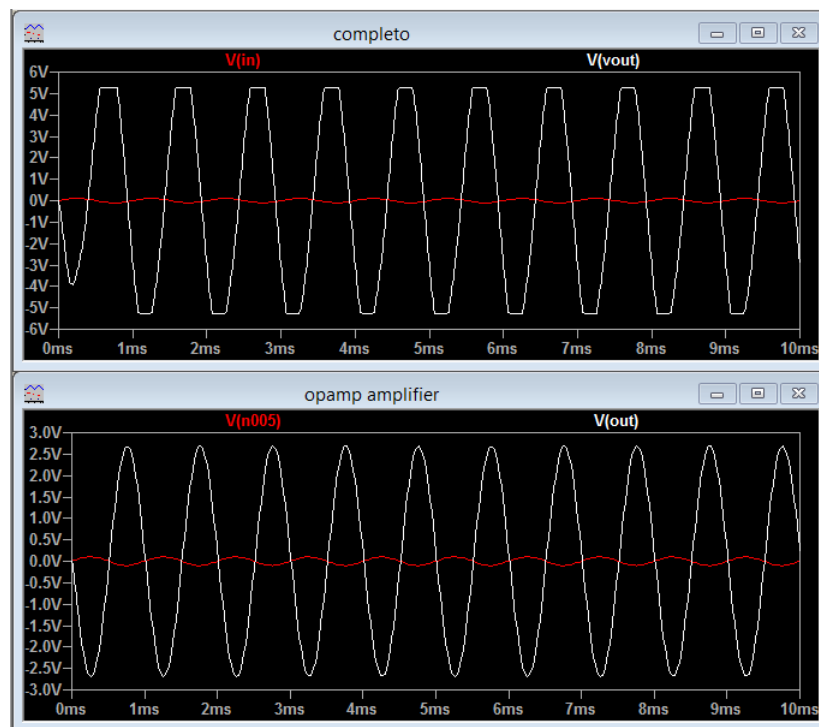


Figura 4.10: Resultado de onda do circuito amplificador transistorizado, na onda de cima, e operacional na onda de baixo, em que ambos estão a 100mV

4.4 Circuito desenvolvido

Em seguida implementou-se o circuito, em bread-board, obtendo o resultado da figura 4.11 utilizou-se uma coluna Blackstar Fly 3 mini que é uma coluna pequena de 8 ohms, portanto o amplificador não deverá ter problemas em alimentar esta coluna.

Ao fazê-lo ligou-se o sinal de entrada ao de um telemóvel, o que servirá como sinal de entrada. Obteve-se o resultado esperado, que seria um aumento do sinal de entrada, mas também um amplificador um pouco ruidoso, o que se pode dar pelo facto de estar implementado numa bread-board. A primeira melhoria que podemos fazer neste circuito, seria soldar todo o circuito numa placa PCB, o que o tornaria menos suscetível a condições externas, portanto com melhor qualidade de som.

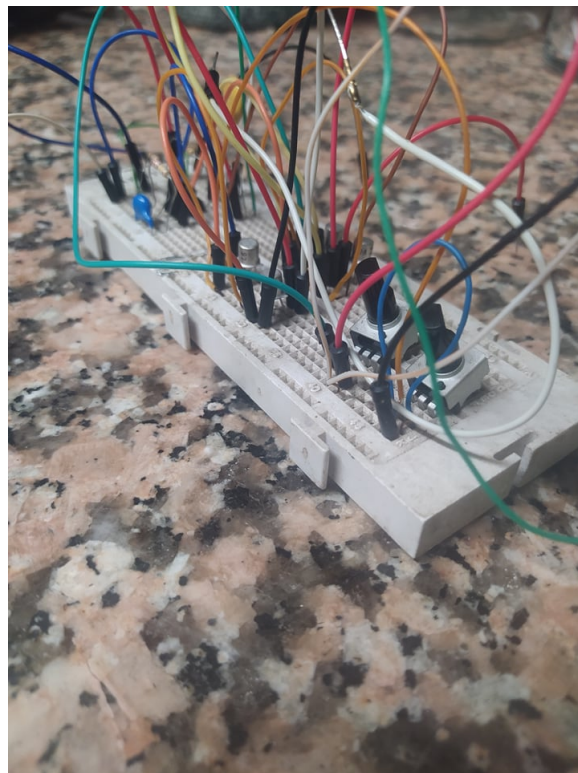


Figura 4.11: montagem do circuito amplificador

Capítulo 5

Resultados

5.1 Distorção Harmónica total

A distorção harmónica total, ou total harmonic distortion (THD), é uma medida que indica quanta distorção harmónica presente em um certo sinal é devida a harmónicas (figura 5.2). A distorção harmónica total é definida pela a razão entre a soma das potências de todos as componentes harmónicas e a potência da frequência fundamental.

Uma onda periódica completamente sinusoidal é uma onda que não contém distorção, portanto teria 0 % de THD. No outro lado do espectro, temos uma onda periódica quadrada, que neste caso teria THD no valor próximo de 100 %, as diferenças podemos ver na figura 5.1 [25].

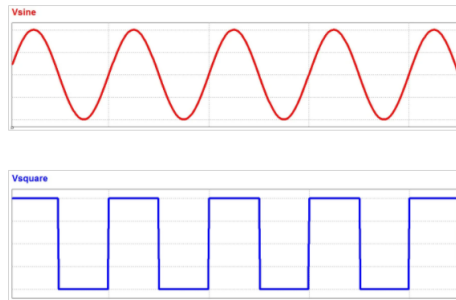
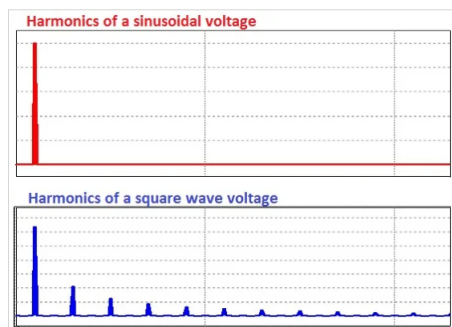


Figura 5.1: A primeira imagem é uma onda sinusoidal, e a segunda uma quadrada

Fonte: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/>



Fonte: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/>

Figura 5.2: A primeira imagem é as harmónicas de uma uma onda sinusoidal, e a segunda são as harmónicas de uma onda quadrada

Neste caso, e em qualquer sistema de áudio, a medição da distorção harmónica total vai ser bastante útil, para perceber a fiabilidade do amplificador. Quanto menor for esta percentagem, mais fidedigno é o amplificador, logo, vai ter uma qualidade de áudio melhor. Em geral, sistemas de energia, com valores baixos de THD significam menores correntes de pico, menos aquecimento, menos emissões eletromagnéticas e menos perdas no núcleo nos motores [25].

5.2 Sistema de medição da distorção

Tal como foi referido anteriormente, o THD é a razão entre a soma das potências de todos os componentes harmónicos e a potência da frequência fundamental, sabendo que a potência dos componentes harmónicos é igual á raiz quadrada do somatório da tensão de todos os componentes harmónicos ao quadrado, então temos a equação da figura 5.3.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n,rms}^2}}{V_{fund,rms}}$$

Figura 5.3: equação de medida da distorção harmónica total

Fonte: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/>

- $V_{n,rms}$: Tensão do número de harmónicas
- $V_{fund,rms}$: Tensão das frequências fundamentais

De forma a obter a THD, optou-se por utilizar as capacidades do Labview, que permite obter a THD de forma muito simples.

Portanto a primeira coisa a fazer será ligar um gerador de sinais ao amplificador, podendo assim controlar o sinal de entrada. Depois liga-se o amplificador às entradas A0, que liga ao ground, e A1, que liga ao sinal de saída do amplificador. A myDAQ , figura 5.4, irá comunicar com o computador pelo cabo usb.



Figura 5.4: Placa de aquisição de sinal, texas instrumental myDAQ

Fonte: <https://www.ni.com/pt-pt/shop/engineering-education/portable-student-devices/mydaq/what-is-mydaq.html>

Assim é necessário implementar uma programa em Labview, que faça a aquisição de sinal, e que depois calcule o valor do THD, e que o converta para percentagens, figura 5.5.

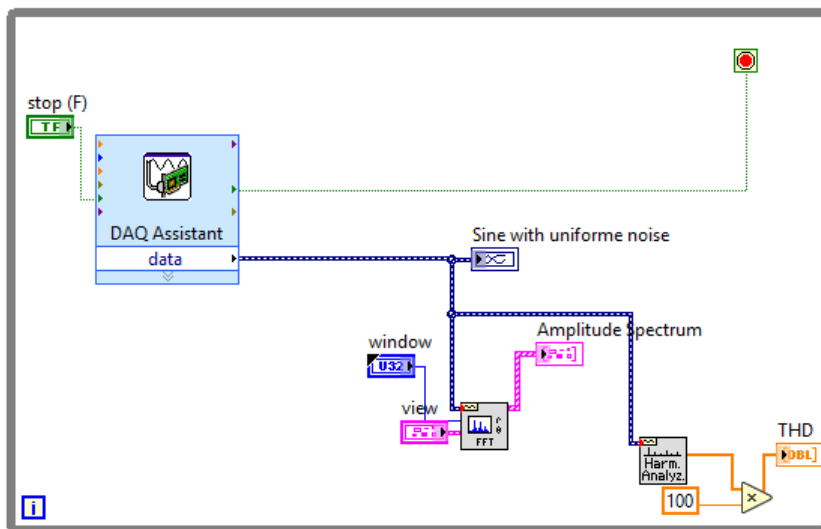


Figura 5.5: Programa de aquisição de sinal

Este programa faz a comunicação entre a placa myDAQ da Texas Instruments através da função, DAQ assistant, depois vai reproduzir a onda sinusoidal, enviada pelo amplificador, apenas para termos uma referência. Depois vai analisar as harmônicas de cada frequência, isto com a função FFT, e por fim faz os cálculos da THD, com a VI Harmic analyzer, e coloca esses cálculos em percentagem, obteve-se assim valor da THD para cada frequência.

5.3 Medição

Nesta fase é possível efetuar medições. Para tal vão ser utilizadas 4 tensões diferentes, 40 mV, 80 mV, 150 mV e 200 mV. Para cada tensão, obtém-se o valor da THD de 8 frequências diferentes, 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 5000 Hz, 10000 Hz e 20000 Hz, em cada medição obtém-se 5 amostras diferentes e faz-se a média entre elas, de modo a ter o valor com a menor flutuação possível, todas as medições foram feitas, com uma frequência amostral de 100 kHz e uma carga de 8 ohms. Assim percebe-se o comportamento da THD ao longo do espectro de frequência do sinal, os resultados obtidos estão nas tabelas seguintes.

frequência [Hz]	amostra 1 [%]	amostra 2 [%]	amostra 3 [%]	Média [%]
100	16,96	17,08	17,15	17,06333333
200	17,25	17,22	17,31	17,26
500	17,97	17,6	17,68	17,75
1000	18,51	18,38	18,62	18,50333333
2000	22,88	23,76	19,76	22,13333333
5000	19,01	19,14	19,08	19,07666667
10000	16,82	16,8	16,84	16,82
20000	16,79	16,63	16,62	16,68
TOTAL				18,16083333

Figura 5.6: Tabela de THD para 40mV

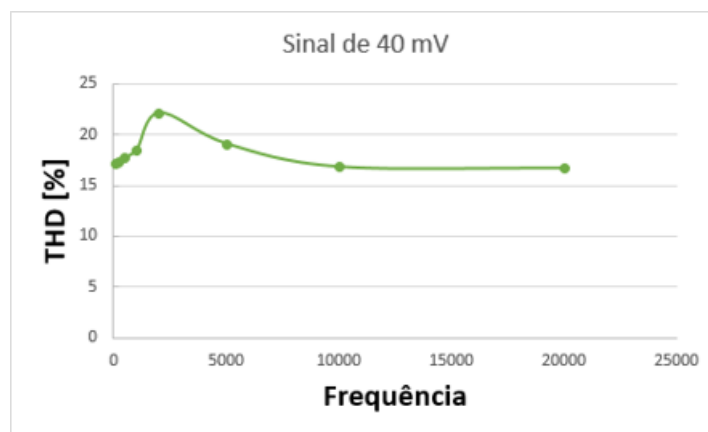


Figura 5.7: Gráfico de THD para 40mV

Frequência [Hz]	amostra 1 [%]	amostra 2 [%]	amostra 3 [%]	média [%]
100	17,01	17,08	17,13	17,07333333
200	17,34	17,4	17,38	17,37333333
500	17,85	17,9	17,95	17,9
1000	18,61	18,64	18,69	18,64666667
2000	22,93	22,76	22,76	22,81666667
5000	19,1	19,14	19,12	19,12
10000	16,92	16,98	16,94	16,94666667
20000	16,65	16,63	16,62	16,63333333
TOTAL				18,31375

Figura 5.8: Tabela de THD para 80mV

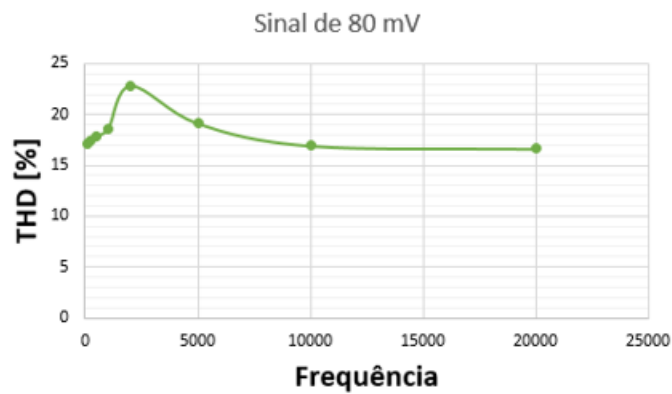


Figura 5.9: Gráfico de THD para 80mV

Frequência [Hz]	amostra 1 [%]	amostra 2 [%]	amostra 3 [%]	média [%]
100	17,1	17,07	17,16	17,11
200	17,38	17,42	17,41	17,40333333
500	17,91	17,99	18	17,96666667
1000	18,71	18,72	18,77	18,73333333
2000	23,03	22,91	22,95	22,96333333
5000	19,19	19,16	19,21	19,18666667
10000	17	16,96	16,99	16,98333333
20000	16,67	16,7	16,72	16,69666667
TOTAL				18,38041667

Figura 5.10: Tabela de THD para 150mV

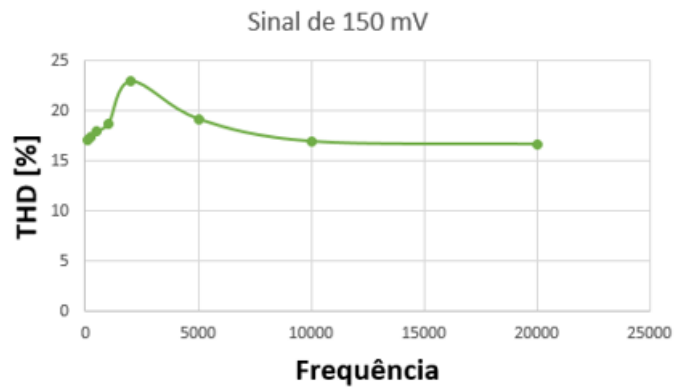


Figura 5.11: Gráfico de THD para 150mV

Frequência [Hz]	amostra 1 [%]	amostra 2 [%]	amostra 3 [%]	média [%]
100	17,12	17,15	17,21	17,16
200	17,48	17,55	17,51	17,51333333
500	18,05	17,98	18,02	18,01666667
1000	18,71	18,72	18,77	18,73333333
2000	23,1	23,14	23,11	23,11666667
5000	19,23	19,21	19,24	19,22666667
10000	17,1	17,05	17,09	17,08
20000	16,69	16,68	16,73	16,7
TOTAL				18,44333333

Figura 5.12: Tabela de THD para 200mV

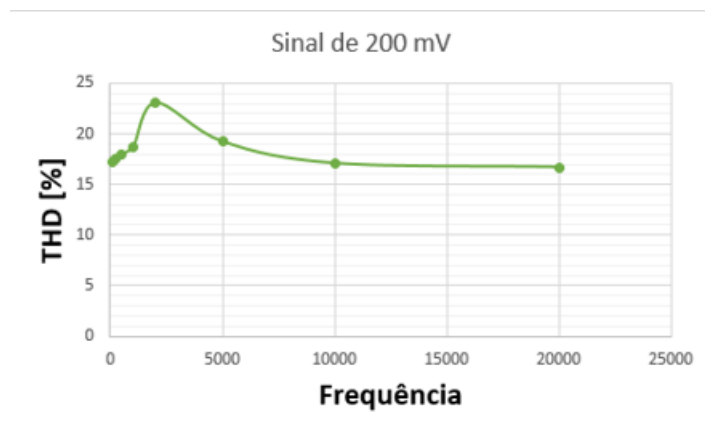


Figura 5.13: Gráfico de THD para 200mV

Analisando estes gráficos podemos observar um aumento do valor da THD ao longo do espectro de frequências a cerca de 2000 Hz, sendo que a partir desse valor a THD começa a baixar. Com este valor de THD podemos concluir que o amplificador tem a sua região de acção nessas frequências, tendo ainda assim boa presença nas regiões mais baixas e mais elevadas. Apesar disto, o amplificador é ainda um pouco ruidoso, tendo um THD sempre superior a 17 % o que ainda é significativo.

Também podemos observar que a variação da tensão pico a pico, não causa mudanças drásticas na curvatura do espectro de frequências, para tal, desenvolvi um gráfico a 3 dimensões, utilizando o Matlab, que tem as quatro curvas anteriores, e como podemos observar, há um pico na região dos 2000 Hz, como tinha sido referido anteriormente.

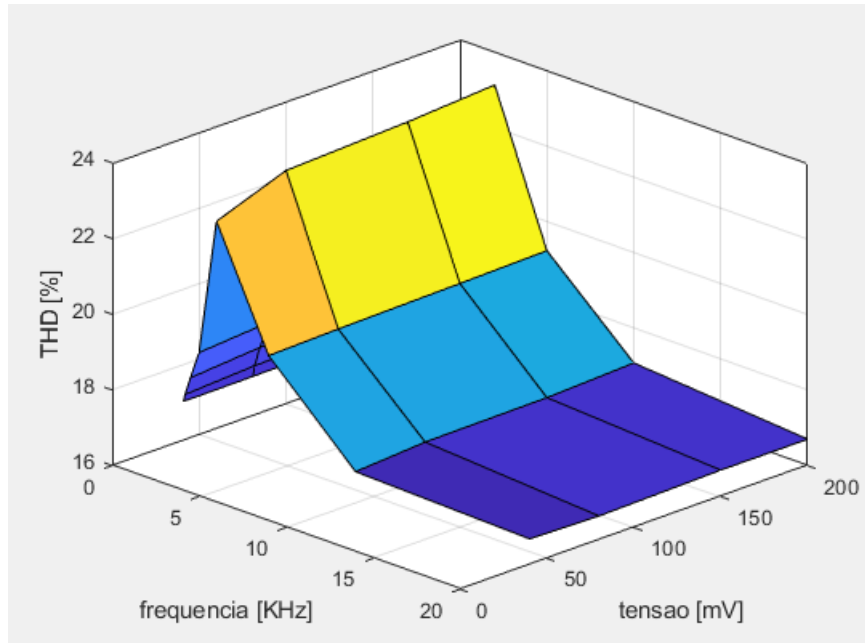


Figura 5.14: grafico em 3D do THD

- x: Tensão [mV]
- y: Frequências [kHz]
- z: THD [%]

Capítulo 6

Conclusão

Assim termina-se esta dissertação. Foi um processo bastante longo, mas muito interessante, pois o tema dos amplificadores é um tema que me é muito querido, pois desde os meus 17 anos que toco guitarra. Foi uma boa oportunidade para alargar os meus conhecimentos sobre este mundo que me fascina. No entanto, e como em qualquer atividade, encontrou-se alguns obstáculos, desde já a maneira como poderia enquadrar este tema numa dissertação, pois é uma área relativamente complexa. Graças à ajuda dos meus orientadores conseguiu-se arranjar maneira de tornar este tema adequado para uma dissertação. Em seguida começou-se a pesquisar circuitos de amplificação, neste caso transistorizados, pois é bastante difícil trabalhar com válvulas, tendo em conta o seu aquecimento, e a facilidade com que se podem estragar. Essa pesquisa também não foi fácil, mas por fim conseguiu-se arranjar uma solução capaz de satisfazer as necessidades existentes, e começou-se a implementar o circuito em LTSpice, um programa de simulação de circuitos. Desta forma pode-se testar o circuito, sem que com isso ponha em causa a integridade dos componentes reais, e quando por fim se deu por terminada essa tarefa, percebeu-se que o amplificador implementado tinha demasiada distorção, o que vai fazer com que o sinal fosse demasiado sujo, e então tive-se de começar tudo de novo, mas desta vez optou-se por um circuito mais simples. Neste caso utilizou-se um amp-op, amplificador operacional, capaz de ganhos bastante elevados, com um circuito bastante mais pequeno, e assim obtive-se o circuito amplificador. Neste caso é um circuito inversor, com os transístores em configuração darlington, que resultou num circuito muito mais fiável que o anterior, em seguida construiu-se o amplificador real. Finalmente obtive-se um amplificador com algum ruído, talvez pelo facto de o ter implementado numa breadboard, mas o que saltou mais à vista, foi que este amplificador, apesar de fidedigno, tinha um som predominante nas frequências mais médias, mas que até tinha alguma distribuição ao longo do espectro, sendo que ainda assim é um pouco ruidoso.

Para confirmar tal teoria, tivemos de fazer o teste do THD, ou seja, medir a taxa de distorção harmónica do amplificador. Para tal ligou-se a entrada do circuito a um gerador de sinal, e a saída a uma placa de aquisição de sinal, neste caso a myDAQ da Texas Instruments. Ligou-se a placa via usb ao computador, que, utilizando o Labview, calculou-se a THD do sinal, e verificou-se então esse facto.

Bibliografia

- [1] G. M. Prediger, J. de Moraes, G. J. Maldaner, and K. A. Hoffman, “James clerck maxwell: um grande nome na ciência,” in *8^a MOEPEX*, 2019.
- [2] D. Dowson, “Men of tribology: Heinrich rudolph hertz (1857–1894) and richard stribeck (1861–1950),” vol. 101, pp. 115–119, 1979.
- [3] M. Valentinuzzi, “Nikola tesla: why was he so much resisted and forgotten?” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 17, no. 4, pp. 74–75, 1998.
- [4] C. H. Sterling, “de forest, lee (1873-1961), radio engineer and inventor,” 2000.
- [5] J. A. Hijiya, *Lee de Forest and the Fatherhood of Radio*. Lehigh University Press, 1992.
- [6] E. H. Armstrong, “Some recent developments in the audion receiver,” *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 3, no. 3, pp. 215–238, 1915.
- [7] C. Bull, “The alignment of grids in thermionic valves,” *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*, vol. 92, no. 18, pp. 86–92, 1945.
- [8] “The rickenbacker book: a complete history of rickenbacker electric guitars,” vol. 32, pp. 32–4407–32–4407, 1995.
- [9] D. L. Morton, “Makers of the microchip: A documentary history of fairchild semiconductor,” *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 33, no. 3, pp. 81–81, 2011.
- [10] L. E. Hoddeson and V. Daitch, *True genius: the life and science of John Bardeen*. Joseph Henry Press, 2002.

- [11] J. N. Shurkin, *Broken genius: The rise and fall of William Shockley, creator of the electronic age*. Palgrave Macmillan, 2006.
- [12] “A invenção ou co-invenção do primeiro amp-op, foi creditada a george a. philbrick e outros integrantes, incluindo c. a. lovell e loebe julie.” [Online]. Available: <https://docplayer.com.br/4779212-A-invencao-ou-co-invensao-do-primeiro-amp-op-foi-creditada-a-george-a-philbrick-e-outros-integrantes-incluindo-c-a-lovell-e-loebe-julie.html>
- [13] T. H. Lee, “Ic op-amps through the ages,” *PDF*). *Stanford University Handout*, vol. 18, 2002.
- [14] “Pride music funclub: Fender.” [Online]. Available: <https://www.fender.com.br/historia>
- [15] R. Brakes, “The history of fender tweed amps,” *Guitarist*, 2021.
- [16] J. Elyea, *Vox Amplifiers: The JMI Years*. History for Hire Press, 2008.
- [17] R. Maloof, *Jim Marshall, the Father of Loud: The Story of the Man Behind the World’s Most Famous Guitar Amplifiers*. Hal Leonard Corporation, 2004.
- [18] H. Choi, X. Li, S.-T. Lau, C. Hu, Q. Zhou, and K. K. Shung, “Development of integrated preamplifier for high-frequency ultrasonic transducers and low-power handheld receiver,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 58, no. 12, pp. 2646–2658, 2011.
- [19] B. Kim, J. Kim, I. Kim, and J. Cha, “The doherty power amplifier,” *IEEE microwave magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 42–50, 2006.
- [20] aviacomarte, “Amplificadores-transistorizados,” *aviacomarte*, 2015.
- [21] “Amplifier classes and the classification of amplifiers,” Jun 2019. [Online]. Available: <https://www.electronicstutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>
- [22] “Transistorizado vs valvulado: Qual o melhor amplificador para você.” [Online]. Available: <https://musicjungle.com.br/blog/amplificador/transistorizado-vs-valvulado-qual-o-melhor-amplificador-para-voce>

- [23] E. na categoria "Conceitos de eletricidade" por Henrique Mat-
tede., "O que são amplificadores operacionais?" [Online]. Avail-
able: [https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-amplificadores-
operacionais/](https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-amplificadores-operacionais/)
- [24] R. P. IST, "Amplificadores operacionais ampop," Mar 2007.
[Online]. Available: [https://www.electronica-pt.com/amplificadores-
operacionais-ampop](https://www.electronica-pt.com/amplificadores-operacionais-ampop)
- [25] "Understanding, calculating, and measuring total har-
monic distortion (thd) - technical articles." [Online].
Available: [https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-
importance-of-total-harmonic-distortion/](https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/)