

ESTUDO E ANÁLISE DE EQUALIZADOR BAXANDALL PARA AMPLIFICADORES DE ÁUDIO CLASSE AB



<https://doi.org/10.22533/at.ed.5832531039>

Data de aceite: 18/07/2025

Suely dos Santos Araújo

Discente do Curso de Bacharelado
em Engenharia Elétrica – IFS Campus
Lagarto

Elias Alves de Jesus

Discente do Curso de Bacharelado
em Engenharia Elétrica – IFS Campus
Lagarto

Ana Claudia de Melo Oliveira

Professor(a) do Curso de Bacharelado
em Engenharia Elétrica – IFS Campus
Lagarto

Iraí Tadeu Ferreira de Resende

Professor(a) do Curso de Bacharelado
em Engenharia Elétrica – IFS Campus
Lagarto

Henrique Nunes de Santana

Professor do Curso de Bacharelado em
Ciência da Computação – IFS Campus
Itabaiana

Hércules Antônio Sottero Macedo

Professor do Curso Técnico Integrado
em Automação Industrial – IFS Campus
Lagarto

Arthur Guilherme Silva Maia

Professor do Curso Técnico Integrado
em Automação Industrial – IFS Campus
Lagarto

Luma Mirely de Souza Brandão

Professora do Curso de Bacharelado em
Arquitetura – IFS Campus Lagarto

Vanderlei Alves Santos da Silva

Profissional Do Ramo De
Desenvolvimento Tecnológico

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo sobre as etapas de atuação dos amplificadores de áudio classe AB, especificamente do tipo TDA2030, conjuntamente com a atuação da etapa de pré-amplificação, sem e com a integração de um equalizador. Além disso, foram analisados os ajustes de graves e agudos em frequências selecionadas, conforme o range do espectro de frequência, visando comparar os parâmetros desse estudo, distorção harmônica total (THD) e o ganho de corrente. A montagem das etapas e integração do equalizador no sistema de áudio permitiram avaliar os impactos na qualidade sonora. Os resultados mostraram

que a adição da etapa de equalização reduziu a THD, sendo a maior redução observada no ajuste máximo dos agudos, com uma diminuição de 83,57% em relação ao sistema na etapa sem equalização. Isso pode estar relacionado à frequência selecionada de 10 KHz, a qual se encontra próximo do limite do espectro de frequências audíveis dos humanos. Entretanto, para o ajuste dos graves houve um aumento no ganho de corrente de 5,34 e no ajuste dos agudos de 3,07 em relação à etapa inicial, devido ao ajuste total dos potenciômetros. Desse modo, com o acoplamento do equalizador Baxandall no sistema de áudio contribuiu para a diminuição da THD e a melhoria na qualidade sonora.

PALAVRAS-CHAVE: Amplificação, Qualidade sonora, Frequência, Distorção harmônica, Ganho de corrente.

INTRODUÇÃO

Na grande maioria das aplicações, os sistemas eletrônicos apresentam sinal de entrada baixo. Os transistores de pequeno sinal apresentam uma faixa de potência de menos de 1W, os quais atuam tipicamente na fase inicial dos sistemas eletrônicos. Os amplificadores de pequenos sinais também conhecidos como pré-amplificadores são utilizados com o objetivo de proporcionar ganho de tensão e realizar casamento de impedâncias, além disso precisam assegurar linearidade na amplificação (Malvino; Bates, 2016).

O amplificador LM386 é considerado um dos circuitos integrados mais versáteis, quando se requer potências de áudio inferiores a 1 W. O mesmo fornece baixa potência na faixa de 250 à 700 mW, com cargas de 4 à 16 ohms, sendo bem compacto e projetado para uso em aplicações de baixa voltagem de 4 V à 12 V. Esse amplificador não necessita de dissipador de calor e nem de fonte simétrica. É importante destacar que fornece boa qualidade de áudio e amplificação (Braga, 2012).

Já a função dos amplificadores de potência, também chamados de amplificadores de grandes sinais é proporcionar ao ganho de corrente fornecendo a potência suficiente para acionar uma determinada carga tipo alto-falante (Solsona; Moya, 2005). Além disso, há também os transistores de potência, que possuem uma faixa de potência de mais de 1W, esses atuam mais na fase final dos sistemas eletrônicos (Malvino; Bates, 2016). Especificamente alguns tipos de amplificadores de potência usuais, tais como o TDA2030, o qual é um circuito integrado amplificador de áudio HI-FI que possui uma potência de saída típica de 14 W RMS, distorção máxima de 0,5 % de acordo com as características elétricas específicas, sendo considerado classe AB de baixa frequência. Adicionalmente, conta com os circuitos de proteção contra excesso de temperaturas, a fim de evitar danos ao componente, sendo esses dados especificados no *Datasheet* da THOMSON Microelectronics (2024).

Segundo Boylestad e Nashelsky (2013), um método utilizado para a classificação dos amplificadores de potência é através das classes de operação. O modo como os transistores do estágio de saída opera é o que determina o tipo de classe de operação de um amplificador, seja A, B, AB, D, dentre outras, na tentativa de se obter uma maior linearidade (menor distorção) e/ou rendimento.

Os amplificadores de potência classificados como lineares utilizam comumente a técnica da polarização contínua. Esse método tem por finalidade a amplificação de um dado sinal de entrada sem que haja alteração do mesmo. Além disso, em alguns casos possuem alta fidelidade sonora e baixa distorção. Em contrapartida, os lineares tendem a consumir maiores quantidades de energia se comparados aos chaveados, pois trabalham na região ativa de polarização do transistor (Bortoni, 2002).

A equalização do som é o processo de ajuste do equilíbrio da frequência de áudio, ou seja, equalizar, reforçar ou enfraquecer o som em uma determinada frequência específica das bandas ou faixas de frequência. Os equalizadores são divididos em alguns tipos de categoria, tais como, o paramétrico, o semi-paramétrico, o não paramétrico e o gráfico. Cada um desses possui alguns parâmetros específicos, como frequência central, largura de banda, amplitude de banda e fator de qualidade (Anjos, 2018).

O equalizador paramétrico é mais indicado para aplicações mais delicadas, pois possuem vantagens em relação aos demais, proporcionando controle preciso sobre as frequências ajustadas para áudio e algumas técnicas de produção musical. É utilizado para ajustar parâmetros de um sinal de áudio, como amplitude (ganho), frequência central e largura de banda (Q) (Martins, 2010). Por outro lado, o equalizador semi-paramétrico combina as características de equalizadores paramétricos e gráficos, permitindo assim ajustes precisos e largura de banda Q fixa (Menezes, 2012).

O equalizador mais utilizado é o gráfico, pois permite ao operador controlar o ganho na banda desejada e o mesmo apresenta menor complexidade e custo. Em contrapartida, os equalizadores paramétricos são os mais complexos, possuem um maior custo e são utilizados principalmente em estúdios de gravação profissionais por serem mais flexíveis permitindo ao usuário a configuração de três parâmetros: ganho, frequência central e fator de qualidade (Rosa, 2012).

Já o equalizador não paramétrico é conhecido como o mais simples dos equalizadores. Possui 2 ou 3 filtros, os quais realizam o controle das faixas de frequências graves e agudos ou graves médios e agudos, respectivamente sem afetar as outras frequências do espectro sonoro. Além disso, proporcionando, assim, uma resposta sonora de alta qualidade de forma a obter um controle preciso assim como integralidade do sinal amplificado. É comumente utilizado em equipamentos de áudio mais antigos. O equalizador Baxandall, criado pelo engenheiro de áudio e eletrônico Peter J. Baxandall em 1952, é considerado o tipo mais conhecido. (Beber, 2018).

A resposta do sinal de saída de um circuito amplificador ideal é réplica do sinal de entrada amplificado, porém na prática essa situação não é possível devido às perdas provenientes do circuito, problemas que atingem a rede elétrica e limitações dos componentes eletrônicos. Assim, em virtude destas não-linearidades e limitações, o sinal a ser amplificado sempre apresentará algum nível de distorção. A distorção harmônica total é a composição das distorções harmônicas individuais que expressa o grau de desvio da onda em relação ao padrão ideal, normalmente referenciada ao valor da componente fundamental (Bortoni, 2002).

Em amplificadores de áudio o ganho de corrente desempenha um papel importante na determinação do desempenho e eficiência de um circuito. É definido como a relação entre a corrente de saída e a corrente de entrada em um amplificador (Sedra; Smith, 2007).

Diante do exposto, esse trabalho visa investigar a importância da aplicação do equalizador Baxandall através dos parâmetros de estudo a distorção harmônica (THD) e ganho de corrente. Além disso, montar e realizar a integração desse equalizador no sistema de áudio e fazer a análise da melhoria na qualidade sonora.

Desta forma, espera-se que esse estudo possa contribuir para a pesquisa acadêmica na área de eletrônica analógica, pois facilitará o entendimento da integração das etapas de equalização, pré-amplificação e amplificação de potência em termos de análise de sinais de áudio que serão entregues à carga, visto que o processo de equalização favorece na prática a minimização da distorção harmônica total, beneficiando assim a eficiência das classes de operação dos amplificadores de potência e consequentemente obtendo um aumento de ganho de corrente. Os resultados obtidos da THD e ganho de corrente foram analisados nas condições de etapa sem equalizador e com acoplamento do equalizador Baxandall (ajuste agudo e grave em FLAT; ajuste grave (0% e 100%) e agudo em FLAT e ajuste agudo (0% e 100%) grave em FLAT) no sistema de áudio analisado.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Figura 1 apresenta a estrutura de um amplificador de áudio convencional. O transdutor na entrada possui geralmente um pequeno sinal, da ordem alguns milivolts, por exemplo, microfone, instrumento musical, etc., o qual necessita ser amplificado através dos pré-amplificadores para proporcionar um ganho de tensão para ser aplicado ao amplificador de potência e assim acionar um determinado dispositivo de saída, por exemplo, alto-falante (Boylestad; Nashelsky, 2013).

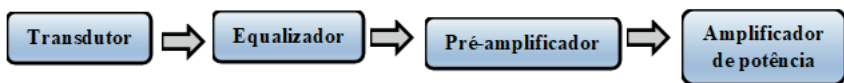


Figura 1 – Estrutura de um amplificador de áudio convencional

Fonte: Autoria própria, 2024.

Segundo Hlaing (2019), a faixa de frequência de áudio para o ouvido humano é comumente utilizada entre 20 Hz e 20.000 Hz, os sons inferiores a 20 Hz são considerados infrassons e os sons superiores a 20.000 Hz são os ultrassons. A Tabela 1 apresenta o espectro de frequências audíveis pelos humanos.

Descrição	Som audível					
Espectros	Subgraves (Hz)	Graves (Hz)	Médios Graves (Hz)	Médios (Hz)	Médios Agudos (Hz)	Agudos (Hz)
Frequência	20 à 60	60 à 250	250 à 640	640 à 2.500	2.500 à 5.000	5.000 à 20.000

Tabela 1 – Espectro de frequências audíveis pelos humanos

Fonte: Hlaing (2019)

A percepção do som está associada com alguns adjetivos, tais como fraco ou forte e grave ou agudo, respectivamente, todavia essas características dependem de algumas propriedades físicas das ondas sonoras, que são a amplitude e a frequência. Um som é caracterizado como grave quando sua frequência é considerada baixa e o som agudo quando a frequência é alta. Já os sons médios encontram-se na zona intermediária entre os sons graves e agudos (Doria e Marinho, 2006).

Para analisar os impactos dos parâmetros de estudo deste trabalho (distorção harmônica e ganho de corrente) na qualidade sonora, é importante ressaltar o estudo das classes de operação de um amplificador de áudio. Este, permite escolher o amplificador adequado de acordo com as necessidades de cada sistema de áudio.

Assim, existem diversas classes de operação, sendo as classes de operação de áudio, A, B e AB base deste estudo, enfatizando a classe de operação AB que será o foco deste trabalho, uma vez que a classe AB une as características das classes A e B, visando assim uma melhor qualidade de som e baixo consumo de energia.

Classe A: O amplificador classe A é a forma mais simples de amplificador de potência que usa um único transistor de comutação na configuração do circuito emissor comum padrão, a fim de produzir uma saída invertida. O transistor opera sempre na região ativa e conduz por um ciclo completo de 360°, a corrente do coletor flui durante todo o período do sinal de entrada. O ponto Q tende a ficar situado em algum ponto próximo da metade da reta de carga, de forma que o transistor não atue na região de corte e nem na de saturação, o que ocasionaria distorção do sinal (Malvino; Bates, 2016). A Figura 2 apresenta a topologia comumente utilizada para o amplificador classe A.

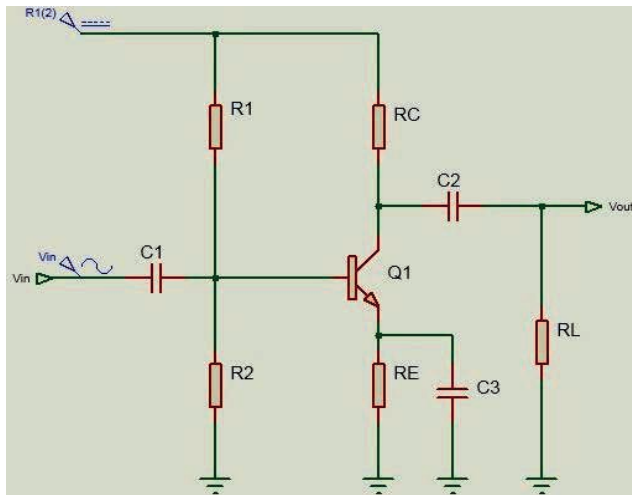


Figura 2 - Amplificador de potência classe A.

Fonte: Autoria própria, 2024.

O amplificador classe A apresenta alta fidelidade e baixa distorção (<1%), porém com um consumo de potência grande, ou seja, o mesmo gasta muita energia e seu preço é alto. A eficiência está entre 25% e 50%, ou seja, esta classe não é muito utilizada em aplicações de potência (Boylestad; Nashelsky, 2013).

Eficiência Teórica

A eficiência de um amplificador classe A é dada pela equação 1. A potência de saída AC é dada pela equação 2. A potência de entrada DC é dada pela equação 3.

Eficiência de um amplificador de potência

$$\eta = \frac{P_{Saída}}{P_{DC}} * 100\% \quad (1)$$

Potência de saída de um amplificador de potência

$$P_{Saída} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} = \frac{V_{pp}^2}{8R_L} = \frac{(MPP)^2}{8R_L} \quad (2)$$

Potência de entrada de um amplificador de potência.

$$P_{CC} = V_{CC} * I_{CC} \quad (3)$$

Organizando os termos, tem-se a equação 4:

$$\eta = \frac{P_{Saída AC}}{P_{Entrada DC}} * 100\% = \frac{\frac{(MPP)^2}{8 * R_L}}{V_{CC} * I_C} * 100\% \Rightarrow \quad (4)$$

Como $I_c = V_{rc}/R_c$, tem-se a equação 5:

$$\eta = \frac{\frac{(MPP)^2}{8 * R_L}}{V_{CC} * \frac{V_{RC}}{R_C}} * 100\% \quad (5)$$

Como a tensão na resistência do coletor é igual a tensão V_{ce} .

$$V_{RC} = V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2} \quad (6)$$

Logo, tem-se:

$$\eta = \frac{\frac{(V_{CC})^2}{8 * R_L}}{V_{CC} * \frac{V_{CC}}{2 * R_C}} * 100\% = \frac{\frac{(V_{CC})^2}{8 * R_L}}{\frac{(V_{CC})^2}{2 * R_C}} * 100\%$$

A eficiência máxima irá ocorrer quando resistência de carga for igual a resistência do coletor.

$$\eta = \frac{\frac{(V_{CC})^2}{8 * R_C}}{\frac{(V_{CC})^2}{2 * R_C}} * 100\% = \left(\frac{(V_{CC})^2}{8 * R_C} * \frac{2 * R_C}{(V_{CC})^2} \right) * 100\% \Rightarrow \quad (8)$$

Dessa forma, a máxima eficiência para um amplificador classe A é definida pela equação 9:

$$\eta = \frac{2}{8} * 100\% = 0,25 * 100\% \Rightarrow 25\% \quad (9)$$

Classe B: Usa-se o amplificador classe B para obtenção de maior potência e eficiência quando comparado ao amplificador Classe A anteriormente. para isso utiliza-se dois transistores complementares no estágio de saída, sendo um transistor NPN ou canal N e o outro um transistor PNP ou canal P. A corrente do coletor flui por apenas metade do ciclo (180°) do sinal de entrada. O ponto Q tende a ficar na região de corte. A topologia do amplificador de potência classe B é comumente encontrado de duas formas diferentes, classe B elementar e o classe B *push-pull*. A Figura 3 apresenta a topologia elementar de um amplificador classe B.

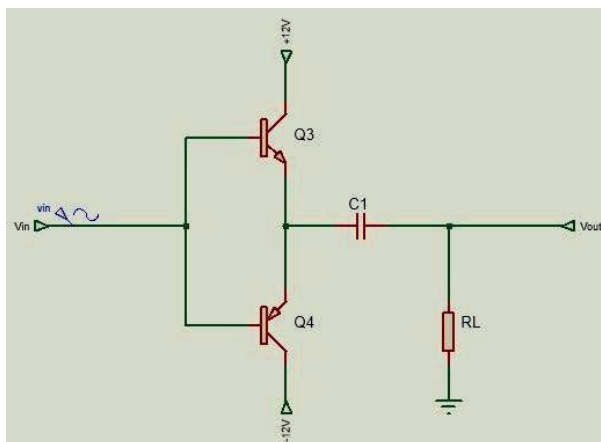


Figura 3 - Amplificador de potência classe B elementar.

Fonte: Autoria própria, 2024.

A principal vantagem dessa classe B é uma maior eficiência (78,5%), entretanto a principal desvantagem é uma maior distorção (>5%), a chamada distorção de cruzamento (*crossover*) devido os transistores se apresentarem na região de corte. Esse fator está relacionado ao fenômeno criado no intervalo em que a tensão de entrada está entre as tensões de limiar dos transistores ($-0,7V < V_i < 0,7V$) (Solsona; Moya, 2005).

A Figura 4 demonstra o efeito da Distorção de *Crossover* de um amplificador de potência classe B elementar visualizado através da tela do osciloscópio da *Agilent Technologies*, modelo DSO-1072B 70MHz.



Figura 4 - Distorção de Crossover.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Devido a limitação da classe B no que diz respeito a distorção cruzada, uma outra topologia dessa classe é também utilizada, a classe chamada classe B *push-pull*, a qual tende atenuar a distorção cruzada existente na classe B elementar. A Figura 5 apresenta a topologia *push-pull* de um amplificador classe B (Solsona; Moya, 2005).

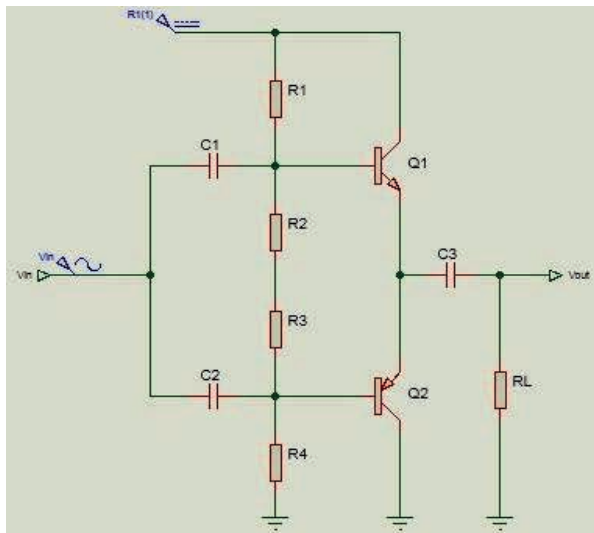


Figura 5 - Amplificador de potência classe B push-pull.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Eficiência Teórica

A eficiência de um amplificador classe B é dado pela Equação 1. A potência de saída AC é dada pela equação 2. A potência de entrada DC é dada pela equação 3.

I_{DC} pode ser escrito conforme a equação 10:

$$I_{DC} = \frac{2}{\pi} * I_P \quad (10)$$

Sendo, I_P = Valor de pico da corrente de saída.

Logo, a equação 11 é:

$$P_{Entrada\ DC} = V_{CC} * \frac{2}{\pi} * I_P \quad (11)$$

Dessa forma, a eficiência teórica é apresentada de acordo com a equação 12:

$$\eta = \frac{P_{Saída\ AC}}{P_{Entrada\ DC}} * 100\% = \frac{\frac{V_p^2}{2 * R_L}}{V_{CC} * \frac{2}{\pi} * I_P} * 100\% \quad (12)$$

Organizando os termos da equação 12, tem-se a equação 13:

$$\eta = \left(\frac{V_p^2}{2 * R_L} * \frac{\pi}{V_{CC} * 2 * I_P} \right) * 100\% = \frac{\pi}{4} * \frac{V_p^2}{V_{CC} * R_L * I_P} * 100\% \quad (13)$$

A tensão de pico pode ser relacionada como a multiplicação entre a resistência da carga e a corrente de pico que por ela passa. Logo tem-se que:

$$\eta = \frac{\pi}{4} * \frac{V_p * V_p}{V_{CC} * V_p} * 100\% \quad (14)$$

A eficiência máxima possível para o amplificador Classe B ocorrerá quando a tensão de pico for igual à tensão da fonte, conforme dedução da equação 15.

$$\eta = \frac{\pi}{4} * \frac{V_p * V_p}{V_p * V_p} * 100\% \quad (15)$$

$$\eta = \frac{\pi}{4} * 100\% = 0,785 * 100\% \Rightarrow 78,5 \%$$

Classe AB: O amplificador classe AB une características de um amplificador classe A e de um amplificador classe B. Do amplificador classe A aproveita a baixa distorção e do amplificador classe B o baixo consumo de energia (Self, 2009). O ponto Q tende a ficar um pouco acima da região de corte. Segundo Boylestad e Nashelsky (2013), a classe AB apresenta eficiência entre 25%, 50% e 78,5%. Tem como propósito a eliminação da distorção de cruzamento (crossover) através de uma pequena corrente de polarização ($I \neq 0$) dos transistores de saída (Malvino; Bates, 2016).

A classe AB também possui maior linearidade em relação à classe B, em virtude da atuação dos transistores os quais são mantidos polarizados mesmo após o cruzamento na transição do eixo. Isso ocorre devido ao par de diodos existentes na configuração, cuja a soma das tensões dos diodos totaliza 1,4 V, de forma a polarizar os transistores um pouco acima da região de corte durante o intervalo em que os dois transistores entram em corte (-0,7 V a 0,7 V); ou seja, essa mudança tende a eliminar a distorção por crossover (Choueri; Cruz, 2018).

A topologia do amplificador de potência classe AB tem por finalidade solucionar as limitações apresentadas pela classe B topologia *push-pull*. A Figura 6 apresenta um amplificador de potência classe AB.

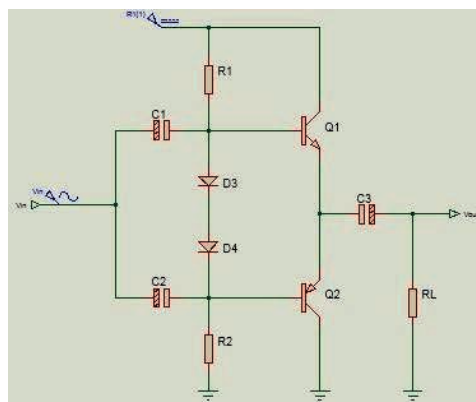


Figura 6 - Amplificador de potência classe AB.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Eficiência Teórica

A eficiência de um amplificador classe AB é dada pela equação 1. A potência de saída AC é dada pela equação 2.

A potência de entrada DC é dada pela equação 16.

$$P_{Entrada\ DC} = \frac{2 * V_{CC} * I_{máx}}{\pi} \quad (16)$$

Dessa forma, a eficiência teórica é apresentada de acordo com a equação 17

$$\eta = \frac{P_{Saída\ AC}}{P_{Entrada\ DC}} * 100\% \quad (17)$$

$$\eta = \frac{\frac{V_{CC} * I_{máx}}{2}}{\frac{2 * V_{CC} * I_{máx}}{\pi}} * 100\% \Rightarrow$$

Organizando os termos da equação 17, tem-se a equação 18:

$$\eta = \left(\frac{\pi * V_{CC} * I_{máx}}{4 * V_{CC} * I_{máx}} \right) * 100\% \Rightarrow \quad (18)$$

Assim, a eficiência máxima possível para o amplificador Classe AB é definida pela equação 19:

$$\eta = \frac{\pi}{4} * 100\% \Rightarrow 78,5\% \quad (19)$$

Segundo Magalhães (2017), a audibilidade é definida como um conceito fisiológico que descreve a intensidade da sensação auditiva, sendo suas comparações feitas em relação a uma frequência de 1000 Hz, considerada frequência de referência (nível de intensidade de 0 dB). Essa escolha é justificada por dois principais fatores: primeiro, a frequência de 1000 Hz encontra-se na região central do espectro auditivo humano; segundo, essa frequência é frequentemente usada para distinguir entre sons graves e agudos.

Stolfi, 2016 em seu trabalho intitulado “Percepção auditiva e compressão de áudio”, aborda que o ouvido normal é capaz de distinguir sons com frequências entre 20 Hz e 20 kHz, embora a resposta para altas frequências diminua acentuadamente com a idade. Com isso, dados mostram que cerca de 50% das pessoas não ouvem acima de 15 kHz.

As frequências médias e agudas, as quais estão entre 800 Hz e 6000 Hz, são mais facilmente percebidas pelos seres humanos quando comparado as frequências graves e muito agudas. A dificuldade em perceber sons graves e sons acima de 6000 Hz está relacionada à estrutura do canal auditivo humano, o que favorece a percepção das frequências entre a faixa de 3000 Hz à 4000 Hz (Magalhães, 2017).

Para o estudo deste trabalho, além da distorção harmônica, os ajustes graves e agudos tem-se o parâmetro ganho de corrente que contribui na análise do sinal amplificado. O conceito de ganho de corrente é essencial na eletrônica, particularmente em amplificadores de áudio e circuitos que utilizam transistores. Trata-se da capacidade de um dispositivo eletrônico, como um transistor, de aumentar a corrente elétrica. Em termos básicos, representa a relação entre a corrente que sai e a que entra em um circuito.

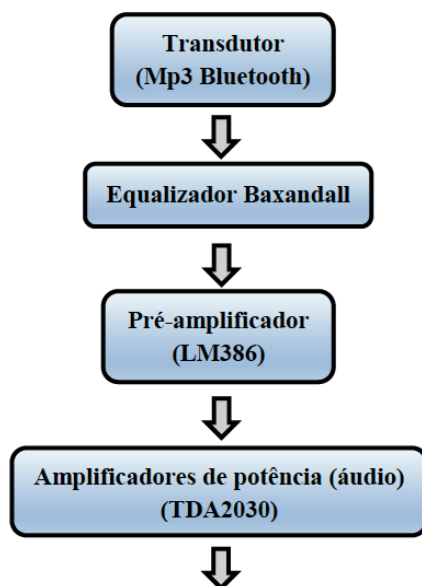
Segundo Sedra e Smith (2007), a equação (20) estabelece o ganho de corrente em um amplificador, sendo a corrente de saída do sistema e a corrente de entrada.

$$\text{Ganho de Corrente } A_p = \frac{i_o}{i_t} \quad (20)$$

O ganho da corrente é importante para obter circuitos eficientes, pois afeta a capacidade de amplificação do sinal. Por exemplo, nos amplificadores de áudio, um ganho de corrente alto permite a amplificação de sinais fracos, como os de um microfone, a níveis que podem ser claramente percebidos pelos alto-falantes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Eletrônica Digital do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS) - Campus Lagarto. A Figura 7 demonstra o fluxograma do caminho percorrido para o desenvolvimento desse estudo.



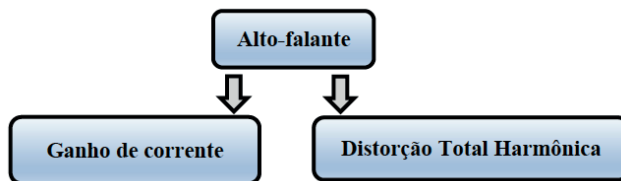


Figura 7 – Fluxograma com as etapas de áudio.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Inicialmente, foi realizada a análise teórica do amplificador de potência classe AB. Em seguida, foi realizada a simulação com o uso do *software Proteus Design Suite* versão 8.11 para análise comportamental das etapas de áudio sem e com a etapa de equalização, de forma a observar as características de ganho de corrente e distorção harmônica total.

Após a análise teórica, simulacional e de posse dos dados coletados, foi realizada a etapa laboratorial. Para efeitos de montagem e teste do circuito, utilizou-se inicialmente a *proto-board*. Na etapa inicial, utilizou-se um *Mp3 Bluetooth*, que é um dispositivo de baixo consumo de energia e fácil conexão com as demais etapas do projeto, além de proporcionar uma solução prática para sistemas de áudio sem fio.

Em seguida, na etapa de equalização optou-se pelo equalizador tipo Baxandall com a configuração de dois controles de ajustes manuais com uso de potenciômetros (graves e agudos) e de amplificador operacional LT1022, o qual apresenta características de ajuste preciso, preservando a qualidade do áudio. Para o ajuste do potenciômetro no grave, foi selecionada a frequência de 200 Hz no gerador de função, cujo range está compreendido de 60 à 250 Hz. A frequência de 10 KHz foi selecionada para o ajuste do potenciômetro no agudo que está de 5 KHz à 20 KHz, para fins de teste laboratorial.

Já na etapa de pré-amplificação, foi utilizado o LM386, devido à sua capacidade de amplificar sinais de áudio com eficácia, sendo que possui baixa potência (0,1 a 1 W), além de ser considerado um circuito integrado de baixo custo, ou seja, é um componente barato e de fácil acesso, que facilita o seu uso em aplicações eletrônicas.

E por fim, na etapa de amplificação de potência foi utilizado o TDA 2030, devido a sua baixa distorção harmônica que pode variar do valor típico de 0,1% ao valor máximo de 0,5% para características elétricas específicas, tais como potência de saída de 0,1 à 8 W à 14V/8Ω, assim como uma distorção harmônica de 0,2% à 0,5% para potência de saída de 0,1 W à 12 W à 14/4Ω. Ambas situações com range de frequência de 40 à 15 KHz, temperatura ambiente de 25°C, dados esses especificados no *Datasheet* da *THOMSON Microelectronics*, associado as características de boa qualidade de áudio, facilidade de implementação no projeto e baixo custo.

A medida de distorção harmônica total do inglês *Total Harmonic Distortion (THD)* foi realizada com o auxílio do osciloscópio através da Função Transformada rápida de Fourier do inglês *Fast Fourier Transform (FFT)*, a qual pode ser calculada pela Equação 22 originada da Equação 21:

$$THD = \frac{\text{Tensão RMS dos harmônicos}}{\text{Tensão RMS da fundamental}} = \sqrt{\frac{V_2^2}{V_1^2} + \frac{V_3^2}{V_1^2} + \frac{V_4^2}{V_1^2}} \quad (21)$$

Onde $V_2(A)$, $V_3(B)$ e $V_4(C)$ são ditas como sendo as tensões eficazes (RMS) do segundo, terceiro e quarto harmônicos, os quais são responsáveis pela maior parte da distorção harmônica total. Sendo assim, pode-se utilizar a relação logarítmica das tensões medidas e através da diferença das intensidades dos harmônicos tendo como referência à fundamental expressas em dB é possível calcular por meio da Equação 22 (Shea, 1966):

$$THD = \sqrt{10^{\left(\frac{A}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{B}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{C}{10}\right)}} \quad (22)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção foi abordado os resultados obtidos com a finalização deste trabalho. Na Figura 8, é possível visualizar o circuito esquemático da etapa de equalização com os ajustes dos graves e dos agudos através do uso de potenciômetros, configuração baseada no tipo de equalizador de modelo *Baxandall*. Na entrada dessa etapa inicial é conectado o dispositivo *Mp3 Bluetooth*, logo a saída dessa etapa foi conectada na entrada da etapa de pré-amplificação.

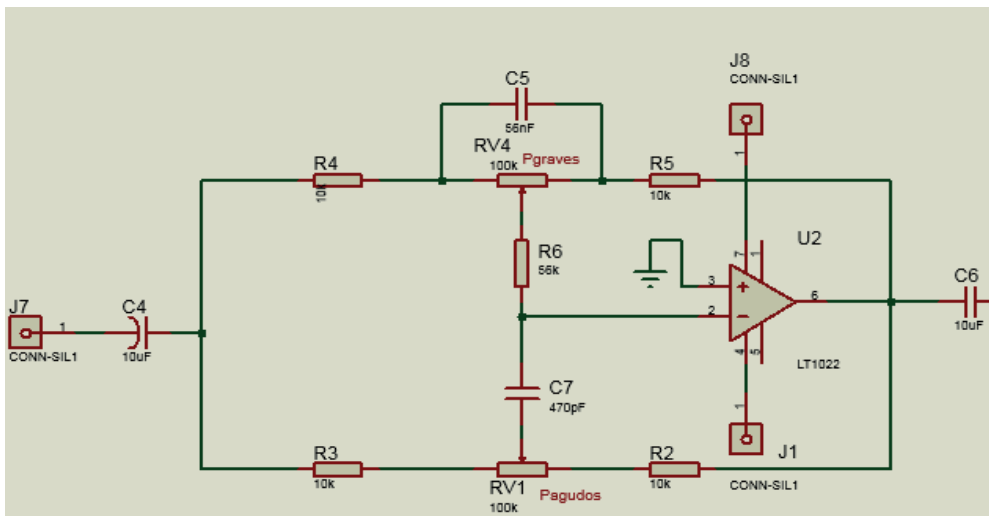


Figura 8 – Etapa de equalização de áudio.

Fonte: Autoria própria, 2024.

A Figura 9 apresenta o circuito esquemático da etapa de pré-amplificação com o uso do LM386, o qual foi conectado à saída da etapa de equalização e a saída do LM386 por sua vez ficou conectada à entrada da etapa de amplificação de potência com o uso

do TDA2030. O amplificador LM386 é considerado de baixa potência de saída (500 mW), bem compacto, projetado para uso em aplicações de baixa voltagem, não necessita de dissipadores de calor e o mesmo fornece excelente qualidade de áudio e amplificação.

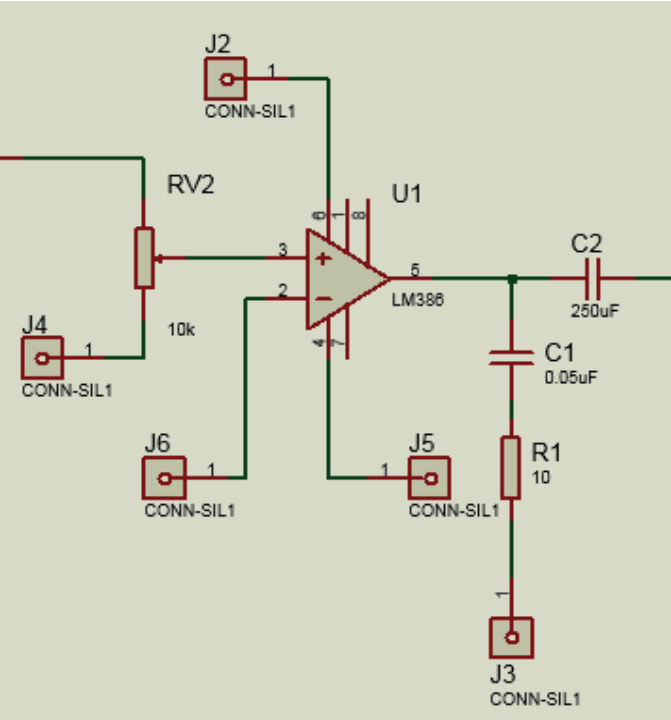


Figura 9 – Etapa de pré-amplificação de áudio.

Fonte: Autoria própria, 2024.

A Figura 10 apresenta o circuito esquemático da etapa de amplificação de potência com o uso do amplificador TDA2030. A entrada de áudio então passa pelo capacitor C_3 de acoplamento de 1uF permitindo apenas a passagem da corrente alternada. A malha de realimentação está conectada entre o pino 4 de saída e o pino 2 que se refere a entrada inversora, no intuito de obter estabilidade e realizar o controle do ganho. Os diodos atuam como proteção de saída. No TDA2030 foi inserido um dissipador de calor levando em consideração as características térmicas do componente eletrônico, uma vez que os semicondutores são sensíveis às altas temperaturas. A saída do amplificador está conectada ao pino 4 onde é alimentado um alto-falante.

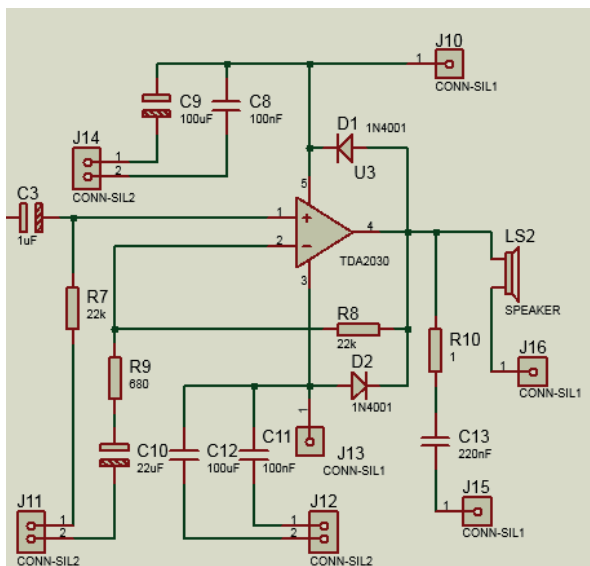


Figura 10 – Etapa de amplificação de potência de áudio com TDA2030.

Fonte: Autoria própria, 2024.

A Figura 11 apresenta o formato da placa de circuito impresso em 3D elaborada no *software Proteus*, onde é possível ter uma visão mais realística dos componentes eletrônicos com relação à prática laboratorial de todas as etapas de áudio, equalização, pré-amplificação e amplificação de potência com o uso do TDA2030.

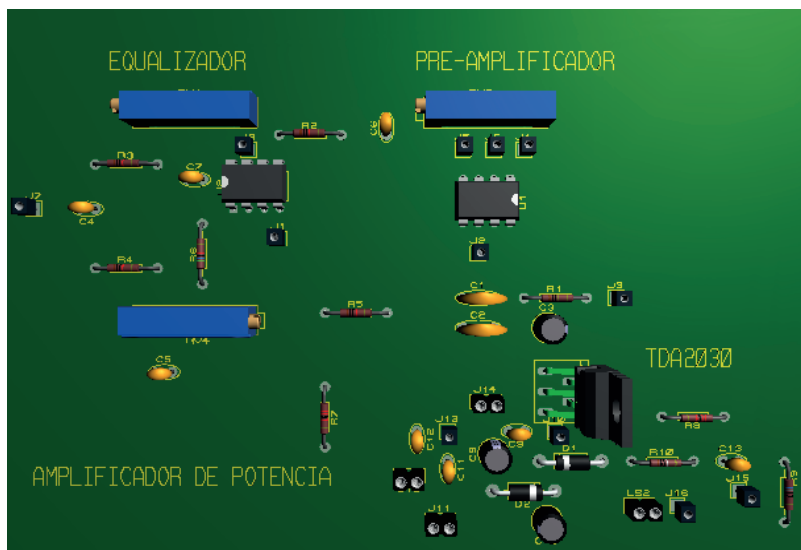


Figura 11 – Placa de circuito impresso em 3D das etapas de áudio.

Fonte: Autoria própria, 2024.

COMPARAÇÃO

Para fins de comparação, nesse tópico foi abordado os resultados obtidos de distorção harmônica total (THD) sem a etapa de equalização e com a etapa de equalização respectivamente, com o uso do amplificador de potência TDA2030. Além disso, foi analisado o ganho de corrente que relaciona a corrente de saída e corrente de entrada do circuito em questão.

Etapa de pré-amplificação (LM386) e amplificação de potência (TDA2030)

A Figura 11 apresenta os resultados do comportamento senoidal de entrada e saída referente ao circuito contendo as duas etapas, que são a de pré-amplificação conjuntamente com a etapa de amplificação de potência com o uso do amplificador de áudio TDA2030, sem a etapa de equalização. Observa-se que o canal 1 (CH1) da tela do osciloscópio representa a entrada do circuito, assim como o canal 2 (CH2) representa a saída do circuito de forma amplificada para fins de visualização do formato da onda senoidal.



Figura 11 – Senoide TDA2030

Fonte: Autoria própria, 2024

A Figura 12 apresenta os resultados de THD desse mesmo circuito nas condições especificadas no gerador de função para o sinal de entrada, 1Vpp e frequência de 1 KHz. Dessa forma, observou-se que o valor da THD foi de 0,252765 %, analisado através da função FFT do osciloscópio. Em contrapartida, de acordo com as características elétricas do amplificador de potência TDA2030 do *Datasheet* da *SGS-THOMSON Microelectronics*, o mesmo possui uma baixa distorção harmônica que pode variar tendo como referência o valor típico de 0,1 % e o valor máximo de 0,5 % cuja potência de saída varia de 0,1 W à 8 W à 14V/8Ω, range de frequência de 40 à 15 KHz e temperatura ambiente de 25° C. De acordo com a equação 22 foi possível encontrar a THD, conforme apresentado a seguir.

A medida de distorção harmônica total foi realizada com o auxílio do osciloscópio através da função Transformada rápida de Fourier, a qual foi calculada pela Equação 22, considerando

$$V_2 = -55,2 \text{ dB} ; V_3 = -56 \text{ dB} ; \\ V_4 = -62,4 \text{ dB} ; V_5 = -67,2 \text{ dB} ; V_6 = -70,4 \text{ dB}$$

$$THD = \left(\sqrt{10^{\frac{-55,2}{10}} + 10^{\frac{-56}{10}} + 10^{\frac{-62,4}{10}} + 10^{\frac{-67,2}{10}} + 10^{\frac{-70,4}{10}}} \right) * 100\% \Rightarrow \\ THD = 0,252765\%$$



Figura 12 – Distorção harmônica total (THD) do TDA2030

Fonte: Autoria própria, 2024

Etapa de equalização, pré-amplificação (LM386) e amplificação de potência (TDA2030)

De acordo com a Tabela 1, a qual apresenta o espectro de frequência, a faixa de frequência do grave está compreendida de 60 à 250 Hz. Dessa forma optou-se por selecionar a frequência de 200 Hz no gerador de função, 1Vpp, onda senoidal. Logo, o range de frequência do agudo está compreendido de 5 KHz à 20 KHz. Para fins de teste laboratorial, foi selecionada a frequência de 10 KHz no gerador de função, 1Vpp, onda senoidal.

A Figura 13 apresenta o resultado da forma de onda senoidal com uma frequência específica de 200 Hz nas condições em que o ajuste do potenciômetro do grave está em 100%.

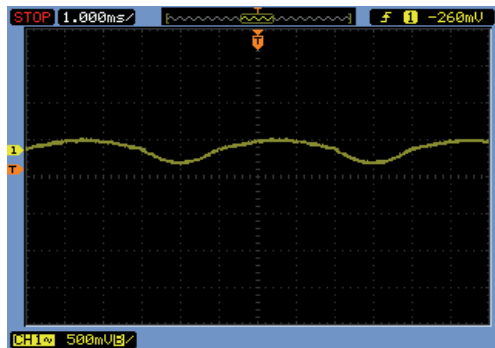


Figura 13 – Senoide em f: 200 Hz
(ajuste grave)

Fonte: Autoria própria, 2024.

A Figura 14 apresenta o resultado da forma de onda senoidal com uma frequência específica de 10 KHz nas condições em que o ajuste do potenciômetro do agudo está em 100%. Sendo assim, observou-se um efeito maior de oscilação da forma de onda senoidal nessas condições comparado ao ajuste do potenciômetro no grave quando estava em 100% na frequência selecionada de 200 Hz.

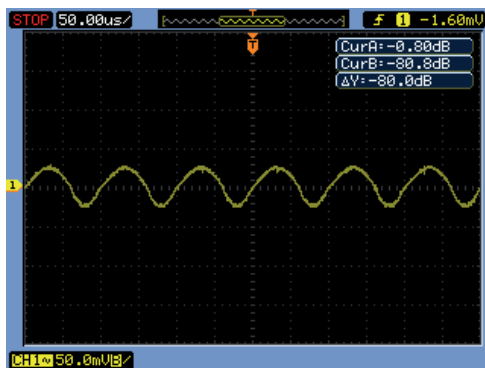


Figura 14 – Senoide em f: 10 KHz
(ajuste agudo)

Fonte: Autoria própria, 2024.

Esse comportamento pode ser explicado devido às ondas de frequência alta (agudas) têm mais oscilações em um período menor comparado as ondas de frequência baixa (graves), as quais possuem um período maior e menos ciclos por segundo. Isso se deve ao fato de que as frequências agudas e graves são definidas como ondas, possuem períodos inversamente proporcionais e características fundamentais das ondas (Magalhães e Filho, 2017 *apud* Doria; Marinho, 2006).

Na Figura 15 mostra o comportamento para o caso ajuste grave e agudo em FLAT (0 dB), em que a forma da onda de saída do sistema de áudio é aproximadamente idêntica à forma da onda de entrada. Deste modo, mesmo variando a frequência, observou-se que o comportamento das formas de onda de entrada e saída apresentam o mesmo formato senoidal, comprovando assim que não existe influência da atuação dos ajustes grave e agudo em 0 dB.

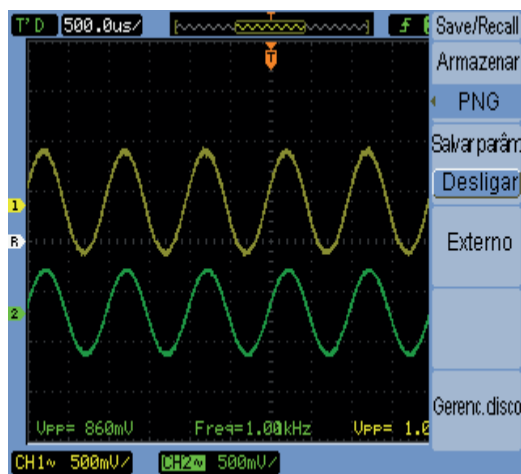


Figura 15 – Senoide em f: 1 KHz
(Agudo e Grave no FLAT)

Fonte: Autoria própria, 2025.

Distorção harmônica total

A Figura 16 apresenta a distorção harmônica total nas condições em que a frequência é de 1 KHz (ajuste do potenciômetro do agudo e do grave em 0 decibel). Observou-se que a THD encontrada foi de aproximadamente 0,261135 %. Para a distorção harmônica total sem a etapa de equalização nas condições especificadas no gerador de função para o sinal de entrada, 1Vpp, frequência de 1 KHz, notou-se que o valor da THD foi de 0,252765%. Dado o exposto, percebeu-se que houve uma aproximação significativa do valor da THD com a inserção da etapa de equalização nas condições citadas, atenuando assim as frequências que contribui para a distorção harmônica total, garantindo, assim, uma reprodução sonora mais limpa e agradável.



Figura 16 – Distorção harmônica total em FLAT f: 1 KHz

Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 17, foi feito o cálculo da distorção harmônica total nas seguintes condições: a frequência selecionada foi de 200 Hz (A), ajuste do potenciômetro do grave em 0%; (B) ajuste do potenciômetro do grave em 100%, ajuste AGUDO em FLAT e frequência de 10 KHz (C), ajuste do potenciômetro do agudo em 0%; (D) ajuste do potenciômetro do agudo em 100%, ajuste do GRAVE em FLAT. Nesse caso, observou-se que o valor da THD encontrada foi de aproximadamente (A) 0,0535094%; (B) 0,054674%; (C) 0,0533108%; (D) 0,0415083%. Estes valores foram menores comparado ao valor da THD sem a etapa de equalização (0,252765%).

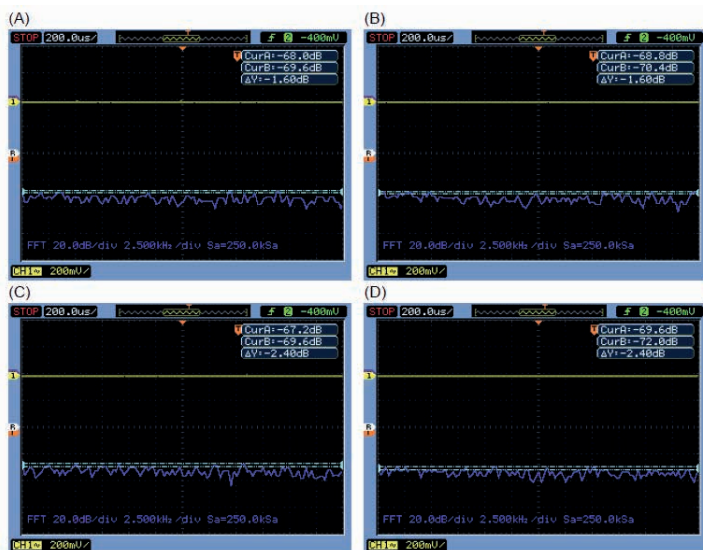


Figura 17 – Distorção harmônica total: f: 200 Hz – AGUDO em FLAT

(A) ajuste grave PG =0%. (B) ajuste grave PG =100%.

f: 10k Hz – GRAVE em FLAT (C) ajuste agudo PA =0%. (D) ajuste grave PA =100%.

Fonte: Autoria própria, 2025.

Entretanto, na comparação com relação a distorção harmônica total nas condições em que o ajuste do potenciômetro do agudo está em 0% e em 100% com o ajuste do potenciômetro do grave em 0% e 100%, observou-se que houve uma redução do valor da THD, principalmente quando comparado com a etapa sem equalização. Fato que pode estar relacionado à frequência selecionada do agudo para testes que foi de 10 KHz, pelo motivo de estar próximo ao limite do espectro de frequência audível que é de 20 KHz, ocasionando assim uma maior oscilação no formato da onda senoidal conforme pode ser visualizado na Figura 14.

Ganho de corrente – Etapa sem equalização - TDA2030.

As análises para obter o ganho de corrente na etapa sem equalização foram feitas utilizando o amplificador TDA2030, um multímetro e uma frequência em 1 KHz no gerador de função, como referência por ser uma frequência central onde é mais perceptível para o ouvido humano. No caso do TDA2030, o ganho de corrente foi determinado considerando a corrente de entrada e a amplificação oferecida pela potência de saída em relação à carga ligada. O valor do ganho de corrente para esta configuração foi de aproximadamente 24,5. É importante ressaltar que esse cálculo foi feito por meio da Equação 20.

Ganho de corrente - Etapa com equalização.

Com base no valor da corrente coletada no sistema de **áudio** com o acoplamento do equalizador, foi possível verificar que a amplificação do sinal ocorreu gerando um ganho de corrente 21,1. A frequência utilizada foi de 1kHz (referência de 0 dB) para o caso do FLAT, ou seja, os potenciômetros dos ajustes graves e agudos foram posicionados no 0 decibel.

Contudo, para o caso da frequência de 200 Hz com o controle dos graves no potenciômetro (PG1 = 0% e PG2 = 100%), os valores obtidos dos ganhos foram de aproximadamente 17,53 no ajuste grave 0% e 29,84 no de 100%. Entretanto, já para a frequência de 10 kHz foi utilizado o controle dos agudos no potenciômetro (PA1 = 0% e PA2 = 100%), sendo os dados dos ganhos encontrados de 19,48 no 0% e 27,57 no de 100% do ajuste agudo.

Assim, a análise do ganho de corrente feita mostra que com o controle do ganho de corrente e a escolha adequada dos componentes utilizados no circuito, é possível obter um bom desempenho em sistemas de amplificação de áudio. A Tabela 2 apresenta uma síntese dos valores dos parâmetros nesse estudo.

Desse modo, na etapa sem acoplamento do equalizador, a distorção foi de 0,252765%, resultando em um ganho de corrente de 24,5.

Etapas	Distorção – THD (%)	Porcentagem de Redução da THD (%)	Ganho de I ~
Sem equalizador	0,252765	-	24,5
Com equalizador: Ajustes do GRAVE e AGUDO em FLAT (0 dB)	0,261135	-	21,1
Com equalizador: Agudo 10 K Hz PA1: 0% Ajuste GRAVE em FLAT	0,0533108	78,9	19,48
Com equalizador: Agudo 10 K Hz PA2: 100% Ajuste GRAVE em FLAT	0,0415083	83,57	27,57
Com equalizador: Grave 200 Hz PG1: 0% Ajuste AGUDO em FLAT	0,0535094	78,83	17,53
Com equalizador: Grave 200 Hz PG2: 100 % Ajuste AGUDO em FLAT	0,054674	78,21	29,84

Tabela 2 – Comparação das etapas com equalizador e sem equalizador.

Fonte: Autoria própria, 2025.

Desse modo, na etapa sem acoplamento do equalizador, a distorção foi de 0,252765%, resultando em um ganho de corrente de 24,5. Com a inclusão do equalizador no sistema de áudio configurado em FLAT, o valor da distorção foi próximo ao valor da THD em comparação a etapa sem a utilização do equalizador, porém houve uma redução no ganho de 3,4.

Na etapa com equalizador, com ajuste do equalizador (frequência de 10 kHz e o valor PA1 em 0% no potenciômetro), a distorção diminuiu o equivalente a 78,9% em comparação a etapa sem equalização, além de ter ocorrido uma redução do ganho de corrente.

Já para o caso da frequência de 10 KHz e valor de PA2 = 100%, a distorção diminuiu ainda mais, o equivalente a 83,57%. Nesta situação, houve um aumento do ganho de corrente em relação a etapa sem equalizador.

Os dados da frequência de 200 Hz (ajuste grave e PG = 0%) da distorção resultou em uma diminuição de 78,83% comparando com a etapa sem equalização. Por fim, para o ajuste grave com PG = 100% o valor da distorção resultou em um aumento de 78,21% em comparação com a ausência de equalizador. Esta configuração apresenta um valor de ganho de corrente maior dentre os ajustes de grave.

Em relação as análises do som por meio da percepção auditiva, constatou-se que houve uma melhoria na qualidade do som quando foi utilizado o ajuste agudo em PA2 = 100%.

para as duas etapas, sem e com a adição de equalizador no sistema de áudio. Observou-se que utilizando o ajuste agudo em $PA2 = 100\%$ resultou em uma melhoria na qualidade musical.

Portanto, os dados indicam que ao acoplar o equalizador no sistema de áudio, particularmente com ajustes nos agudos e graves, ocorre em uma diminuição do valor da distorção harmônica e um aumento no ganho de corrente para a etapa do ajuste grave e agudo em 100%. Assim, resulta em um controle eficiente do sinal de áudio, permitindo um sinal amplificado com redução na THD. Desse modo, com os valores dos ganhos foi mostrado que conforme a frequência aumenta e exige maior potência para o caso dos ajustes graves, o ganho de corrente também se eleva, resultando em uma amplificação do sinal.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos experimentalmente apresentaram valores satisfatórios quando comparados com alguns valores teóricos tendo como referência principalmente *datasheets* de componentes eletrônicos para averiguação das características elétricas citadas nesse trabalho, pois percebeu-se uma certa escassez de material nessa área.

Experimentalmente foi observado que a inserção da etapa de equalização proporcionou melhorias no circuito eletrônico com o uso do amplificador de áudio TDA2030, quando comparado sem a etapa de equalização, em termos de resultado de distorção harmônica total (THD). Assim, houve uma melhoria na qualidade musical enfatizando de forma mais acentuada quando o ajuste do agudo estava no máximo, com uma frequência de 10 kHz, e a percepção auditiva.

Nesse sentido, com uma frequência de 1 kHz, os resultados da THD sem a etapa de equalização foram de 0,252765 %, confirmando que esses valores estão dentro da faixa de distorção especificada pelo fabricante de 0,1% à 0,5%. Como resultado, o amplificador mostra uma baixa distorção harmônica em condições operacionais específicas (Classe AB).

Desse modo, com foco na análise da faixa de frequências graves e agudas, com a inclusão da etapa de equalização no circuito. Assim, os valores de THD obtidos tiveram uma diminuição de 0,054674% em 200 Hz (grave 100%) e 0,0415083 em 10 kHz (agudo 100%). Portanto, com a etapa de equalização no circuito foi possível observar uma melhoria na qualidade do áudio e redução do valor da THD. Além disso, permitiu que o amplificador de áudio TDA2030 se adaptasse melhor às diferentes faixas de frequência, o que resultou em um som mais limpo e menos distorcido.

O controle do ganho de corrente nos amplificadores de áudio, como o TDA2030, é fundamental para análise da amplificação do sinal sem provocar um aumento nas distorções. Os valores obtidos do ganho de corrente para etapa sem equalização foram de 24,5 e para a etapa de equalização foram de aproximadamente 21,1 (ajuste grave e agudo em FLAT); 17,53 (GRAVE 0%, ajuste agudo em FLAT); 29,84 (GRAVE 100%, ajuste agudo em FLAT); 19,48 (AGUDO 0%, ajuste grave em FLAT) e 27,57 (AGUDO 100%, ajuste grave em FLAT).

Contudo, o ganho de corrente aumenta conforme o controle do grave é ajustado, devido à necessidade de maior demanda de potência e corrente para frequências baixas (grave). Dessa forma, o amplificador deve fornecer uma corrente maior para garantir a fidelidade e qualidade sonora.

A análise dos dados obtidos experimentalmente do ganho de corrente e das THD demonstram que o ganho de corrente se altera de acordo com os ajustes nos níveis de grave e agudo para etapa com equalizador no sistema de áudio.

Já para o ajuste do agudo não causa um aumento excessivo no valor do ganho de corrente, pois as frequências altas necessitam de menos potência, menos energia gasto comparado com as frequências do grave.

Portanto, de acordo com os resultados obtidos, como proposta para os próximos trabalhos, além da confecção das placas PCB poderá ser realizado o teste do efeito da redução da THD e observar o comportamento do ganho de corrente com os amplificadores de áudio TDA7297 com e sem a etapa de equalização para efeitos comparativos, características essas que influenciam na qualidade do áudio.

REFERÊNCIAS

ANJOS, Tainá Moraes dos. Projeto e análise de um equalizador gráfico de três bandas. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

BEBER, Diogo Ezequiel. Projeto e implementação de um canal de um mixer analógico. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

BORTONI, Rosalfonso. Amplificadores de áudio. 1º Edição. Rio de Janeiro: H. SHELDON SERVIÇOS DE MARKETING, 2002.

BOYLESTAD, R.; NASHIELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11ª edição. ISBN 978-85-64574-21-2. Pearson. São Paulo, 2013.

BRAGA, N.C. **Curso de Eletrônica – Eletrônica Analógica**. Instituto Newton C. Braga. São Paulo, 2012.

CHOUERI, S.; CRUZ, E. C. A. **Eletrônica Aplicada**. 2ª edição. Editora Érica. 2018.

DORIA, M. M.; MARINHO, F. C. **Ondas e Bits**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

HLAING, Khin Yu Yu. **Design de equalizador de áudio usando filtro Sallen Key**. Revista Internacional de Pesquisa Avançada em Engenharia e Tecnologia da Computação (IJARCET), v. 7, 2019.

DE MAGALHÃES, Diogo Amaral; DE PINHO ALVES FILHO, Jose. Por que é mais difícil escutar os sons graves do que os sons médios e agudos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, p. 331-338, 2017.

MALVINO, A.; BATES, D. **Eletrônica**. Volume I. 8ª edição. ISBN 978-85-8055-577-6. Mc Graw Hill Education. Porto Alegre, 2016.

MARTINS, F.C.V. **FlawQ: Plugin de Equalização Gráfica de Áudio**. Rio de Janeiro, v. 1, n. 15, p. 1-72, março. 2010.

MENEZES, T. Tudo sobre equalização #1 – Tipos e Filtros - Áudio Repórter. Disponível em: <<https://www.audioreporter.com.br/dicas/tudo-sobre-equalizacao-1-tipos-e-filtros/>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

SELF, D. **Audio Power Amplifier Design Handbook. Fifth edition**. ISBN: 978-0-240-52162-6. Focal Press. 2009.

SHEA, R. F. Ed., **Amplifier Handbook**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.

SOLSONA, A.B., MOYA, F.H. Diseño y construcción de un amplificador didáctico de potência para áudio. Manual formativo de ACTA, ISSN 1888-6051, N°. 38, págs. 101-119, 2005.

STOLFI, G. Percepção auditiva e Compressão de áudio. 2016.

<https://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXrxxvs.pdf>. Acesso em 14 de março de 2024.

SEL318-Laboratório de Circuitos Eletrônicos III Laboratório 1-Equalizador Baxandall Implementação em Protoboard Geradores Senoidais. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7959400/mod_resource/content/13/Roteiro%20Experimental%20-%20Equalizador%20Baxandall.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. Microeletrônica. 5. ed. São Paulo: Pearson Brasil, 2007. p. 11.