

DESENVOLVIMENTO DE UM AMPLIFICADOR DE ÁUDIO DE ALTO DESEMPENHO UTILIZANDO REALIMENTAÇÃO NEGATIVA GLOBAL

Roni Henrique Cardoso Ferreira¹, Carlos Alberto De Francisco²

¹Discente do Curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de São Carlos

²Docente do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de São Carlos

Este artigo propõe o desenvolvimento de um amplificador de áudio de alto desempenho com realimentação global. A topologia proposta é baseado em “A design methodology for audio amplifiers with no global negative feedback: proposal and validation” Visintin et al. (2022) com objetivo de realizar uma comparação entre as abordagens de amplificadores com e sem realimentação negativa global. Um amplificador de potência de 50W é projetado e construído. Nesse exemplo de projeto, são utilizados três estágios com transistores de efeito de campo operando com tensão simétrica de $\pm 55V$. Os resultados práticos obtidos satisfizeram os requisitos de projeto, como, por exemplo: Slew Rate acima de 1,13V/us (4,2V/us), frequência de corte superior acima de 40kHz (250kHz), THD+N abaixo de 0,5% (0,0296%). Desta forma, foi possível desenvolver um amplificador com realimentação global negativa e o objetivo deste trabalho foi alcançado.

Index Terms—Amplificador classe AB, Distorção harmônica, LTspice, MOSFET.

I. INTRODUÇÃO

NO mundo atual existem muitas pessoas que são amantes do som e procuram uma qualidade sonora cada vez melhor para curtir seus momentos e desfrutar da tranquilidade em apreciar cada nota sonora de uma música, estas pessoas são denominadas de audiófilos.

Com isso a tecnologia vive em constante evolução, utilizando diferentes metodologias para alcançarem melhores resultados, seja melhorando tecnologias conhecidas ou produzindo novas tecnologias.

Segundo Self (2009), observando o histórico dos amplificadores de áudio desenvolvidos, o Global Negative Feedback (G-NFB), sempre foi implementado com o propósito de aproveitar seus benefícios, sendo eles uma melhor estabilidade do ganho de tensão, diminuir a impedância de saída, aumentar a resposta de frequência e diminuir a distorção harmônica.

A motivação deste trabalho é desenvolver um amplificador de áudio de alto desempenho com realimentação global negativa baseado na topologia apresentada no artigo “A design methodology for audio amplifiers with no global negative feedback: proposal and validation” Visintin et al. (2022), de modo que, no futuro, seja possível realizar uma comparação da qualidade sonora com e sem realimentação negativa global e, com isso, contribuir para a resolução de uma das inquietações dos audiófilos em relação ao uso de G-NFB.

II. METODOLOGIA DE PROJETO

A metodologia utilizada no artigo de Visintin et al. (2022), consiste em realizar simulações variando o ganho e corrente de cada estágio. Com isso obtém-se as curvas da distorção harmônica total, slew rate e frequência de corte para analisar o comportamento do circuito e definir a configuração com maior desempenho. As simulações foram realizadas no software

LTspice com auxílio do Python para automatizar o processo de variação de parâmetros e coleta de dados.

O procedimento de projeto proposto consiste nas etapas descritas abaixo:

1) Número mínimo de estágios

Ao seguir esse critério, é possível obter um circuito mais simples e reduzir significativamente a distorção total imposta ao sinal de áudio.

2) Escolha de transistores comerciais com especificações de alta tensão de trabalho

Ao operar com altas tensões de trabalho, o sinal de áudio tem uma excursão reduzida no ponto de polarização, permitindo que o transistor opere na aproximação de pequenos sinais e mantendo a distorção em níveis baixos.

3) Otimização do estágio

Realizando uma variação dos parâmetros de corrente e ganho (A_v) para cada estágio, gerou-se gráficos apresentando como a Distorção Harmônica Total (DHT), Slew Rate e Frequência de Corte Inferior e Superior de modo a encontrar qual configuração apresenta melhor desempenho.

III. ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

Como em Visintin et al. (2022), os critérios de desempenho utilizados para o projeto atual são apresentados na tabela I. A justificativa para a escolha de cada requisito de projeto é apresentado a seguir.

Segundo Pires (2010), existe uma relação interessante entre o rendimento do amplificador e qualidade do som amplificado tal que sistemas com alto rendimento tendem apresentar maiores distorções e sistemas que possuem menores distorções possuem um menor valor de rendimento.

Segundo IEC-60268-3 (2000), existem outros parâmetros a serem levados em consideração além da distorção no momento

Tabela I
PARÂMETROS DE PROJETO

Requisito	Valor
Potência máxima necessária com carga de 8Ω	50Wrms
Frequência de corte superior	>40kHz
Frequência de corte inferior	<20Hz
Slew Rate mínimo	1.2V/ μ s
Distorção Harmônica Total	<0.5%
Sensibilidade de entrada	1V

de avaliar um amplificador de áudio. Alguns dos parâmetros técnicos relevantes são slew rate, resposta em frequência, dentre outros, que serão tratados a seguir.

A DHT é caracterizada pelo valor eficaz dos componentes harmônicos do sinal de saída, excluindo o fundamental, expresso com um percentual eficaz do fundamental. Um amplificador de potência de alta fidelidade deve apresentar um DHT da ordem de uma fração de 1% segundo Sedra e Smith (2007).

Segundo Self (2006), o slew rate é a unidade que define a velocidade de resposta do sistema quando um sinal é aplicado em sua entrada. Devido a faixa audível ser de 20 a 20 kHz quando se trata de amplificadores, normalmente é utilizado a frequência de 20 kHz, com isso quando realizar os cálculos irá obter o valor mínimo possível para que o circuito responda dentro do esperado. Este valor pode ser obtido realizando os cálculos apresentados em (SELF et al., 2009)

$$SR = 2V_p f_{MAX} \left[\frac{V}{s} \right] \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{2 * P_O * R_L} \quad (2)$$

Onde:

- SR - Slew Rate
- f_{MAX} - Máxima frequência do sinal
- V_p - Tensão de pico de saída
- V_O - Tensão RMS de saída
- R_L - Carga
- P_O - Potência de saída

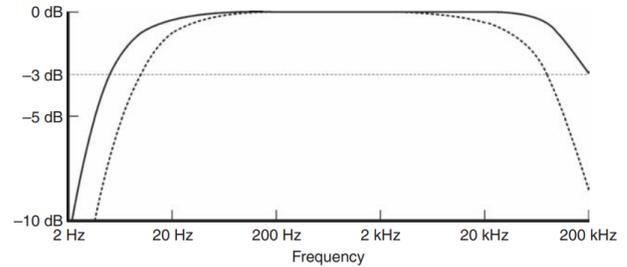
Dado as especificações do projeto com 50W de potência em 8Ω , utilizando a equação 2 obtém-se $V_p=28,28V$. Substituindo V_p e f_{MAX} na equação 1 resulta em $SR=1,13V/\mu s$.

De acordo com Cordell (2011), normalmente é atribuída uma tolerância ± 3 dB a resposta de frequência dos alto-falantes, já para os amplificadores de potência é de 0 a -3 dB. A figura 1 mostra a resposta em frequência de um amplificador.

IV. SIMULAÇÃO

Foram realizadas simulações no software LTspice com auxílio da linguagem de programação Python para variar os parâmetros, coletar os dados e gerar os gráficos.

Fig. 1. Resposta em frequência do amplificador.

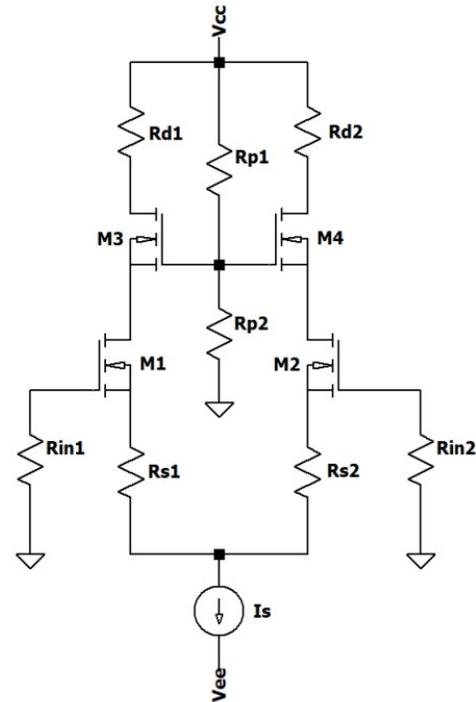


Fonte: (CORDELL, 2011)

1) 1º Estágio

Realizou-se simulações do 1º Estágio, com circuito apresentado na figura 2, com uma varredura nos parâmetros de corrente da fonte I_s e ganho de tensão A_v , de 0,25mA até 18mA e de 5 até 25 respectivamente. A partir das simulações

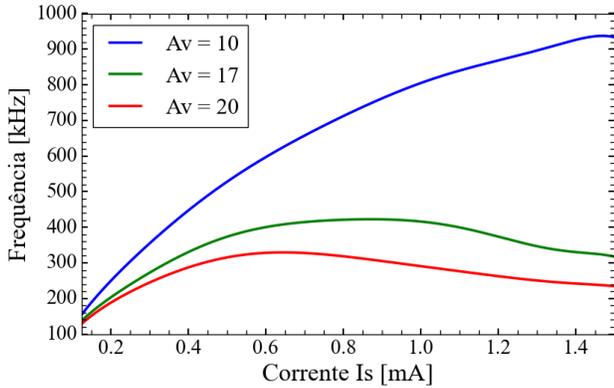
Fig. 2. Topologia 1º Estágio - Amplificador Cascode Diferencial



Fonte: Próprio autor.

foi possível observar que a frequência de corte inferior se manteve estável em 3,46 Hz e com o gráfico da figura 3, observa-se que a frequência de corte superior ultrapassa a 40 kHz em todos os casos, fazendo com que estes parâmetros não afetem o 1º estágio.

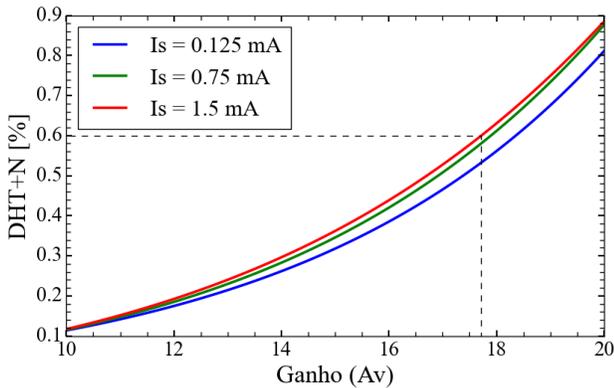
Fig. 3. Frequência de corte superior em função da corrente quiescente I_s para alguns valores de ganho de tensão A_v .



Fonte: Próprio autor.

Baseado no gráfico de Distorção Harmônica Total apresentado na figura 4, observa-se que para A_v inferiores a 17,7 e corrente inferior a 1,5mA, resultam em uma distorção abaixo de 0,6%, com isso para A_v superiores a 17,7 não obtém-se o resultado desejado.

Fig. 4. Distorção Harmônica Total mais Ruído (DHT+N) em função de A_v para alguns valores de I_s .

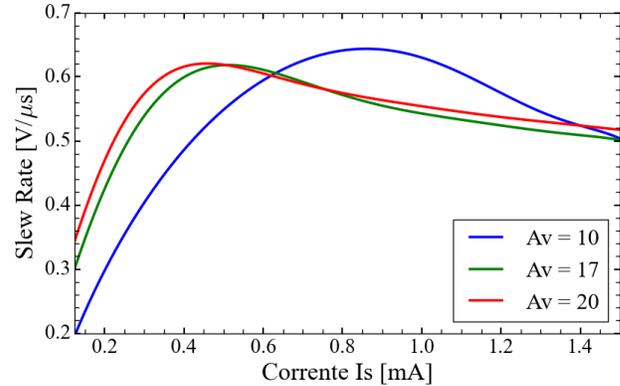


Fonte: Próprio autor.

Após realizado o estudo da frequência de corte inferior, superior e distorção harmônica total, observou-se o comportamento do Slew Rate. No gráfico apresentado na figura 5, apresenta as curvas de Slew Rate com um pico atingindo os valores máximos em 0,85mA e 0,5mA para os ganhos de 10 e 17 respectivamente.

Com os resultados obtidos nas simulações do 1º estágio, otimizou-se o primeiro estágio buscando obter o maior slew rate possível, dado que a DHT foi inferior a 0,6% para os pontos que a curva do slew rate apresentaram um pico, essas 2 melhores configurações do circuito são $A_v=10$, $I_s=0,85$ mA e $A_v=17$, $I_s=0,5$ mA. Com isso realizou-se alguns testes acoplando o segundo estágio para as 2 melhores configurações do circuito. Após os testes iniciais, foi possível observar que fixando o ganho total obtém-se melhores resultados, de Slew Rate e Distorção Harmônica Total, com ganhos maiores no 1º estágio. Dado isso definiu-se o 1º estágio com Corrente $I_s=0,5$ mA e $A_v=17$, devido conter um

Fig. 5. Slew Rate em função da corrente I_s para alguns valores de A_v .



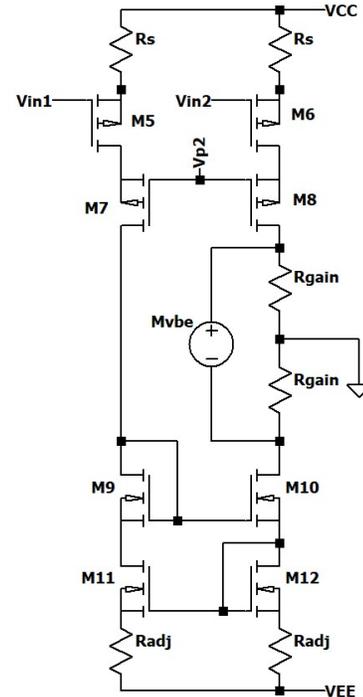
Fonte: Próprio autor.

maior ganho das configurações mencionadas.

2) 2º Estágio

Realizou-se o mesmo procedimento de otimização para o segundo estágio apresentado na figura 6 abaixo. Nessa topologia o resistor R_s define a corrente de dreno e o Resistor R_{gain} determina o ganho de tensão.

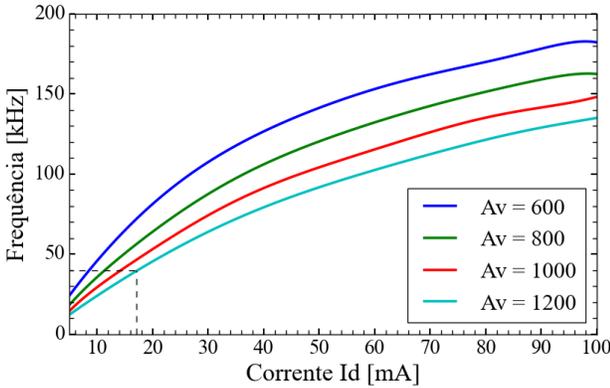
Fig. 6. Topologia 2º Estágio - Amplificador Cascode Duplo



Fonte: Próprio autor.

A partir das simulações com o segundo estágio acoplado, observou-se que a frequência de corte inferior diminuiu e permaneceu estável em 1,55 Hz. Com o gráfico da figura 7, nota-se que a frequência de corte superior possui uma relação inversamente proporcional ao ganho, com isso para o ganho de 1200 obtém-se uma frequência de corte superior acima de 40 kHz para correntes maiores de 17mA.

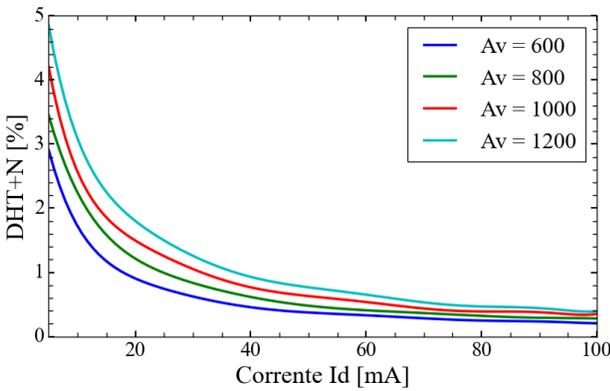
Fig. 7. Frequência de corte superior em função da corrente quiescente I_d para alguns valores de ganho de tensão A_v .



Fonte: Próprio autor.

Com os resultados obtidos nas simulações, gerou-se o gráfico de DHT para malha aberta, apresentado na figura 8.

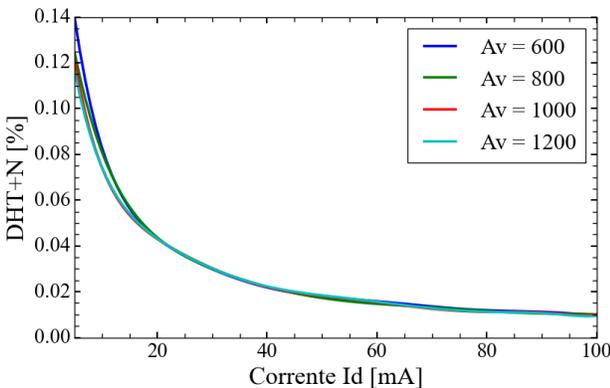
Fig. 8. Distorção Harmônica Total mais Ruído (DHT+N) em função de I_d para alguns valores de A_v .



Fonte: Próprio autor.

É possível estimar a DHT de malha fechada dividindo a DHT de malha aberta proporcionalmente a realimentação necessária para obter o $A_v=28,28$. Na figura 9 apresenta a DHT de malha fechada estimada.

Fig. 9. Distorção Harmônica Total mais Ruído (DHT+N) estimado em malha fechada em função de I_d para alguns valores de A_v .



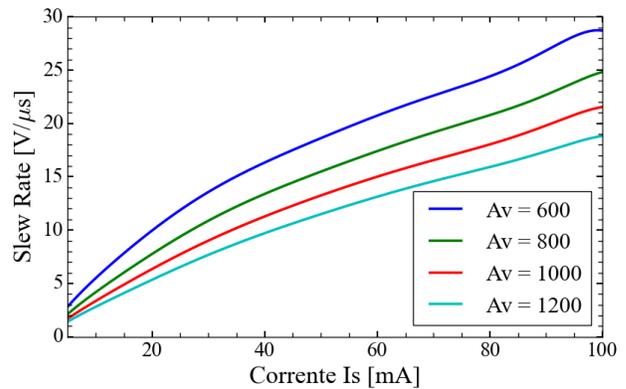
Fonte: Próprio autor.

Baseado no gráfico apresentado na figura 9, é visível que para correntes abaixo de 20mA a DHT aumenta rapidamente, com intuito de otimizar a DHT utilizou-se correntes superiores a 20mA.

Em Duncan (1996) recomenda-se a tolerância mínima de slew rate de $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$ por volt de pico de saída. Portanto para uma carga de 8Ω com 50W contém um $V_{op}=28,28\text{V}$, resultando em um slew rate mínimo de $14,14\text{V}/\mu\text{s}$.

A figura 10 apresenta o gráfico de slew rate em função da corrente de dreno I_d do segundo estágio para alguns valores de A_v . Analisando a figura 10 é visível que o slew rate possui uma relação inversamente proporcional a A_v , quanto maior A_v menor será o slew rate, e quanto maior a corrente de dreno I_d maior o slew rate do amplificador.

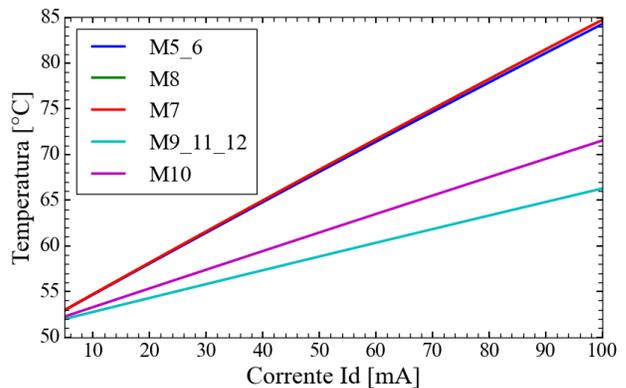
Fig. 10. Slew Rate em função da corrente I_d para alguns valores de A_v .



Fonte: Próprio autor.

Dado que quanto maior a corrente de dreno I_d maior o valor de slew rate, avaliou-se a temperatura dos transistores para cada valor de I_d , definindo a corrente máxima suportada que garante maior vida útil dos componentes, a figura 11 apresenta a temperatura de cada transistor. Nesses cálculos foi considerado o uso do dissipador HS6835 (DISSIPADORES, 2023).

Fig. 11. Temperatura estimada da junção do transistor em função de I_d do segundo estágio para os transistores M5 a M12.



Fonte: Próprio autor.

Baseado na figura 11, conclui-se que o transistor M7 possui a maior temperatura de junção e será o transistor que definirá

o maior valor de I_d no segundo estágio. Assumindo uma temperatura de junção segura de 80°C , observando a curva de temperatura para o transistor M7 na figura 11, podemos afirmar que para correntes inferiores a $I_d \leq 90\text{mA}$ o transistor irá trabalhar em uma temperatura segura, porém quanto menor I_d maior a vida útil dos componentes.

Com os resultados obtidos nas simulações do segundo estágio definiu-se 3 melhores combinações que são apresentados na tabela II, a partir destas combinações serão realizado algumas simulações acoplado o 3º estágio com intuito de definir qual terá maior desempenho.

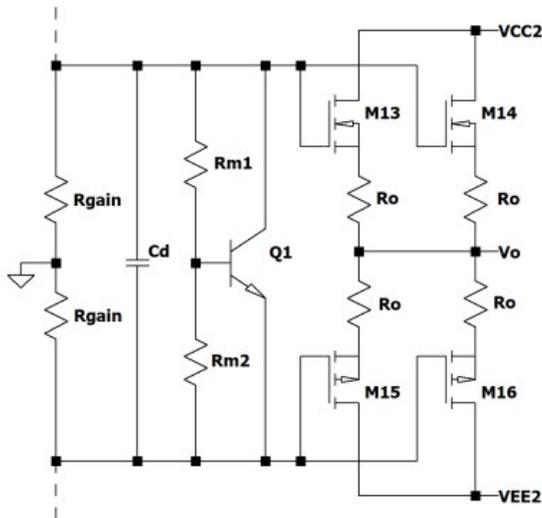
Tabela II
OPÇÕES 2º ESTÁGIO

A_v	I_d
600	35mA
800	45mA
1000	60mA

3) 3º Estágio

A topologia do terceiro estágio é apresentada na figura 12.

Fig. 12. Topologia 3º Estágio - Amplificador Buffer Push Pull

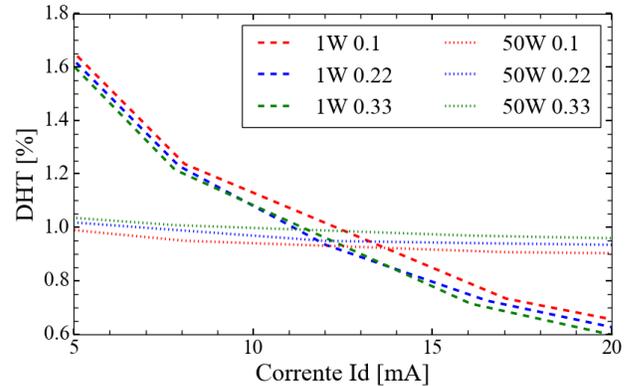


Próprio autor.

Fonte:

Afim de definir o melhor valor para resistência R_o , fixou-se os parâmetros do segundo estágio em $A_v=800$ e $I_d=45\text{mA}$, com isso realizou-se simulações alterando o valor de I_d do terceiro estágio para potência de 1W e 50W com os resistores de $0,1\Omega$, $0,22\Omega$ e $0,33\Omega$. Os testes foram realizados buscando encontrar uma DHT para baixa e alta potência parecidas, isso garante que a DHT do amplificador não seja afetada pelo crossover em baixa potência e pela não linearidade do transistor em alta potência. Os resultados obtidos são apresentado na figura 13.

Fig. 13. Distorção Harmônica Total mais Ruído (DHT+N) em função de I_d para alguns valores de R_o com 1W e 50W de potência na saída.

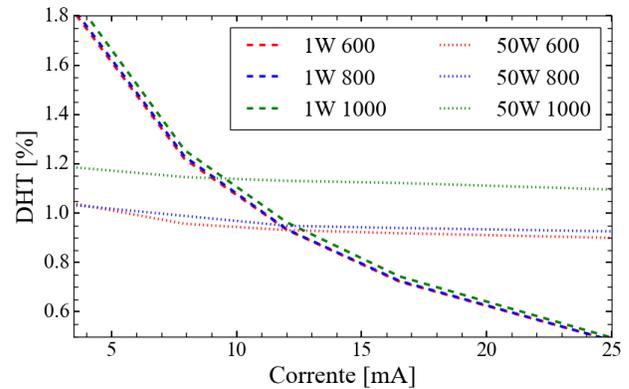


Fonte: Próprio autor.

Nota-se que utilizando o $R_o=0,22\Omega$ obtém-se melhores resultados, isso devido ao fato de não ter a maior DHT para baixa e alta potência, o que o torna mais estável.

Definido $R_o=0,22\Omega$ realizou-se simulações para os 3 casos escolhidos na tabela II afim de observar o comportamento com o terceiro estágio acoplado. O gráfico da figura 14 apresenta os resultados obtidos.

Fig. 14. Distorção Harmônica Total mais Ruído (DHT+N) em função de I_d para alguns valores de A_v com 1W e 50W de potência na saída.



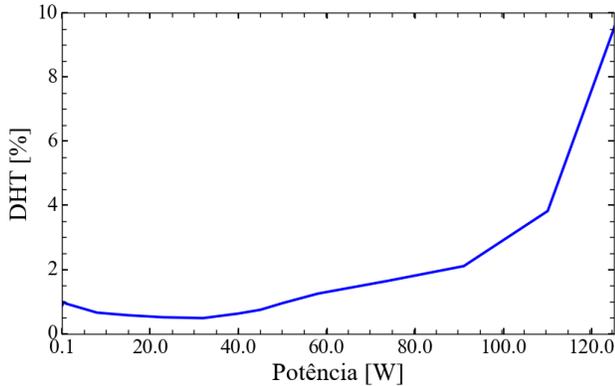
Fonte: Próprio autor.

Analisando a figura 14, observa-se que para os casos de $A_v=600$ e $A_v=800$ a DHT não apresenta uma mudança significativa. Portanto, afim de aproveitar melhor os benefícios da realimentação será adotado $A_v=800$, $I_d=45\text{mA}$ no segundo estágio e para o terceiro estágio $I_d=12\text{mA}$ devido possuir menor variação da DHT de 1W e 50W o que o caracteriza mais estável. A figura 15 apresenta o comportamento mais detalhado da DHT em função da potência entregue para a carga para o circuito escolhido.

Segundo Self et al. (2009), a experiência do projetista é fundamental para definir uma taxa de realimentação negativa segura que garante estabilidade ao amplificador, a taxa de realimentação negativa usual sugerida é de 30 dB para 20 kHz, podendo chegar até 40 dB porém é mais arriscado. Para conseguir uma potência de 50W na carga é necessário um

ganho $A_v=28,28$, portanto a taxa de realimentação negativa utilizada foi de 29 dB.

Fig. 15. Distorção Harmônica Total mais Ruído (DHT+N) em função da potência.



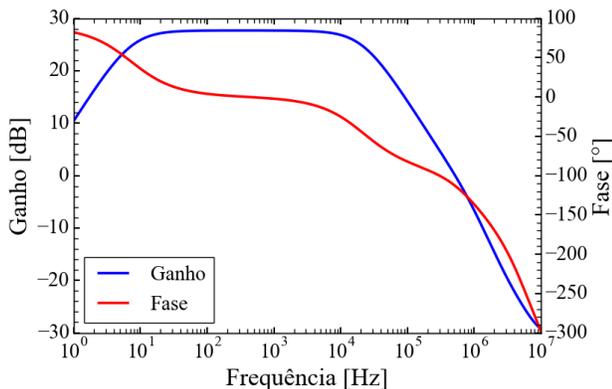
Fonte: Próprio autor.

Com os 3 estágios definidos fechou-se a malha e verificou-se a margem de ganho e margem de fase afim de conferir a estabilidade em malha fechada. Com isso obteve-se uma margem de ganho de 4,48 dB e uma margem de fase de $19,1^\circ$.

Segundo Green (2010), é considerado uma boa prática ter uma margem de fase superior a 45° , sendo preferível 60 para obter um circuito com realimentação negativa global estável.

Com intuito de melhorar a margem de fase verificada, adicionou-se um filtro RC no 1º estágio, 2 capacitores de compensação em paralelo aos resistores R_{gain} do 2º estágio, e um capacitor de 1pF em paralelo ao resistor que fecha a malha simulando uma capacitância parasita. O diagrama de bode em malha fechada pode ser observado na figura 16, observando este diagrama obteve-se uma margem de fase de $66,9^\circ$ e margem de ganho de 16,9dB.

Fig. 16. Diagrama de bode de malha fechada.



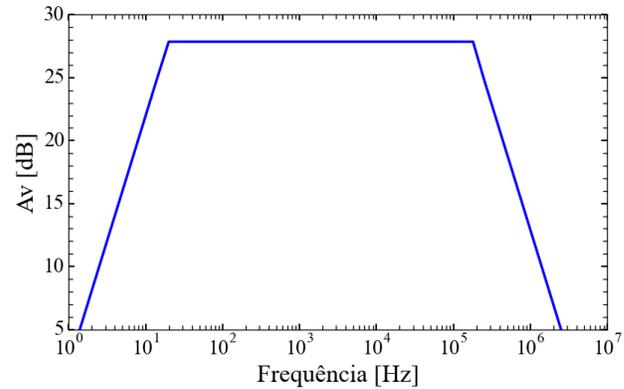
Fonte: Próprio autor.

V. DESEMPENHO

O circuito otimizado do amplificador de áudio de alto desempenho utilizando realimentação global negativa foi implementado em uma placa de circuito impresso e os parâmetros de desempenho foram medidos. O esquema do circuito pode ser observado na figura 19.

O diagrama de bode do amplificador, apresentado na figura 17, foi obtido através de medições com potência saída de 50W. As frequências de corte inferior e superior coletadas foram $F_i=14\text{Hz}$ e $F_s=250\text{kHz}$, respectivamente.

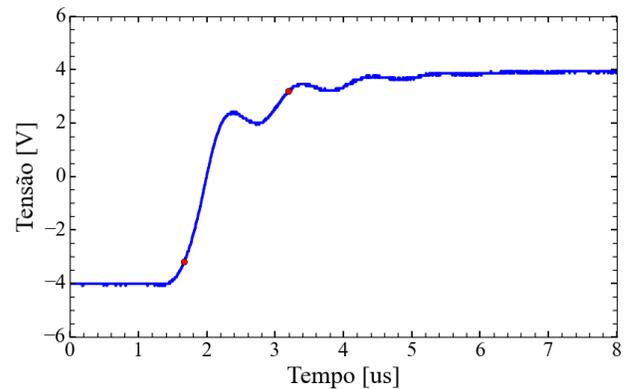
Fig. 17. Diagrama de bode do amplificador.



Fonte: Próprio autor.

Existem várias maneiras de medir o Slew Rate em amplificadores de áudio. Neste trabalho utilizou-se o método que injeta um sinal de onda retangular no amplificador de modo que o sinal de saída fique de -4V até 4V, conforme apresentado na figura 18, e executa uma análise desta resposta temporal. O Slew Rate pode ser calculado medindo a variação de tensão de saída entre 10% e 90% da excursão total ΔV [V] e dividindo pela variação temporal Δt [s].

Fig. 18. Resposta temporal medida na excursão de saída total ($V_{in}=162\text{mVpp}$).

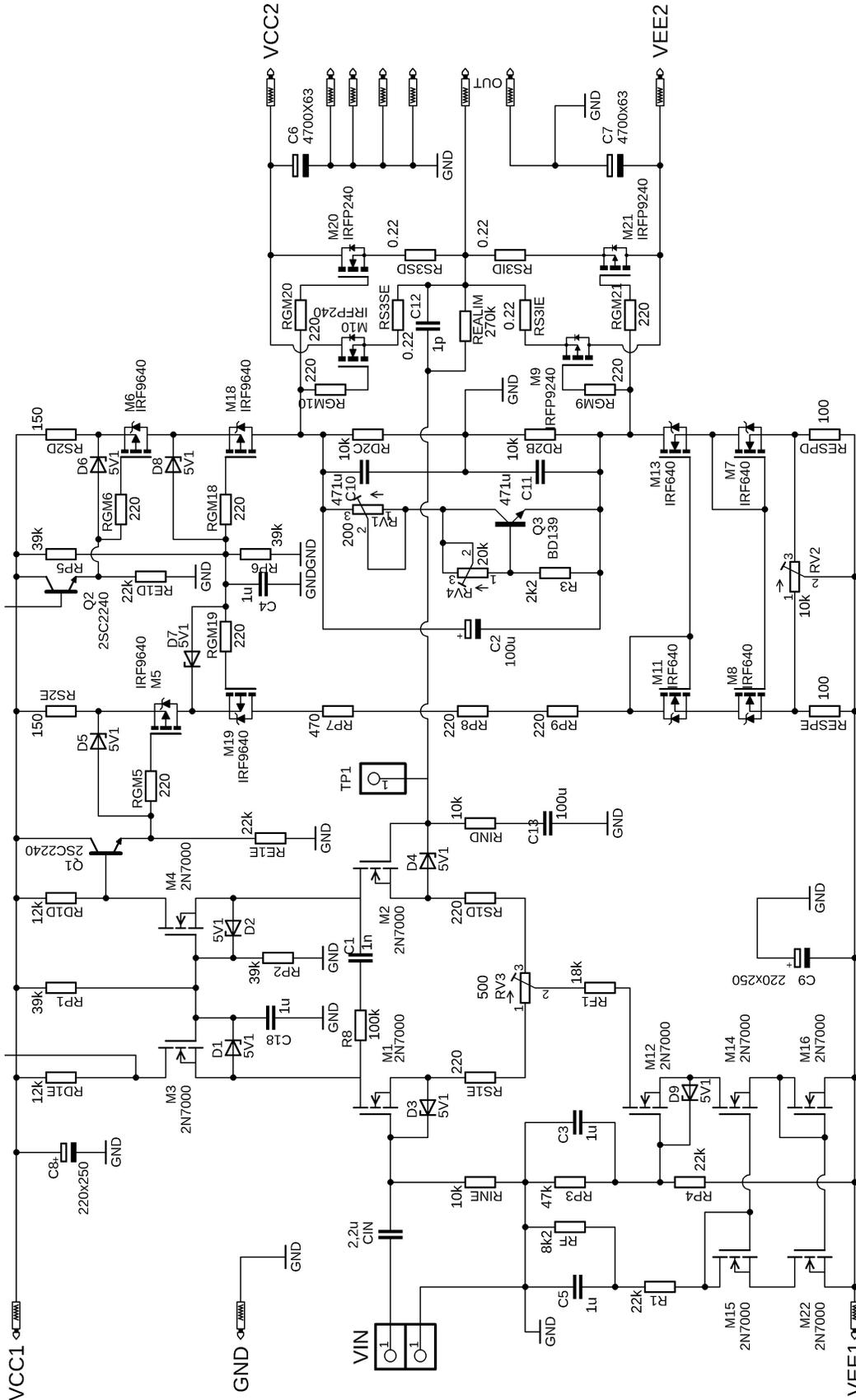


Fonte: Próprio autor.

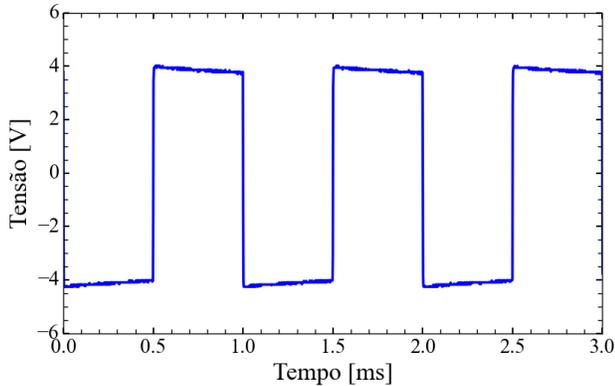
No exemplo apresentado na figura 18, a variação de tensão medida é $\Delta V=6,4\text{V}$ e a variação de tempo $\Delta t=1,52\mu\text{s}$, realizando o cálculo do slew rate de $\Delta V/\Delta t=6,4\text{V}/1,52\mu\text{s}$ resulta em $\text{SR}=4,2\text{V}/\mu\text{s}$.

Para observar o comportamento temporal do amplificador, a figura 20 e 21 mostra a tensão de saída com amplitude de 8Vpp para sinais de entrada retangulares e frequências de 1kHz e 10kHz, respectivamente. Analisando os gráficos na figura 20 e 21, pode-se verificar que não há anéis ou oscilações de qualquer tipo e, para 10kHz, o sinal é rápido o suficiente, com pouca deformação.

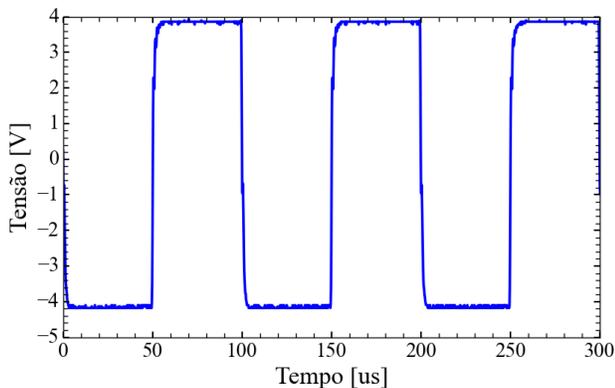
Fig. 19. Circuito otimizado do amplificador de áudio de alto desempenho utilizando realimentação global negativa.



Fonte: Próprio autor.

Fig. 20. Ondas quadradas de saída do amplificador em 1kHz ($V_o=8V_{pp}$).

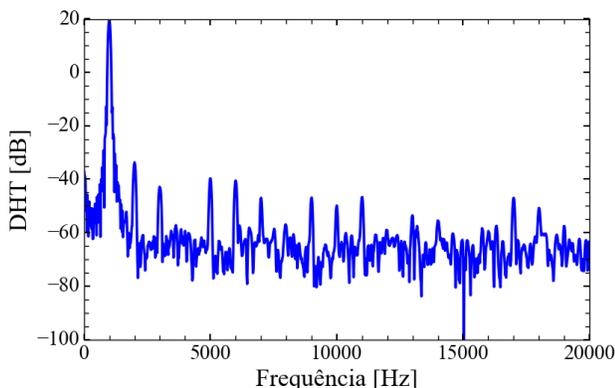
Fonte: Próprio autor.

Fig. 21. Ondas quadradas de saída do amplificador em 10kHz ($V_o=8V_{pp}$).

Fonte: Próprio autor.

Utilizando um gerador de funções injetou-se um sinal de 1kHz na entrada do amplificador e com auxílio do osciloscópio mediu-se as distorções harmônicas até a 19^o ordem, a figura 22 apresenta uma Fast Fourier Transform (FFT) coletada. Para diminuir os erros de medidas, realizou-se o cálculo da média de várias medições, os resultados são apresentados na tabela III.

Fig. 22. Fast Fourier Transform (FFT) do amplificador para um sinal de 1kHz e 50W.



Fonte: Próprio autor.

Tabela III
MÉDIAS DA DHT

Potência	DHT [%]
0,1W	0,176
1W	0,073
50W	0,0296

VI. CONCLUSÃO

Comparando os resultados de desempenho obtidos do amplificador final com as simulações realizadas obteve-se resultados dentro do esperado. Com isso, conclui-se que foi possível desenvolver um projeto adotando a mesma topologia utilizada em “A design methodology for audio amplifiers with no global negative feedback: proposal and validation” Visintin et al. (2022) realizando uma otimização para utilização de realimentação negativa global.

A otimização deste projeto foi voltada para obter o melhor resultado para os parâmetros de slew rate, DHT, frequência de corte inferior e superior. Com os dados coletados nas simulações é possível retornar ao projeto e otimizar um parâmetro em específico sem que seja necessário realizar todas as simulações novamente.

O amplificador de áudio de alto desempenho desenvolvido neste trabalho, possibilitará uma futura comparação entre as abordagens de amplificadores com e sem realimentação negativa global.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter me abençoado em toda a minha trajetória e ter me ajudado a superar todos os obstáculos ao longo destes anos.

Em sequência, agradeço a minha família, em especial aos meus pais Adriana Mendes Cardoso da Circuncisão e Mario Ferreira da Circuncisão, e ao meu irmão Romario Cardoso Ferreira que me deram todo o suporte e incentivo para prosseguir com meu sonho de cursar uma Universidade Federal. Sem o amor, encorajamento e apoio inabaláveis deles, este trabalho não teria sido possível.

Agradeço também ao meu orientador Carlos Alberto De Francisco, pela paciência, dedicação e orientação durante todo o processo de elaboração deste trabalho. Agradeço o Sr. José Roberto Esperança, Rafael Marchiori Visintin e ao Dr. Heitor Vinícius Mercaldi por todo apoio na montagem do projeto.

Por fim, gostaria de agradecer a Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade de realizar este trabalho e pelo excelente ambiente de aprendizado que proporcionou.

Muito obrigado a todos!

REFERÊNCIAS

- CORDELL, B. *Designing Audio Power Amplifiers*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011.
- DISSIPADORES, H. *Catálogo HS Dissipadores 2023*. 2023. Disponível em: (<https://www.hsdisipadores.com.br/catalogo.pdf>).
- DUNCAN, B. *High Performance Audio Power Amplifiers*. [S.l.]: Elsevier, 1996.
- GREEN, J. *Stability and simulation of negative feedback audio power amplifier circuits*. 2010.

- IEC-60268-3. *Sound System Equipment - Part 3: Amplifiers*. 3. ed. [S.l.], 2000.
- PIRES, F. J. A. *Amplificador de áudio classe D*. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto (Portugal), 2010.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2007.
- SELF, A. P. A. D. *Douglas Self*. [S.l.]: Focal Press, 2009.
- SELF, D. *Audio power amplifier design handbook*. 4. ed. [S.l.]: Newnes, 2006. ISBN 0750680725,9780750680721,0080462790,9780080462790.
- SELF, D. et al. *Audio engineering: know it all*. [S.l.]: Newnes, 2009. v. 1.
- VISINTIN, R. M. et al. A design methodology for audio amplifiers with no global negative feedback: proposal and validation. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 43, n. 2, p. 105–114, Nov. 2022. Disponível em: (<https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/46530>).