



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA - DELT
Laboratório de Circuitos Eletrônicos II - Prof. Thiago Oliveira

PROJETO DE AMPLIFICADOR DE ÁUDIO

ETAPA 2

Luis Henrique Lindgren Alves Vieira - 2015016176
Nander Santos do Carmo - 2018019931

Belo Horizonte, junho de 2021

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	4
SIMULAÇÕES.....	7
Ganho de Malha Aberta e Fechada.....	7
Banda Passante em Malha Aberta e Fechada.....	9
Ganho de Modo-comum.....	10
Resistência de Entrada em Malha Aberta e Fechada.....	12
Resistência de Saída em Malha Aberta e Fechada.....	14
Fator de Rejeição de Fonte em Malha Fechada (PSRR).....	16
Tensões de Saturação do Amplificador em Malha Fechada.....	17
Tensão de Offset.....	18
Slew Rate.....	19
Taxa de Distorção Harmônica (THD).....	20
RESULTADOS E CONCLUSÃO.....	21
BIBLIOGRAFIA.....	23

LISTA DE IMAGENS

Figura 1: Amplificador de Áudio com Fonte de Corrente com Zener.....	4
Figura 2: Amplificador de Áudio com Fonte de Corrente Realimentada.....	5
Figura 3: Amplificador de Áudio com Carga Ativa.....	6

LISTA DE CÁLCULOS

Texto 1: Cálculo do Ganho de Modo-comum.....	11
Texto 2: Cálculo da Resistência de Entrada em Malha Aberta.....	13
Texto 3: Cálculo da Resistência de Saída em Malha Aberta.....	15
Texto 4: Cálculo do Slew Rate.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ganho de Malha Aberta.....	8
Tabela 2: Ganho Diferencial em Malha <i>Fechada</i>	8
Tabela 3: <i>Banda Passante em Malha Aberta</i>	10
Tabela 4: <i>Banda Passante em Malha Fechada</i>	10
Tabela 5: <i>Ganho de Modo-comum em Malha Aberta</i>	11
Tabela 6: <i>Ganho de Modo-comum em Malha Fechada</i>	11
Tabela 7: <i>Resistência de Entrada em Malha Aberta</i>	13
Tabela 8: <i>Resistência de Entrada em Malha Fechada</i>	13
Tabela 9: <i>Resistência de Saída em Malha Aberta</i>	15
Tabela 10: <i>Resistência de Saída em Malha Fechada</i>	15
Tabela 11: <i>PSRR Fonte Positiva</i>	17
Tabela 12: <i>PSRR Fonte Negativa</i>	17
Tabela 13: <i>Saturação Positiva</i>	18
Tabela 14: <i>Saturação Negativa</i>	18
Tabela 15: <i>Tensão de Offset</i>	19
Tabela 16: <i>Slew Rate</i>	20
Tabela 17: Distorção Harmônica Total (THD).....	21

INTRODUÇÃO

Nesta etapa serão realizadas alterações no circuito de entrada do amplificador. Dessa forma, serão analisados os impactos que as alterações implementadas no par diferencial provocam nas figuras de mérito do projeto.

Desta forma, neste relatório serão analisadas duas topologias de fonte de corrente para a polarização do par diferencial, o modelo com um diodo zener e uma fonte de corrente realimentada, além de serem estudados os impactos da alteração da carga do par para uma carga ativa. Assim, serão utilizados ao longo das simulações três modelos diferentes de amplificador, cujos circuitos e alterações realizadas podem ser observados em detalhe na Figura 1 (Fonte de Corrente com Zener) Figura 2 (Fonte de Corrente Realimentada) e na Figura 3 (Circuito com Carga Ativa).

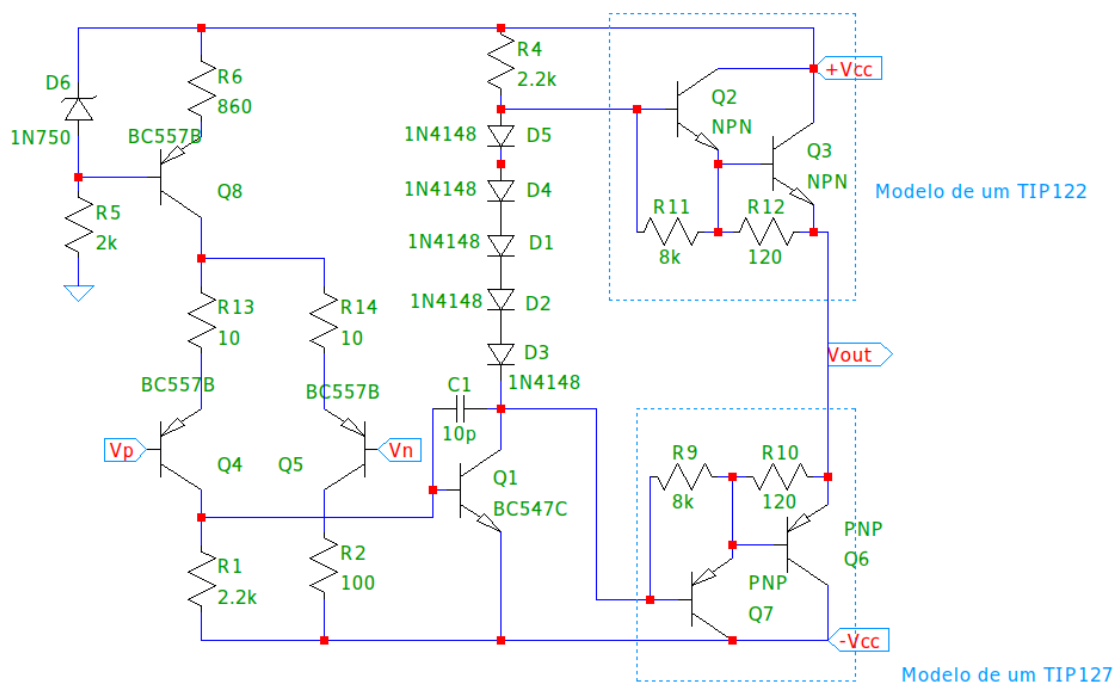


Figura 1: Amplificador de Áudio com Fonte de Corrente com Zener.

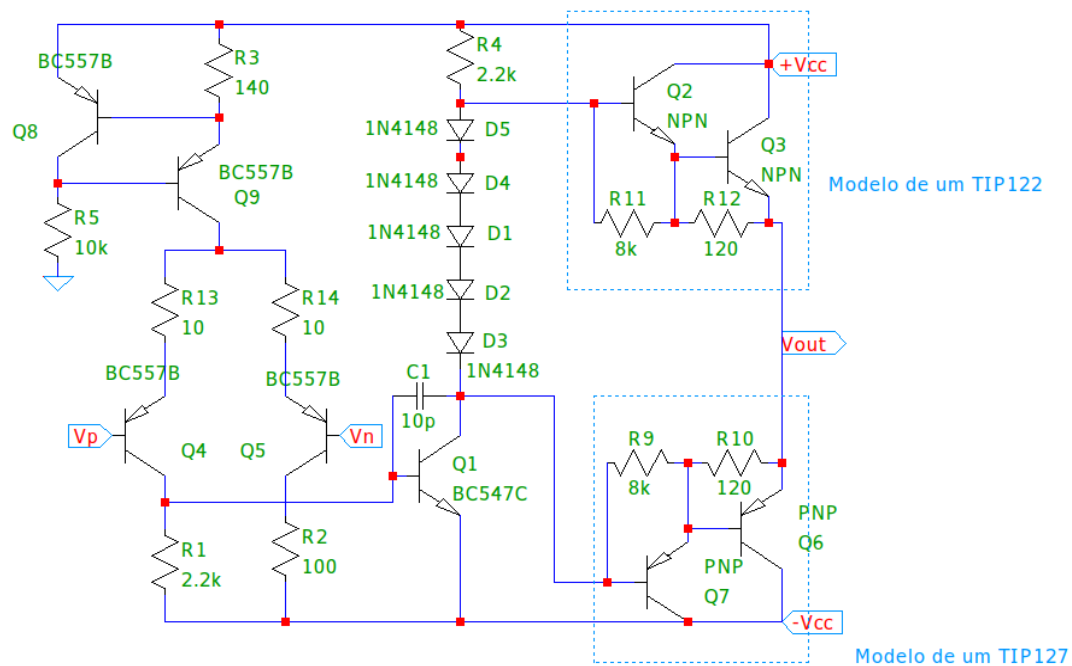
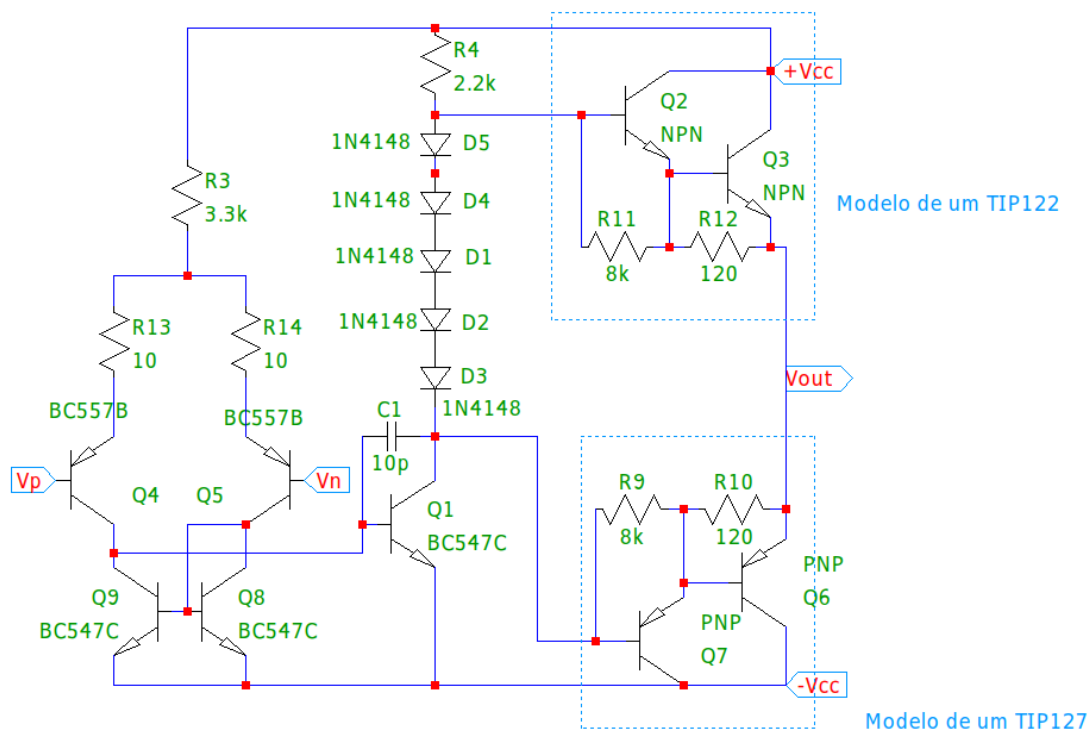


Figura 2: Amplificador de Áudio com Fonte de Corrente Realimentada.



Os parâmetros de interesse do amplificador e que serão discutidos são:

- Ganho de malha aberta e fechada;
- Banda passante de malha aberta e fechada;
- Ganho de modo-comum do amplificador operacional;
- Resistência de entrada do amplificador operacional em malha aberta e fechada;
- Resistência de saída do amplificador operacional em malha aberta e fechada;
- Fator de rejeição de fonte (em malha fechada);
- Tensões de saturação do amplificador (em malha fechada);
- Tensão de offset do amplificador;
- Slew rate do amplificador;
- Taxa de distorção harmônica do amplificador;

Por fim, todas as configurações utilizadas para realizar as medições dos parâmetros do amplificador são as mesmas descritas na primeira etapa deste trabalho e, portanto, não serão mostradas novamente neste relatório, a menos que seja necessário realizar alguma mudança. Com relação às metodologias de medição, estas serão brevemente descritas em cada uma das seções.

SIMULAÇÕES

Ganho de Malha Aberta e Fechada

Para obtenção do ganho diferencial em malha aberta, foi necessário colocar nas entradas diferenciais do amplificador uma fonte de tensão configurada para realizar um *AC Sweep* em uma das portas e o terra na outra. Para obter a magnitude do ganho em malha aberta, basta medir a tensão de saída V_{out} e dividir pela diferença de tensão entre as entradas V_p e V_n .

Para obtenção do ganho diferencial em malha fechada, foi realizado o mesmo procedimento descrito para o ganho em malha aberta, com a diferença de que nesse caso a entrada foi medida na saída da fonte V_{sig} . Assim, a obtenção do ganho se dá dividindo V_{out} por V_{sig} .

Tabela 1: Ganho de Malha Aberta.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
72.98 dB	72.14 dB	72.07 dB	90.25 dB

Tabela 2: Ganho Diferencial em Malha Fechada.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
20.02 dB	19.98 dB	19.98 dB	20.00 dB

Como pode ser visto na Tabela 1 e na Tabela 2, a alteração da polarização do circuito para as fontes de corrente com zener e realimentada provoca uma piora dos ganhos em malha aberta e fechada do amplificador, porém essa piora não é muito significativa.

No caso da configuração com carga ativa, assim como esperado devido ao aumento considerável da resistência de carga do par diferencial e, conseqüentemente da impedância enxergada pelos próximos estágios do

amplificador, há um aumento considerável do ganho diferencial de malha aberta do amplificador.

Banda Passante em Malha Aberta e Fechada

Para obter o valor da banda passante basta encontrar o ponto em que a tensão V_{out} do circuito cai 3dB de intensidade.

Tabela 3: Banda Passante em Malha Aberta.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
26.59 KHz	29.14 KHz	29.61 KHz	16.21 KHz

Tabela 4: Banda Passante em Malha Fechada.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
13.54 MHz	13.66 MHz	13.62 MHz	29.44 MHz

Como esperado, é possível perceber através da Tabela 3 e da Tabela 4 que sempre que o ganho do amplificador é reduzido, como no caso da fonte de corrente realimentada, sua banda passante é expandida. O mesmo vale para o circuito de polarização utilizando o diodo zener.

Na configuração utilizando a carga ativa é possível perceber uma piora considerável na banda passante do amplificador em malha aberta. Essa piora é esperada devido ao aumento do ganho do amplificador. A banda passante do amplificador em malha fechada, que não ocorre esse aumento de ganho, foi consideravelmente expandida, por outro lado.

Ganho de Modo-comum

A partir do valor medido do ganho de modo-comum em malha fechada, dado como a razão entre a tensão de saída V_{out} e a tensão de entrada V_{sig} , e do ganho diferencial em malha aberta do amplificador (dados em V/V) é possível obter o valor do ganho de modo-comum em malha aberta do amplificador utilizando a fórmula apresentada no Texto 1.

$$A_{cm} = \frac{2 * (1 + A_d * R_1) * A_{cm, mf}}{2 * R_2 + R_1 * A_{cm, mf}}$$

$$\Rightarrow R_1 = 470 \, \Omega \text{ e } R_2 = 4.7 \, k \, \Omega$$

Texto 1: Cálculo do Ganho de Modo-comum.

Tabela 5: Ganho de Modo-comum em Malha Aberta.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
27.89 dB	-5.42 dB	-6.98 dB	-4.12 dB

Tabela 6: Ganho de Modo-comum em Malha Fechada.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
-25.06 dB	-57.56 dB	-59.05 dB	-74.37 dB

Assim como esperado, o modelo de fonte de corrente realimentada apresenta uma melhora significativa do ganho de modo-comum do amplificador, assim como a fonte de corrente com o diodo zener, porém o modelo realimentado apresenta uma melhoria mais considerável, o que era esperado.

Quando utilizando a carga ativa nos braços do par diferencial é forçada o equilíbrio da tensão diferencial de saída do par, o que reduz de forma considerada o ganho de modo-comum do amplificador. Esse comportamento está validado na Tabela 6 e na Tabela 7.

Resistência de Entrada em Malha Aberta e Fechada

Para obter o valor da resistência de entrada em malha fechada do amplificador, é preciso adicionar uma fonte de entrada com uma componente AC de 1V. Assim, para obter a resistência de entrada basta obter a tensão e a corrente de entrada da porta não inversora e, em seguida, dividir esse valor de tensão pelo valor de corrente, através de uma simulação do tipo *AC Sweep*.

Assim, conhecendo o valor da resistência de entrada em malha fechada do amplificador, para obter o valor da resistência de entrada em malha aberta basta usar a seguinte expressão mostrada no Texto 2.

$$R_i = \frac{R_{if}}{(1 + A * \beta)}$$

$$\beta : \frac{1}{11}$$

$$A_d : 4410.62$$

Texto 2: Cálculo da Resistência de Entrada em Malha Aberta.

Tabela 7: Resistência de Entrada em Malha Aberta.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
39.55 kΩ	43.74 kΩ	44.09 kΩ	7.75 kΩ

Tabela 8: Resistência de Entrada em Malha Fechada.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
16.06 MΩ	16.13 MΩ	16.13 MΩ	22.94 kΩ

Como mostrado na Tabela 7 e Tabela 8 o valor da resistência de entrada é pouco afetado quando altera-se a polarização do circuito para as

fontes de corrente com o zener e realimentada, tendo apenas uma leve melhoria.

Em contrapartida, ao contrário do que se esperava, quando utilizando a carga ativa, a resistência de entrada piorou consideravelmente, mesmo realizando a medição considerando a tensão e a corrente diferencial nas entradas do par diferencial. Assim, percebemos a necessidade de alterar os transistores do par diferencial de entrada para MOSFETs de forma a otimizar esse parâmetro.

Resistência de Saída em Malha Aberta e Fechada

Como o amplificador analisado satura rapidamente em malha aberta não é possível obter diretamente o valor da resistência de saída em malha aberta. Para obter o valor da resistência de saída em malha fechada do amplificador, é preciso remover a fonte de entrada do amplificador, aterrando as duas entradas. Em seguida é adicionada uma fonte de auxiliar com uma componente AC de 1V na saída do amplificador. Assim, para obter a resistência de saída basta obter a corrente de saída dessa fonte auxiliar e dividir o valor de tensão por esse valor de corrente, através de uma simulação do tipo AC Sweep.

$$R_o = R_{of} * (1 + A * \beta)$$

$$\beta : \frac{1}{11}$$

$$A_d : 4410.62$$

Texto 3: Cálculo da Resistência de Saída em Malha Aberta.

Assim, conhecendo o valor da resistência de saída em malha fechada do amplificador, para obter o valor da resistência de saída em malha aberta basta usar a seguinte expressão mostrada no Texto 3.

Tabela 9: Resistência de Saída em Malha Aberta.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
0.48 Ω	0.42 Ω	0.42 Ω	1.22 Ω

Tabela 10: Resistência de Saída em Malha Fechada.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
1.17 m Ω	1.13 m Ω	1.14 m Ω	0.42 m Ω

Conforme esperado, as fontes de corrente pouco influenciam na resistência de saída do amplificador, tanto em malha aberta quanto em malha fechada, havendo apenas uma leve melhoria, como mostrado na Tabela 9 e na Tabela 10.

No caso do circuito com carga ativa, por sua vez, há uma melhoria considerável da resistência de saída em malha fechada e uma piora em malha aberta. Porém, como o amplificador é projetado para operar, idealmente, sempre realimentado essa piora pode ser desconsiderada.

Fator de Rejeição de Fonte em Malha Fechada (PSRR)

Aplicando uma perturbação AC de 1V na alimentação positiva e negativa do amplificador, é possível obter os valores do PSRR para cada um dos terminais da alimentação medindo o valor da tensão de saída Vout.

Tabela 11: PSRR Fonte Positiva.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
-24.71 dB	-65.09 dB	-62.29 dB	-86.73 dB

Tabela 12: PSRR Fonte Negativa.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
-64.90 dB	-63.09 dB	-63.43 dB	-84.26 dB

Conforme esperado, o modelo de fonte de corrente realimentada apresenta uma melhora considerável do PSRR em ambas as fontes, visto que essa configuração apresenta uma baixa sensibilidade à variação do sinal de alimentação devido à realimentação do circuito que tende a balancear essas oscilações. O mesmo acontece para a implementação utilizando o zener, porém nesse caso o impacto é um pouco menor.

Assim como descrito no tópico do ganho de modo comum para a implementação utilizando a carga ativa, o equilíbrio forçado nos braços do par diferencial pela carga ativa ajuda a suprimir qualquer perturbação vinda do sinal de alimentação, o que acarreta na melhora significativa do PSRR de ambas as fontes.

Tensões de Saturação do Amplificador em Malha Fechada

Para obtenção das tensões de saturação positiva e negativa do amplificador em malha fechada, é realizada uma simulação transiente com uma fonte de tensão de entrada configurada como uma rampa de tensão de -15V a 15V, logo, as tensões de saturação são obtidas na região em que o amplificador perde o comportamento linear.

Tabela 13: Saturação Positiva.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
12.43 V	12.42 V	12.42 V	12.42 V

Tabela 14: Saturação Negativa.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
-13.14 V	-13.15 V	-13.15 V	-13.15 V

Para os modelos de fonte de corrente com realimentação e com o zener é possível observar nas tabelas acima, Tabela 13 e Tabela 14, que essas configurações praticamente não provocam alteração do valor das tensões de saturação do amplificador. O mesmo acontece para a configuração com carga ativa.

Tensão de Offset

Através do arquivo de *log* do LTSpice é possível obter o valor da tensão de offset de saída do amplificador após uma simulação do tipo transiente.

Tabela 15: Tensão de Offset.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
-1.206 V	-1.252 V	-1.238 V	0.8 mV

A fonte de corrente com realimentação, apesar da melhoria do valor do ganho de modo-comum discutida anteriormente, apresenta uma piora do valor da tensão de offset visto que as alterações realizadas não melhoram diretamente o casamento dos braços do par diferencial. O mesmo pode ser observado para o modelo de fonte de corrente com o zener que também apresenta uma leve piora desse parâmetro.

Novamente, o equilíbrio de tensão forçado pela carga ativa no par diferencial provoca a redução considerável da tensão de offset de saída, assim como mostrado na Tabela 15.

Slew Rate

O slew rate do amplificador pode ser obtido através do uso dos cursores do programa, estimando a variação de tensão e do tempo na região de variação linear de subida do sinal de saída do amplificador quando submetido a um sinal de pulso. Por fim basta calcular o valor da derivada do amplificador através da fórmula mostrada no Texto 4.

$$SR = \frac{\Delta V}{\Delta t} [V / \mu s]$$

Texto 4: Cálculo do Slew Rate.

Tabela 16: Slew Rate.

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
17.78 V / μs	21.72 V / μs	18.52 V / μs	102.15 V / μs

O modelo de fonte de corrente com realimentação, por sua vez, apresenta uma leve melhora do valor de slew rate do amplificador. Essa melhora também acontece de forma moderada no modelo com o zener, apresentando porém, um resultado melhor do que o modelo com realimentação.

Como o slew rate é compreendido como a facilidade que o amplificador tem em alternar o valor de saída, o fato de que qualquer alteração do sinal de entrada é rapidamente compensado pela realimentação da carga ativa, o amplificador passa a ter uma resposta muito mais rápida que a obtida no circuito original e nos modelos apenas com as fontes de corrente. Isso pode ser verificado na Tabela 16.

Taxa de Distorção Harmônica (THD)

Através do arquivo de *log* do LTSpice e da análise do tipo *four* é possível obter o valor da taxa de distorção harmônica (THD) do amplificador.

Tabela 17: Distorção Harmônica Total (THD).

Original	Zener	Fonte Realimentada	Carga Ativa
0.00945 %	0.01026 %	0.01032 %	0.00222 %

No caso da fonte de corrente com realimentação existe uma leve piora no valor da THD do amplificador, o que indica uma leve piora na linearidade do amplificador. O modelo de fonte de corrente com o diodo zener apresenta um resultado semelhante ao descrito para a fonte realimentada, porém um pouco pior.

A utilização da carga ativa provoca uma melhoria na linearidade do amplificador. Isso resulta em uma melhoria considerável do THD.

RESULTADOS E CONCLUSÃO

Observando o resultado da simulação mostrados nos tópicos anteriores, foi possível escolher a topologia que iremos adotar nas próximas etapas do desenvolvimento do amplificador de áudio.

É possível perceber que a topologia de fonte de corrente realimentada apresenta resultados mais satisfatórios que a topologia com o diodo zener nos seguintes parâmetros:

- Banda Passante em Malha Aberta;
- Ganho de Modo-comum em Malha Aberta;
- Ganho de Modo-comum em Malha Fechada;
- Resistência de Entrada em Malha Aberta;
- PSRR Fonte Negativa;

Enquanto a topologia de fonte de corrente com o diodo zener é melhor nos seguintes parâmetros:

- Ganho de Malha Aberta;
- Banda Passante em Malha Fechada;
- PSRR Fonte Positiva;
- Slew Rate;

Nos demais parâmetros a diferença entre o resultado das duas topologias é irrelevante ou mesmo nula. Assim, é possível perceber uma vantagem da topologia de fonte de corrente realimentada. Além disso, os

parâmetros impactados positivamente por essa topologia são mais significativos. Por isso optamos por utilizar essa topologia nas próximas etapas.

Por fim, o uso da carga ativa impactou positivamente os seguintes parâmetros:

- Ganho de Malha Aberta;
- Banda Passante em Malha Fechada;
- Ganho de Modo-comum em Malha Aberta;
- Ganho de Modo-comum em Malha Fechada;
- Resistência de Saída em Malha Fechada;
- PSRR Fonte Positiva;
- PSRR Fonte Negativa;
- Tensão de Offset;
- Slew Rate;
- THD;

Assim, mesmo sabendo do impacto negativo que essa implementação teve na resistência de entrada em malha aberta e fechada do amplificador, optamos por utilizar essa topologia nas próximas etapas, porém, realizando a substituição dos transistores do par diferencial por MOSFETs.

BIBLIOGRAFIA

DESCONHECIDO, Autor. **Opamp Basics**. Disponível em:
<<https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Op-Amp-Applications/Section1.pdf>>. Acesso em 10 de março de 2021.