

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CURSO TÉCNICO SUBSEQUENTE EM ELETRÔNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO

por

HARLLEN ARAÚJO DE SENA

e

HENRIQUE CIRILO COSTA

orientado pelo

PROF. DR. CÍCERO ALISSON DOS SANTOS

JOÃO PESSOA - PB
17 DE OUTUBRO DE 2025

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CURSO TÉCNICO SUBSEQUENTE EM ELETRÔNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO

por

HARLLEN ARAÚJO DE SENA

e

HENRIQUE CIRILO COSTA

orientado pelo

PROF. DR. CÍCERO ALISSON DOS SANTOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao IFPB.

JOÃO PESSOA - PB
17 DE OUTUBRO DE 2025

SUMÁRIO

I	Preliminares	4
I.1	Amplificadores Operacionais	4
II	Resumo do projeto	5
II.1	Sobre o projeto	5
II.2	Um tour pelos designs	6
II.2.1	A entrada desbalanceada	6
II.2.2	A entrada balanceada	6
II.2.3	O estágio de ganho	6
II.2.4	O amplificador de potência	8

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I

PRELIMINARES

I.1 AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

CAPÍTULO II

RESUMO DO PROJETO

II.1 SOBRE O PROJETO

A proposta do projeto é inovadora no sentido que ela propõe criar um amplificador de áudio com baixa distorção¹ e de baixo custo, usando uma combinação de vários CIs NE5532. Cada um consiste dum amplificador operacional (AmpOp) dual, precisamente, um *Dual In-Line Package* (DIP) com dois amplificadores operacionais embutidos. O autor do projeto justifica a escolha deste CI devido à sua baixa distorção, à sua baixa impedância² de saída e à uma notável performance de ruído.

A fim de suplantar o desafio técnico de alimentar um alto-falante de 8Ω com uma potência aceitável, faz-se o uso duma ponte (*Bridge*). Conectam-se dois amplificadores em cascata (série), resultando num aumento de duas vezes a tensão e, consequentemente quadruplicando a potência do sinal, sobrepujando o limiar de potência dum único amplificador.

Um outro fator preponderante é o limite da corrente de saída de cada AmpOp, que por sua vez é estipulado para evitar sua sobrecarga. Segundo o próprio autor do projeto, o NE5532 consegue acionar uma carga de 500Ω ³ até o limiar da tensão de saída do AmpOp. Entretanto, é recomendável usar cargas mais “leves”, isto é, cargas com resistências maiores.

O projeto foi dimensionado para alimentar um alto-falante de 8Ω , caso o de 4Ω seja requerido, serão necessários duas vezes mais AmpOps, para fornecer o dobro de corrente demandada pela carga de 4Ω e, o mesmo se aplica ao modo de operação *Bridged*⁴.

O sistema foi desenvolvido de maneira modular, para abarcar os modos *Single-Ended*⁵ e *Bridged*. Ademais, devido à sua modularidade é possível construir um amplificador estéreo⁶ com apenas três PCIs.

É sabido que inerentemente os AmpOps possuem proteção contra sobrecarga. Não obstante, relés de saída são usados para evitar o *On-Off Muting* causador dos efeitos indesejados ao se ligar um sistema de áudio, e.g., os estalos (*pops*); e para evitar falhas DC, i.e., evitar que o sistema forneça um sinal DC intermitente ao alto-falante, precavendo assim, a degeneração da bobina por aquecimento⁷ e do sistema de suspensão do cone por deformação contínua.

¹Embora intuitivo é necessário precisar tecnicamente o que é distorção em áudio.

²Outro conceito a ser precisado.

³Creio que este parâmetro é dependente do fabricante.

⁴Neste modo, a carga, a saber, o alto-falante, receberá duas tensões invertidas em fase, isto por sua vez resultará na duplicação da tensão de saída e *a fortiori* na quadruplicação da potência.

⁵A carga será conectada ao GND e a tensão de saída.

⁶Precipuamente, a configuração estéreo é constituída de dois canais um esquerdo (*Left*) e um direito (*Right*).

⁷Efeito Joule.

II.2 UM TOUR PELOS DESIGNS

II.2.1 A ENTRADA DESBALANCEADA

Este estágio consiste de um filtro RF, neste caso um filtro passa-baixas, pois a tensão de saída é

$$(II.1) \quad \left| \frac{R_2 \| Z_{C_1}}{R_1 + R_2 \| Z_{C_1}} \right| \cdot V_{in} = \left| \frac{R_2}{\omega C_1 R_1 R_2 - j(R_1 + R_2)} \right| \cdot V_{in}$$

em que V_{in} é a tensão de entrada. Esta entrada é chamada de desbalanceada, pois está mais suscetível à interferência eletromagnética *Radio Frequency* (RF), por exemplo proveniente do uso cabos longos. Ela pode ser conectada diretamente ao estágio de ganho—tratado nas próximas subseções—através de um jumper em JP1.

II.2.2 A ENTRADA BALANCEADA

Um estágio convencional é construído com quatro resistores de 10 k Ω e um único AmpOp 5532, ele tem uma performance de ruído pior que uma entrada desbalanceada simples. Além disso, o ruído é ainda pior que a maioria dos amplificadores de potência. O amplificador balanceado soluciona este problema parcialmente. Trata-se dum estágio amplificador balanceado duplo (*Dual Balanced Stage Amplifier*) compreendendo aos AmpOps IC5A e IC5B, que cancela parcialmente ruído não correlacionado—ruído aleatório sem relação aos dois AmpOps—dando uma redução de ruído de 3 dB, melhorando assim o CMRR⁸. Ele também usa resistores de valores muito menores, a saber, 802 Ω se comparado com os usados ordinariamente, *viz.* 10 k Ω , engendrando assim num ruído Johnson⁹ (*Johnson Noise*) menor. Isso só é possível porque o amplificador é controlado pelos buffers, que permitem que a impedância de entrada sejam mais altas que o usual, evitando a sobrecarga dos equipamentos externos, melhorando ainda mais o CMRR. O ruído de saída é de menos de -112 dBu, uma melhora de 8 dB relativo à tecnologia convencional.

II.2.3 O ESTÁGIO DE GANHO

De acordo com o autor do projeto, o amplificador principal, assim como o estágio balanceado, possui um design inovador, que obtém uma distorção muito baixa distribuindo o ganho requerido sobre três estágios. Sabe-se que 22.7 dB poderia ser facilmente obtido com um único AmpOp. Não obstante, os NE5532s não estão completamente livres de distorção, e o THD (*Total Harmonic Distortion*) seria significativo.

O primeiro estágio (IC1A, IC1B) dá um ganho de 10.7 dB^[10]; as duas saídas são

⁸Definir este conceito!

⁹É sabido que um resistor antigo apenas estando sobre uma mesa, gera uma tensão de ruído através de seus terminais conhecido como ruído Johnson. Ele tem um *spectrum* de frequência achatado dentro de uma banda de frequências. Ruídos com *spectra* achatados são comumente classificados como ruído branco (*White Noise*). O ruído Johnson (Nyquist), é um ruído randômico inerente aos condutores elétricos em equilíbrio térmico, associado à agitação térmica dos portadores majoritários de carga (usualmente os elétrons) e indiferente à diferença de potencial no condutor. A tensão de ruído de circuito aberto gerado por uma resistência R em Ω à temperatura T em Kelvin [$T(t) \text{ K} = (t + 273) ^\circ\text{C}$] é na realidade dada pela expressão:

$$v_J(\text{rms}) = \sqrt{4k_BRT} \quad V(\text{rms}),$$

em que k é a constante de Boltzmann e B é o comprimento da banda em Hz.

¹⁰Eu calculei $20 \cdot \log_{10}(6220/910) \approx 16.7 \text{ dB}$.

combinadas por R_8 e R_9 engendrando uma vantagem de 3 dB¹¹, como no amplificador balanceado. O segundo estágio duplica a tensão, pois

$$(II.2) \quad V_{\text{out}} = \left(1 + \frac{R_{11}}{R_{10}}\right) \cdot V_{\text{in}} = \left(1 + \frac{2k2}{2k2}\right) \cdot V_{\text{in}} = 2 \cdot V_{\text{in}},$$

donde o ganho em dB é

$$(II.3) \quad 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right) = 20 \cdot \log_{10} 2 \approx 6 \text{ dB}.$$

O ganho é menor para maximizar a retroalimentação negativa (*Negative Feedback*), porque agora o nível de tensão é mais alto.

IC2B é um seguidor de tensão, logo, seu ganho é unitário. Sua função é prevenir a impedância de entrada de 1 k Ω do estágio de ganho final IC3B, de carregar a saída de IC2A, causando distorção. IC2B é menos vulnerável à carga, porque ela tem uma retroalimentação negativa máxima.

Em IC3B, no pino 6, em virtude de AmpOps possuírem impedância de entrada muito alta, a corrente nas entradas do AmpOp são negligíveis. Portanto, idealmente, segue da lei de Kirchhoff a igualdade

$$(II.4) \quad \frac{V_{\text{in}}}{R_{12}} + \frac{V_{\text{out}}}{R_{13} + R_{14}} = 0,$$

ou seja,

$$(II.5) \quad \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = -\frac{R_{13} + R_{14}}{R_{12}} = \frac{2047}{1000} \approx 2,$$

logo o ganho em dB é aproximadamente

$$(II.6) \quad 20 \cdot \log_{10} 2 \approx 6 \text{ dB}.$$

Ele é usado no modo *shunt-feedback* para evitar a distorção de modo comum, que resultariam de sinais de altos níveis. Ele tem uma saída do tipo ‘impedância-zero’, com retroalimentação HF (*High Frequency*) via C_8 e LF (*Low Frequency*) via R_{13} . Desta maneira, o *crosstalk*¹² é mantido no mínimo, enquanto mantém estabilidade com carga capacitiva¹³.

A saída em K_3 está revertida em fase e pode ser usada para *Bridging*¹⁴.

¹¹Não entendi o porquê.

¹²O que é isso?

¹³Isto está correto?

¹⁴???

IC3A é um estágio inversor de ganho unitário que corrige a fase do sinal. A saída também é do tipo ‘impedância-zero’.

II.2.4 O AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

O amplificador de potência consiste de trinta e dois 5532 dual AmpOp, logo, no total são 64 seções de AmpOps, atuando como seguidores de tensão, com suas saídas reunidas por resistores de $1\ \Omega$. Estes resistores combinados estão fora dos laços de retroalimentação dos 5532s.

(Incluir o *Damping Factor*).

A fila de AmpOps são unidos pelos jumpers K_5 – K_{12} .

Existe uma *Output Choke* L_1 para estabilidade em cargas capacitivas, e *Catching Diodes* D_1 – D_2 para prevenir danos devidos aos transientes¹⁵ de tensão ao limitar a corrente em cargas reativas.

¹⁵Geralmente são picos ou impulsos elétricos indesejados de curta duração, causador de estalos nos alto-falantes, e.g., no momento em que se liga e desliga o sistema de áudio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HOROWITZ, Paul; HILL, Winfield; *The Art of Electronics*. 7. ed. New York: Cambridge University Press, 2016.
- [2] MALVINO, Albert Paul. *Eletrônica*: Volume 1. 1^a ed. São Paulo: McGraw-Hill Education, 1987.
- [3] SELF, Douglas. *The 5532 OpAmpIifier. Part 1: design philosophy and schematics*. Elektor, p. 14–17, out. 2010.
- [4] SELF, Douglas; GIESBERTS, Ton. *The 5532 OpAmpIifier. Part 2: construction, bridged operation and test results*. Elektor, p. 24–27, nov. 2010.