

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
18 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
18 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
II.2.5	O relé de saída e seu controle	8
II.2.6	Fonte de tensão	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 [$T(t)$ K = $(t + 273)$ °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 $20 \cdot \log_{10}(6220/910) \approx 16.7$ 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 AmpOps, 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, e você pode se perguntar: Qual o efeito que eles terão na impedância de saída do amplificador? Uma baixa impedância de saída é sempre uma coisa boa a se fazer, mas não por causa do então chamado ‘fator de amortecimento’ (*Damping-Factor*), o qual é altamente não significativo devido ao fato que a bobina do alto-falante sempre domina a resistência do circuito. O ‘fator de amortecimento’ é definido como a impedância da carga dividido pela impedância de saída do amplificador. Nós temos 64 resistores de $1\ \Omega$ em paralelo, dando uma impedância total de $1\ \Omega/64 = 0.0156\ \Omega$. Isto nos dá o fator de amortecimento hipotético de $8/0.0156 = 512$, o que é muito bom em quaisquer padrões. Em comparação, o cabeamento para o alto-falante possui mais resistência do que isso!

A saída dos AmpOps podem ser soldados diretamente na placa, a fim de diminuir os custos e dar uma melhor condução de calor do encapsulamento do AmpOp às trilhas de cobre. Todavia o autor deste projeto decidiu usar soquetes de alta qualidade. Ter muitos AmpOps em paralelos pode ser um fardo para determinar falhas no circuito— se houver um AmpOp ruim dentre os 32, então provavelmente você terá bastante trabalho para desoldar para localizar o elemento defeituoso.

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.

II.2.5 O RELÉ DE SAÍDA E SEU CONTROLE

Conforme já mencionado, o relé de saída protege os alto-falantes contra falhas DC e dá uma partida suave (*Slow-On*), e um desligamento rápido (*Fast-Off*). Destarte, nenhum transiente é passado aos alto-falantes, tanto ao ligar o sistema, como ao desligá-lo. O relé é controlado pela fonte de tensão. Referindo-se à figura 2, ao se ligar a fonte de tensão, R_{17} carrega C_{24} suavemente, atrasando o ligamento do amplificador. Em funcionamento, C_{21} é carregado e T_3 é acionado. Quando a tensão AC é removida, C_{21} descarrega rapidamente, desligando T_3 , logo, diodo D_8 aciona os transistores T_4 e T_5 , os quais descarregam C_{24} e faz com que os contatos de saída do relé se abram imediatamente. Até mesmo uma breve interrupção na tensão AC, resulta num atraso do ligamento completo. Normalmente T_4 e T_5 estão inativos e D_{15} não conduz, mas se uma falha DC aplicar uma tensão positiva ou negativa via R_{13} ou R_{14} , T_4 e T_5 são acionados e os relés são abertos subitamente para proteger os alto-falantes.

II.2.6 FONTE DE TENSÃO

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.