

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

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  
16 DE OUTUBRO DE 2025

# SUMÁRIO

<b>I</b>	<b>Preliminares</b>	<b>4</b>
I.1	Amplificadores Operacionais . . . . .	4
<b>II</b>	<b>Resumo do projeto</b>	<b>5</b>
II.1	Sobre o projeto . . . . .	5
II.2	Um tour pelo design . . . . .	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 distorção<sup>1</sup> 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 impedância<sup>2</sup> de saída e à uma notável performance de ruído.

A fim de suplantar o desafio técnico de alimentar um alto-falante de  $8\Omega$  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  $500\Omega$ <sup>3</sup> 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  $8\Omega$ , caso o de  $4\Omega$  seja requerido, serão necessários duas vezes mais AmpOps, para fornecer o dobro de corrente demandada pela carga de  $4\Omega$  e, o mesmo se aplica ao modo de operação *Bridged*<sup>4</sup>.

O sistema foi desenvolvido de maneira modular, para abarcar os modos *Single-Ended*<sup>5</sup> e *Bridged*. Ademais, devido à sua modularidade é possível construir um amplificador estéreo<sup>6</sup> 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

---

<sup>1</sup>Embora intuitivo é necessário precisar tecnicamente o que é distorção em áudio.

<sup>2</sup>Outro conceito a ser precisado.

<sup>3</sup>Creio que este parâmetro é dependente do fabricante.

<sup>4</sup>Neste 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.

<sup>5</sup>A carga será conectada ao GND e a tensão de saída.

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

assim, a degeneração da bobina por aquecimento<sup>7</sup> e do cone por deformação contínua.

## 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 $\Omega$  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 CMRR<sup>8</sup>. Ele também usa resistores de valores muito menores, a saber, 802  $\Omega$  se comparado com os usados ordinariamente, *viz.* 10 k $\Omega$ , engendrando assim num ruído Jonhson<sup>9</sup> (*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 obtem uma distorção muito baixa distribuindo o ganho requerido sobre três estágios. Sabe-se que 22.7 dB poderia ser facilmente obtido com um

---

<sup>7</sup>Efeito Joule.

<sup>8</sup>Definir este conceito!

<sup>9</sup>É 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 Jonhson (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  $\Omega$  à temperatura  $T$  em Kelvin [ $T(t)$  K =  $(t + 273)$  °C] é na realidade dada pela expressão:

$$v_J(\text{rms}) = \sqrt{4kBR\Delta f} \quad V(\text{rms}),$$

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

único AmpOp. Não obstante, os NE5532s não estão completamente livre de distorção, e o THD (*Total Harmonic Distortion*) seria significativo.

O primeiro estágio (IC1A, IC1B) dá um ganho de 10.7 dB<sup>10</sup>; as duas saídas são combinadas por  $R_8$  e  $R_9$  engendrando uma vantagem de 3 dB<sup>11</sup>, 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 $\Omega$  do estágio de ganho final IC3B, de carregar a saída de IC2A, causando distorção. IC2B é menos vulnerável a cargas, porque ela tem uma retroalimentação negativa máxima.

Em IC3B, no pino 6, 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 seria resultados 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*<sup>12</sup> é mantido no mínimo, enquanto mantém estabilidade com carga

---

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

<sup>11</sup>Não entendi o porquê.

<sup>12</sup>O que é isso?



capacitiva<sup>13</sup>.

A saída em  $K_3$  está revertida em fase e pode ser usada para *Bridging*<sup>14</sup>.

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

---

<sup>13</sup>Isto está correto?

<sup>14</sup>???

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica**: Volume 1. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: McGraw-Hill Education, 1987.