

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Elétrica

ENG 04077 – Circuitos Eletrônicos I
Projeto2: Amplificador de Áudio

Prof. Hamilton Klimach

Prof. Raphael Brum

Prof. Tiago Balen

Prof. Gilson Wirth

Prof. Ivan Muller (elaborou o projeto original)

Revisão A2.2 – 2025/2

1. INTRODUÇÃO

Este projeto tem por objetivo agregar os conhecimentos sobre a eletrônica fundamental, que foram estudados ao longo do semestre, de forma a se desenvolver uma aplicação de uso comum no dia-a-dia: um amplificador para sinais áudio.

O amplificador aqui proposto é capaz de excitar um alto-falante de $8/4\ \Omega$ com até cerca de 5/10 W, quando alimentado em $\pm 12\text{ V}$ e caso as fontes suportem a corrente demandada. Ao final deste projeto, espera-se que o aluno:

- entenda como funciona um amplificador transistorizado multi-estágios, para aplicações em ‘áudio’;
- seja capaz de calcular a polarização dos transistores do amplificador;
- seja capaz de estimar analiticamente as características para ‘sinal’ do amplificador;
- seja capaz de construir um projeto simples, em placa de circuito impresso (PCB), colocando e ajustando os componentes e realizando sua soldagem;
- seja capaz de realizar testes DC e AC no circuito, conforme instruções;
- obtenha um amplificador com boa qualidade de áudio.

A PCB é fornecida pelos professores, uma por cada grupo de 2 alunos, e os componentes e material de montagem, incluindo ferramentas, devem ser providenciados pelos alunos. Estima-se que o custo do material de montagem fique próximo a R\$ 40,00.

Sugere-se que os alunos possuam, ao menos, as seguintes ferramentas de montagem de circuitos eletrônicos, e instrumentos:

- Soldador elétrico de 25 a 35 W, para estanho;
- Solda tipo estanho/chumbo (quanto mais estanho e menos chumbo, melhor);
- Alicates de bico e de corte rente;
- Chaves de fenda e Philips pequenas;
- Brocas para aço de 0,8 , 1,0 e 3,0 mm;
- Suporte para PCB, para uso durante a soldagem;
- Multímetro digital simples.

Lembre que as ferramentas básicas de montagem e testes serão utilizadas nos diversos projetos que serão desenvolvidos em outras disciplinas, ao longo do curso.

Por fim, recomenda-se a leitura integral deste documento ANTES do início da montagem. Se a montagem for realizada com **atenção, cuidado e capricho**, a possibilidade de sucesso na primeira tentativa é quase de 100%.

E um agradecimento especial ao Prof. Ivan Muller, por ter financiado a confecção das PCBs, nesta segunda versão do projeto.

2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO E PCB

A estrutura do amplificador proposto é apresentada na Fig. 1, na forma de diagrama esquemático.

Este circuito é composto por 3 estágios, associados em cascata, de forma a se obter as características necessárias à aplicação, que são:

- Entrada do tipo diferencial, facilitando o uso de “realimentação negativa”;
- Elevada impedância de entrada;
- Alto ganho de tensão diferencial, para a faixa de frequências de áudio;
- Baixa impedância de saída, compatível com um alto-falante de 4/8 Ω ;
- Capacidade de fornecer cerca de 5 a 10 W à carga (alto-falante de 4/8 Ω);
- Médio rendimento.

O sinal aplicado à entrada (INPUT) é desacoplado de tensão DC por C1, que define um ‘zero’ na origem e um ‘pólo’ em 1,6 Hz, garantindo que todas as frequências de áudio passem para a entrada do primeiro estágio amplificador (base de Q1). O resistor R12 evita que a entrada fique ‘em aberto’, quando nenhum sinal é aplicado.

O **primeiro estágio** é composto por um **par diferencial NPN** (Q1 e Q2) com polarização resistiva (R2), que foi escolhido por oferecer a possibilidade de uso de ‘realimentação negativa’ do tipo ‘amostra tensão e compara tensão’ (através da rede formada por R4-R3-C2), como forma de melhorar a linearidade do amplificador, e de reduzir sua resistência de saída (R_o). O capacitor C2 define um ‘zero’, que faz com que a taxa de realimentação aumente para DC, resultando um ganho realimentado próximo a ‘1’ nesta situação, de forma que a tensão de *off-set* do par diferencial não seja amplificada. O capacitor C2 foi calculado de modo que a frequência do primeiro pólo do amplificador, que delimita o início da banda de resposta ‘plana’, está em 1,6 Hz, garantindo uma ótima resposta para o espectro ‘grave’ do áudio. Só há um resistor de coletor no par diferencial (R8; o coletor de Q2 é conectado diretamente a +VPOS), porque a saída deste estágio é em modo-comum, através unicamente do coletor de Q1 (a corrente de coletor de Q2 não é usada). A polarização de base de Q1 é provida por R1 e de Q2, por R4.

O **segundo estágio** é um **emissor-comum** (Q3) PNP, que acrescenta ganho e desloca o nível de tensão DC do sinal para próximo a ‘zero’ (média das fontes +VPOS e -VNEG). A saída deste estágio é em corrente (coletor de Q3), e a polarização E-B de Q3 é provida pelo resistor R8 do estágio anterior.

O **terceiro estágio** é um **par complementar** (Q4-Q5), formado por dois transistores ‘darlington’ NPN e PNP ligados em configuração ‘coletor-comum’. Este estágio não acrescenta ganho de tensão ($A_{V3} \approx 1$), mas acrescenta alto ganho de corrente, de forma a possibilitar a excitação da carga com alta potência, drenando pouca corrente do estágio anterior. Os diodos (D1, D2 e D3) formam uma pré-polarização das junções entre B-E e E-B dos transistores de saída, reduzindo a distorção de *cross-over* deste estágio. Como há 4 junções em série entre as bases de Q4 e Q5 (ou B4 e B5) a distorção somente seria eliminada caso usássemos 4 diodos em série na polarização de base, ao invés dos 3 usados, mas isso aumentaria o risco de ‘avalanche térmica’. Assim se optou por aumentar a segurança do circuito, apesar de se deixar uma leve distorção residual. A corrente de polarização destes diodos circula por R5-R6, vinda pelo coletor de Q3.

Com os conhecimentos estudados na disciplina, é possível a análise em ‘pequenos sinais’ deste circuito e o cálculo de seu ganho de tensão a ‘laço aberto’ (A_{vo}) e a ‘laço fechado’ (A_{vf}), além das impedâncias de entrada (R_i) e de saída (R_o) do amplificador.

Os componentes R7 e C5 formam um filtro de saída, para a redução de interferências de alta frequência que possam entrar pelos cabos que vão ao alto-falante, prejudicando o comportamento do circuito, além de amortecer transientes do próprio circuito.

Os capacitores C6-C7-C8-C9 formam filtros de alimentação, que evitam que perturbações elétricas entrem pelos cabos de alimentação, ou saiam deles. Como os capacitores eletrolíticos (C8 e C9) têm resposta em frequência estreita, até alguns kHz apenas, usa-se em paralelo a estes, capacitores de poliéster metalizado (C6 e C7), cuja resposta em frequência pode chegar a alguns MHz.

Os resistores R10 e R11, em série com +VPOS e -VNEG, permitem que se observe o consumo de corrente do amplificador em funcionamento, através da medida da queda de tensão média nestes. Caso não seja possível a aquisição de resistores de 0,1 ohm, busque algum abaixo de 1,0 ohm. Se ainda não for possível, pode-se deixar sem estes resistores, mas elimina-se assim a possibilidade de medição da corrente das fontes. Deve-se remover estes ‘straps’ dos pinos JP5 e JP6, quando se quiser estimar a corrente consumida pelo amplificador em operação. Em operação ‘normal’, JP5 e JP6 devem estar fechados (com strap).

Por fim, o capacitor C4 forma uma compensação em frequência, que melhora a estabilidade do amplificador, quando realimentado. Este tipo de compensação em frequência de amplificadores multi-estágios realimentados é chamado de “compensação Miller”.

O conector CN1 é a entrada de sinal (do gerador de sinais ou de uma fonte qualquer, como a saída de áudio do seu smartphone). O conector CN2 é a saída do amplificador, que pode ser ligada a uma carga resistiva (para observação no osciloscópio, análise de linearidade, ganho, potência de saída, etc) ou a um alto-falante apropriado (de 4 ou 8 ohms). O conector CN3 permite a ligação das fontes de alimentação positiva (+VPOS) e negativa (-VNEG) de 12 V, além do referencial de ‘terra’ (GND).

O jumper JP1, quando aberto, insere um resistor em série entre a saída do primeiro estágio e a entrada do segundo, o que permite a estimativa das resistências de saída do primeiro estágio e de entrada do segundo. Em operação normal JP1 deve estar fechado (com strap).

Os jumpers JP2 e JP3 permitem a abertura do laço de realimentação negativa para AC (sinal), mantendo-se a realimentação para DC (polarização), de forma a se poder observar os efeitos da realimentação sobre o comportamento do amplificador. Em operação normal, JP2 deve estar fechado (com strap) e JP3 aberto (sem strap).

O jumper JP4 permite que se coloque em curto os 3 diodos de pré-polarização de Q4 e Q5, fazendo com que o par de saída distorça o sinal por *cross-over*, permitindo a observação deste efeito. Em operação normal, JP4 deve estar aberto (sem strap).

A Fig. 2 apresenta a PCB, em 3 vistas: componentes (esq.), cobre superior (centro) e cobre inferior espelhado (dir.).

Em condições de uso normal, os jumpers JP1, JP2, JP5 e JP6 devem ser mantidos em curto-circuito (strap inserido), e os jumpers JP3 e JP4 deve ser mantidos abertos (sem strap).

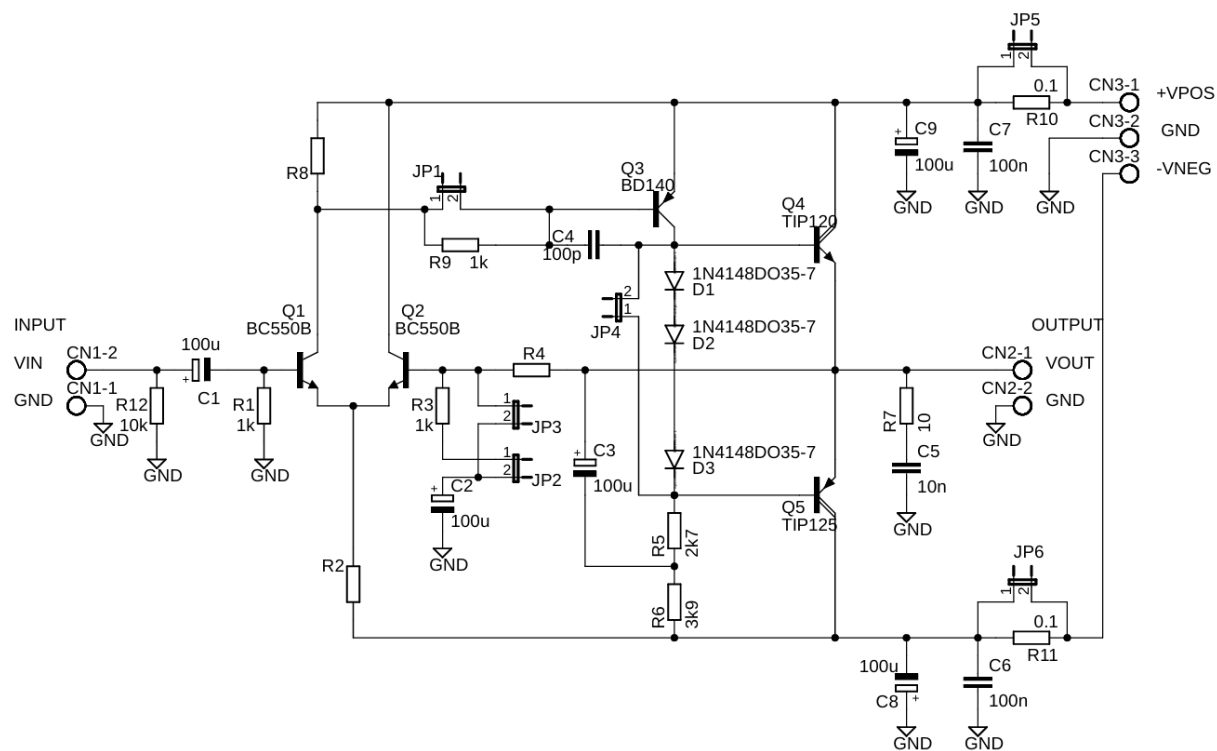


Fig. 1: Diagrama esquemático do amplificador.

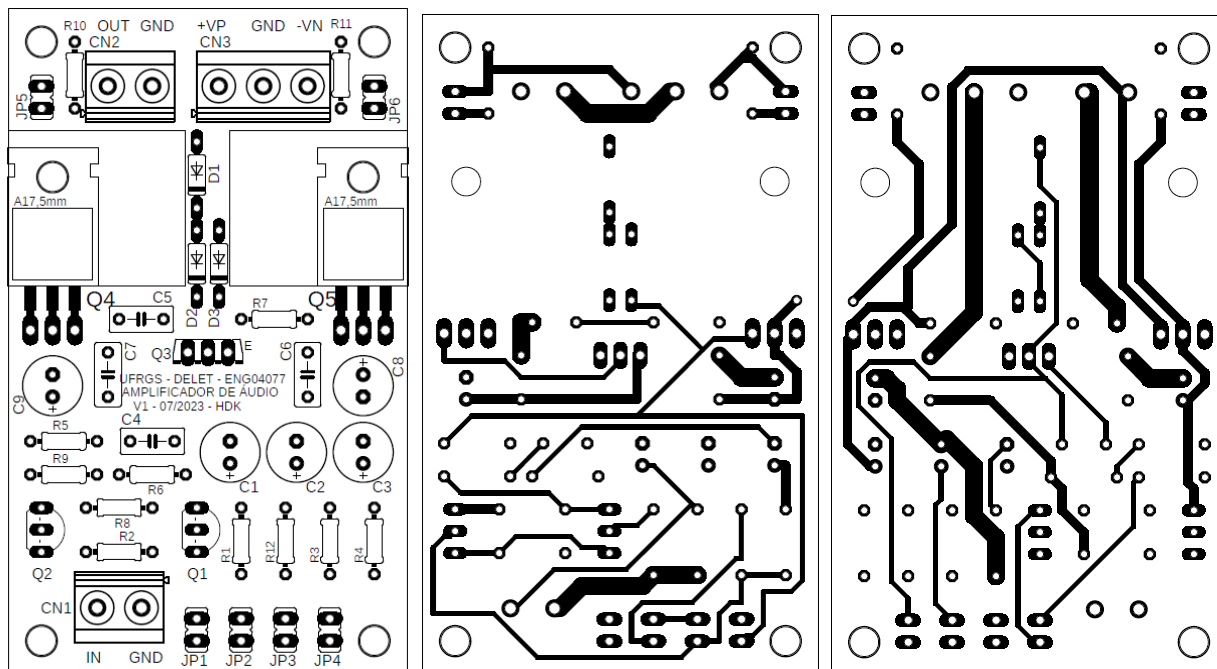


Fig. 2: PCB em 3 vistas: a posição dos **componentes** (esq.), o leiaute da **face superior** (centro) e **face inferior** espelhada (dir.).

3. ROTEIRO PARA CÁLCULO DE COMPONENTES

3.1 Projeto de R2 e R8 – Polarização de Q1, Q2 e Q3

Com a topologia do circuito amplificador dado, calcular os valores de R2 e R8 para definir o ponto quiescente do par diferencial, respeitando os limites de operação dos transistores dados abaixo.

Considere para o BC550 (consulte o manual): $I_{C\text{MAX}} = 100 \text{ mA}$; $I_{C\text{MIN}} = 1 \text{ }\mu\text{A}$; $P_{\text{MAX}} = 500 \text{ mW}$ e $V_{\text{BE}} = 600 \text{ mV}$.

Inicialmente, supõe-se que os transistores BC550 e BD140 estarão sempre ativos.

R2: supor que o par diferencial está perfeitamente equilibrado e que sua corrente na base é desprezível (implicando $V_{B1} = V_{B2} \approx 0 \text{ V}$), de forma que a corrente que passa por R2 é dividida igualmente entre os dois transistores. Aconselha-se uma corrente de coletor $I_{CQ1,2}$ da ordem de **1 mA para Q1 e Q2** (observe que a corrente em R2 é o dobro disso). Defina o valor comercial mais próximo para R2 e calcule a corrente $I_{CQ1,2}$ resultante.

$$R_2 = \frac{-V_{BE1,2} - (-V_{\text{NEG}})}{2 \times I_{CQ1,2}} = \frac{-0,6\text{V} + 12\text{V}}{2 \times 1\text{mA}} = 5,7\text{k}\Omega \rightarrow \begin{cases} R_{2\text{com}} = 5,6\text{k}\Omega \\ I_{CQ1,2} = 1,02\text{mA} \end{cases}$$

R8: calcule o valor de R8 que fornecerá a tensão V_{EB3} adequada para a operação de Q3. Isso garantirá o equilíbrio do par diferencial, quando o circuito for realimentado. Para isso, considere $V_{EB3} = 600 \text{ mV}$, despreze a corrente na base do Q3, resultando a relação $R8 \approx V_{EB3}/I_{CQ2}$. Ajustes no valor de R8, para se chegar a um valor comercial, apenas causarão um pequeno desequilíbrio entre as correntes do par diferencial, que será compensado pela realimentação.

$$R_8 = \frac{V_{EB3}}{I_{CQ2}} = \frac{0,6\text{V}}{1,02\text{mA}} = 589\Omega \rightarrow R_{8\text{com}} = 560\Omega$$

3.2 Projeto de R3 – Ajuste de Ganho Realimentado

Este amplificador opera sob realimentação negativa, a qual é formada pelos resistores R3 e R4, junto com o capacitor C2.

Considerando-se a situação onde o amplificador opera com sinal de áudio, C2 foi calculado para que sua reatância seja desprezível na faixa de frequências do áudio, de forma que este capacitor pode ser desprezado para a realimentação sob sinal (considera-se como se C2 fosse um “curto-circuito para o sinal”).

A análise deste amplificador pode ser simplificada como se o amplificador inteiro estivesse representado pelo bloco amplificador diferencial da Fig. 3, com duas entradas, estando a rede resistiva de realimentação conectada entre uma das entradas (inversora) e a saída do amplificador. Neste diagrama, considera-se que V_{in} é a entrada do amplificador (base de Q1 para sinal), V_1 é a base de Q2 e V_{out} é a saída conectada em CN2. Observe que C2 foi calculado de forma que sua reatância é desprezível na faixa de frequências do sinal, fazendo que para a faixa de áudio um dos terminais de R3 esteja praticamente aterrado.

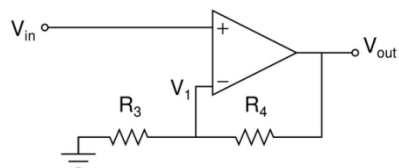


Fig. 3: Modelo simplificado do amplificador realimentado.

Se considerarmos que a impedância das entradas do amplificador diferencial (bases de Q1 e de Q2) é elevada, podemos supor que as correntes nos resistores R3 e R4 são aproximadamente iguais.

Também, se considerarmos que o ganho de tensão do amplificador diferencial $A_{vo} = V_{out}/V_{dif}$ é muito alto, a diferença $V_{dif} = V_{in} - V_1$ resultará pequena, podendo ser desprezada (se V_{dif} é desprezível, então $V_{in} \approx V_1$). Considere que V_{out} está limitado a valores dentro da faixa de alimentação do amplificador diferencial.

Por exemplo, se a alimentação é $\pm 12\text{ V}$, a saída V_{out} está limitada a este valor máximo. E se o ganho diferencial for $A_{vo} = 1.000$ (valor fácil de se atingir com dois estágios), a tensão diferencial de entrada V_{dif} seria, no máximo, 12 mV, que é um muito valor pequeno, podendo ser desprezado frente às tensões de operação do circuito. E sendo V_{dif} desprezível, pode-se considerar válida a aproximação $V_{in} \approx V_1$.

Nesta condição, pode-se equacionar as correntes nos resistores:

$$(V_{out} - V_1)/R_4 \approx V_1/R_3 \rightarrow (V_{out} - V_{in})/R_4 \approx V_{in}/R_3$$

Onde, isolando-se o ganho final $A_{VF} = V_{out}/V_{in}$, resulta:
$$A_{VF} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

Por fim, usando esta expressão, projete o valor comercial do resistor **R4**, para que o ganho sob realimentação negativa do amplificador seja $A_{VF} \approx 40$.

$$R_4 = (A_{VF} - 1) \times R_3 = (40 - 1) \times 1k\Omega = 39k\Omega$$

3.3 Simulação

Simule no MicroCap o ponto quiescente e o ganho do amplificador, com os valores de resistores escolhidos, verificando se estes parâmetros estão próximos aos escolhidos.

Realize simulações das atividades que serão medidas a seguir, antes da parte experimental, de modo a já saber o comportamento e os valores a serem esperados.

Sugestões:

- Encontre a expressão do ganho diferencial $A_{vo} = V_{out}/V_{dif}$ do amplificador para “pequenos sinais”, através dos modelos para pequenos sinais dos transistores e dos dados de manual, considerando como entradas de sinal as bases de Q1 e Q2 (pontos V_{in} e V_1 da Fig. 3).
- Com o ganho acima calculado, estime a amplitude do sinal diferencial que deveria ser aplicada entre V_{in} e V_1 para que se tivesse na saída um sinal senoidal de 20 Vpp.

4. MATERIAIS

4.1 Lista de materiais

Abaixo, a tabela com a lista e materiais necessários para a manufatura do amplificador:

Qtde.	Ref. Des.	Descrição	Observações
3	D1, D2, D3	1N4148 ou 1N914	Diodo para sinal
6	JP1 a JP6	Pares de pinos para jumper (2x6 pinos a 90°)	Barra dupla 90° 2,54mm com 2x6 pinos (preferência), ou barra simples com mais de 12 pinos (Fig. 4a)
2	Q1, Q2	BC550 (ou BC549/548/547/546)	Transistor NPN – sinal
1	Q3	BD140 (ou BD138/136)	Transistor PNP – driver
1	Q4	TIP122 (ou TIP120/121)	Darlington de potência NPN
1	Q5	TIP127 (ou TIP125/126)	Darlington de potência PNP
5	C1, C2, C3, C8, C9	Capacitor 100 uF / 25V ou mais	Eletrolítico radial
1	C4	Capacitor 100 pF	Disco cerâmico ou Plate
1	C5	Capacitor 10 nF / 25V ou mais	Poliéster
2	C6, C7	Capacitor 100 nF / 25V ou mais	Poliéster
3	R1, R3, R9	Resistores 1 k Ω - 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência)
1	R2	Resistor 5,6 k Ω - 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência)
1	R4	Resistor 39 k Ω - 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência)
1	R5	Resistor 2,7 k Ω - 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência)
1	R6	Resistor 3,9 k Ω - 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência)
1	R7	Resistor 10 Ω - 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência)
1	R8	Resistor 560 Ω - 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência)
2	R10, R11	Resistor 0,1 Ω 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência). Se não achar o valor pedido, procure valor menor que 1 Ω
1	R12	Resistor 10 k Ω - 1/8W a 1/4W	Tamanho mini (preferência)
2	CN1, CN2	Bornes KRE 2 vias com parafusos	Conector (Fig. 4b)
1	CN3	Borne KRE 3 vias com parafusos	Conector (Fig. 4c)
2		Dissipador de calor pequeno	16 x 27,5 x 15 mm (Fig. 4e)
6		Jumper ou ‘strap’ de configuração – encaixa em um par de pinos	Ver Fig. 4d
2		Parafuso M2,5 ou M3 por 10 mm com porca	Fixação dos dissipadores
1		Resistor 10 Ω 10W (ou mais)	Carga R _L para os testes
1		Plug P2 estéreo com cabo coaxial de 30 ou 40 cm	Conexão à saída de áudio do smartphone (Fig. 4f)

4.2 Imagens de alguns componentes



Fig. 4a – Pinos para Jumpers: **barra dupla 90° 2,54mm com 2x6 pinos (preferência)**, esq., e ou barra simples com mais de 12 pinos (dir.)



Fig. 4b - Borne KRE 2



Fig. 4c – Borne KRE 3



Fig. 4d– Jumpers/straps



Fig. 4e – Dissipador 16x27,5x15



Fig. 4f – Plug P2 estéreo

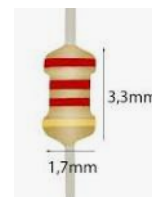


Fig. 4g – Resistor Mini

Fig. 4: Imagens de componentes utilizados no projeto.

5. MONTAGEM

Para realizar a montagem do circuito, utilize:

- a PCB fornecida;
- os componentes calculados e os demais da lista de materiais;
- ferro de soldar de 25 a 40 W (mantenha a ponta fina e limpa!);
- solda estanho/chumbo 63/37;
- suporte para PCBs;
- alicates de bico e corte, e outras ferramentas auxiliares.

Antes de iniciar a montagem:

- observe a PCB e identifique a posição dos componentes do circuito sobre ela;
- verifique se todos os componentes entram nos furos e faça os ajustes necessários;
- meça com o multímetro os resistores, diodos, transistores e capacitores, para ter certeza de que são os corretos ou estão funcionando corretamente.

Faça primeiro os furos nos dissipadores, para sua fixação na PCB com broca 3 a 3,5 mm. Fure os dissipadores de forma a centralizar os transistores no local onde serão montados. Passe a lima para remover rebarbas.

SOLDAGEM: após inserir um componente em sua posição definitiva, pela face a ser soldada (geralmente a inferior, mas nesta PCB os pinos de jumpers serão soldados pela superior):

- encoste a ponta do soldador simultaneamente na ilha e no terminal a ser soldado;
- aguarde 1 ou 2 segundos;
- encoste a solda no mesmo ponto;
- a solda deve derreter e escorrer no terminal e na superfície da ilha;
- verifique se a soldagem ficou com boa qualidade ANDES de soltar o próximo terminal.

Realize a montagem na seguinte ordem, inserindo os componentes nas suas posições e soldando com cuidado:

1. **pinos de jumpers JP1 a JP6:** devem ser pressionados em seus furos e soldados POR CIMA, pois o fabricante da PCB fez furos insuficientes para que os pinos atravessem;
2. **resistores:** se não forem os de tamanho ‘mini’, você deve verificar cada um deles, se entra nos furos (que estão justos) e dobrar os terminais rente ao corpo de cada resistor;
3. **capacitores** (CUIDADO COM A POSIÇÃO!);
4. **diodos** (CUIDADO COM A POSIÇÃO!);
5. **transistores Q1, Q2 e Q3** (CUIDADO COM A POSIÇÃO!);
6. **conectores CN1, CN2 e CN3.**

Verifique com muito cuidado se todos os componentes estão na posição correta antes de soldá-los. Se um componente for soldado na posição errada, é muito difícil removê-lo e isso pode destruir a PCB.

Por fim, dobre os terminais de Q4 e Q5 em 90°, observando a posição em que ficarão soldados na PCB, e os insira nas suas posições sobre os dissipadores, fixando os dois conjuntos com os parafusos e suas porcas. Faça o alinhamento dos conjuntos, de modo que os dissipadores não se toquem, e não toquem qualquer nó do circuito. Solde os terminais destes transistores e corte os excessos. **Muito cuidado para que os terminais destes transistores não encostem nos dissipadores!**

Faça agora uma revisão visual da montagem, verificando se está tudo correto, se todos os componentes estão na posição certa, se as soldas estão bem feitas e não provocam curtos-circuitos indesejados.

Você pode usar uma escova plástica (escova de dentes) na face das soldas, com álcool isopropílico, para limpar o fluxo e a resina que restaram.

As seguintes fotografias mostram a sequência de montagem e soldagem dos componentes.

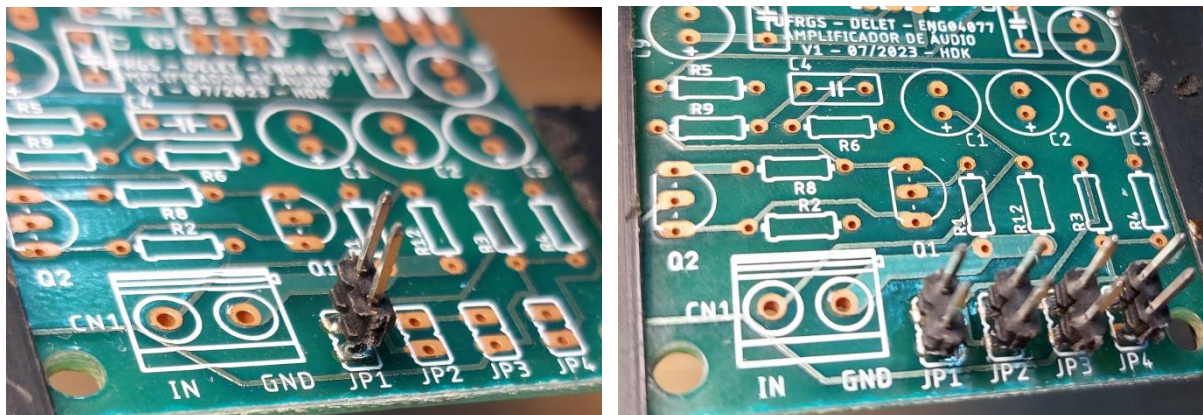


Fig. 5: Fotos da sequência de montagem dos componentes: pinos para jumpers.

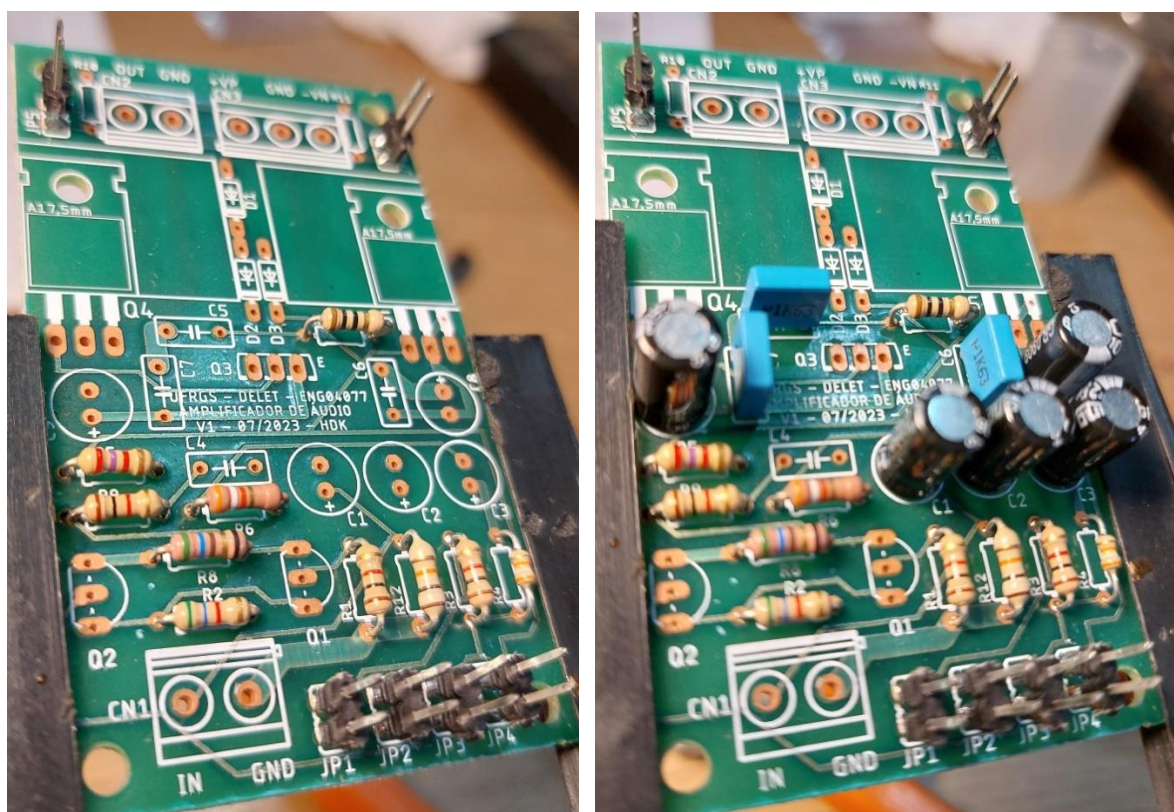


Fig. 6: Fotos da sequência de montagem dos componentes: resistores e capacitores.

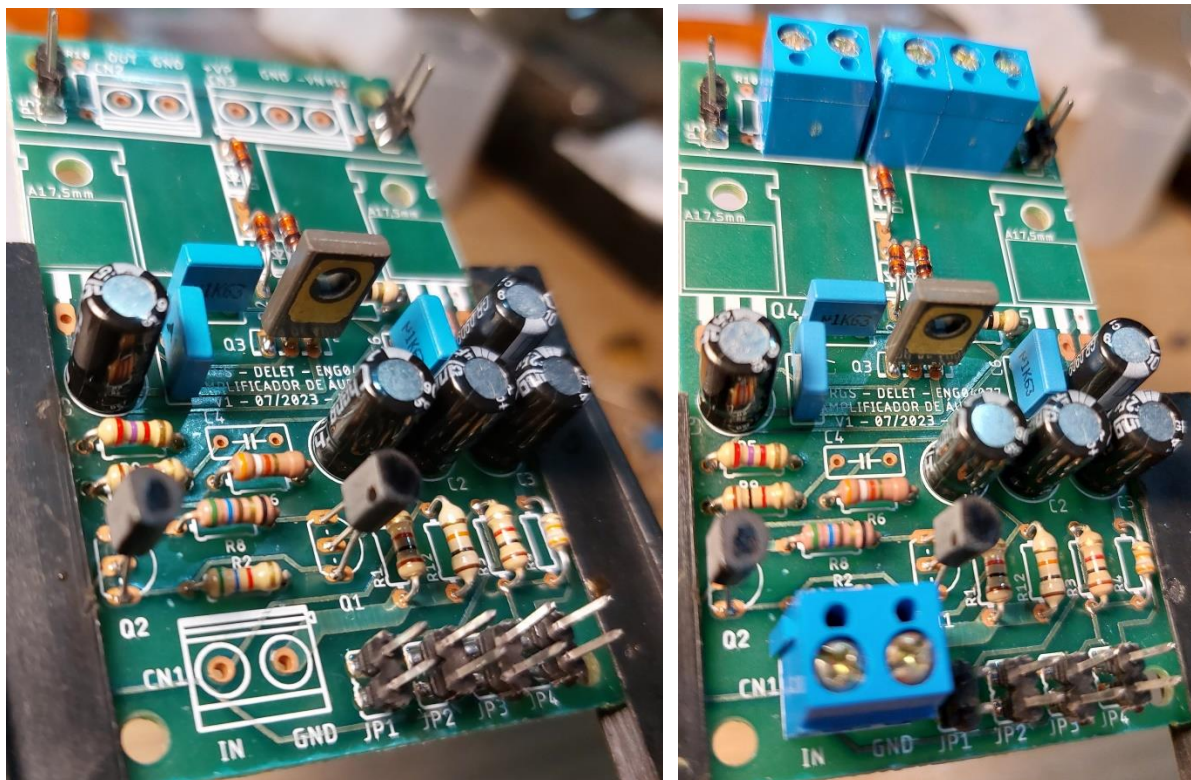


Fig. 7: Fotos da sequência de montagem dos componentes: transistores, diodos e conectores.

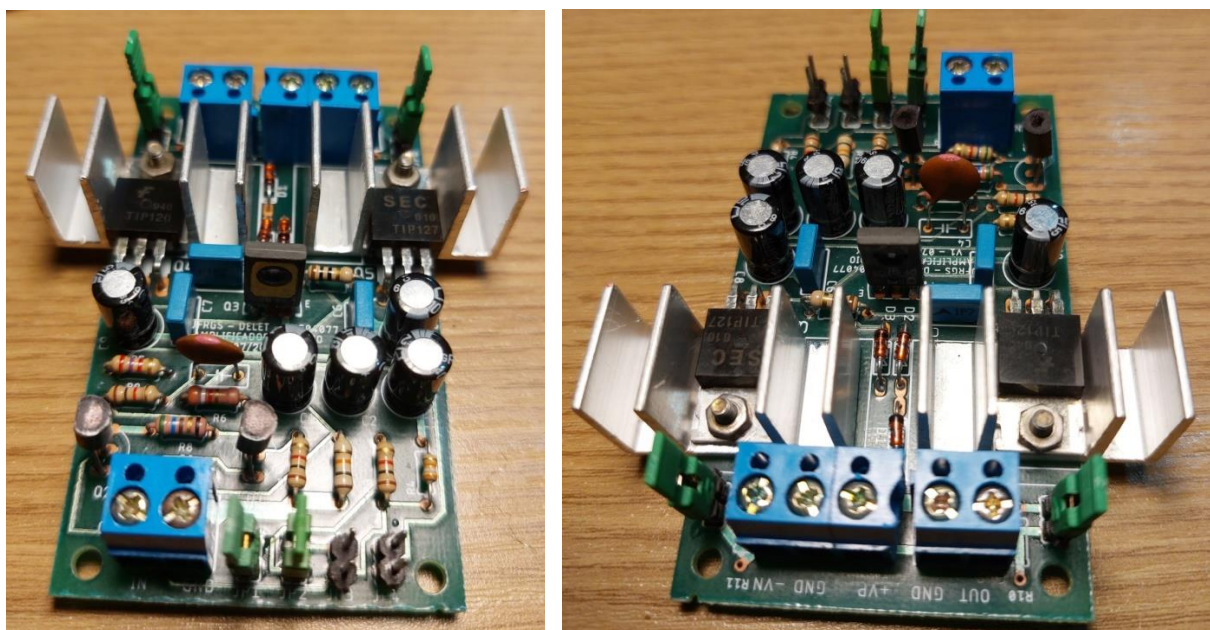


Fig. 8: Fotos da PCB concluída, com os transistores darlington e dissipadores.

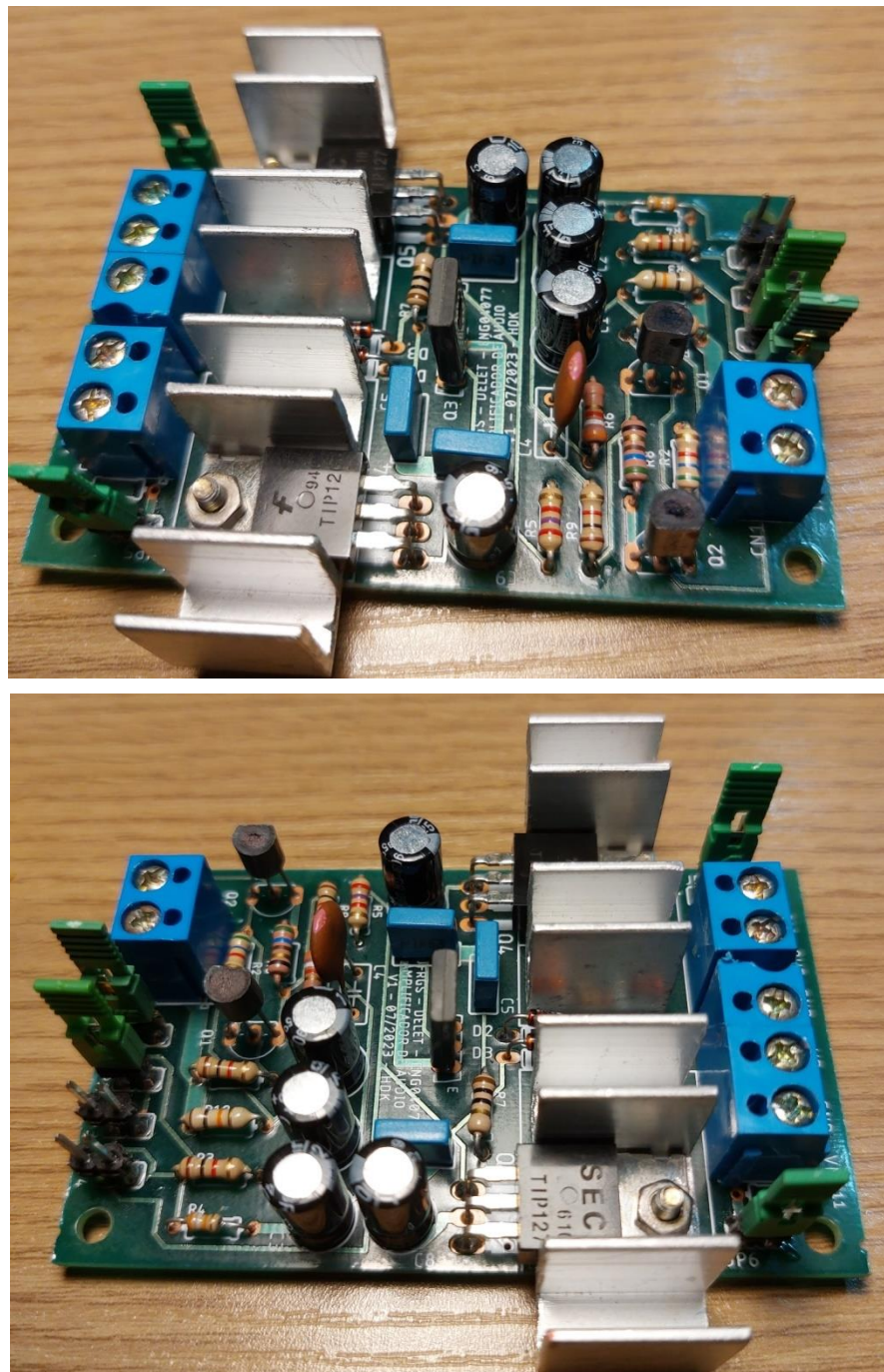


Fig. 9: Fotos da PCB concluída.

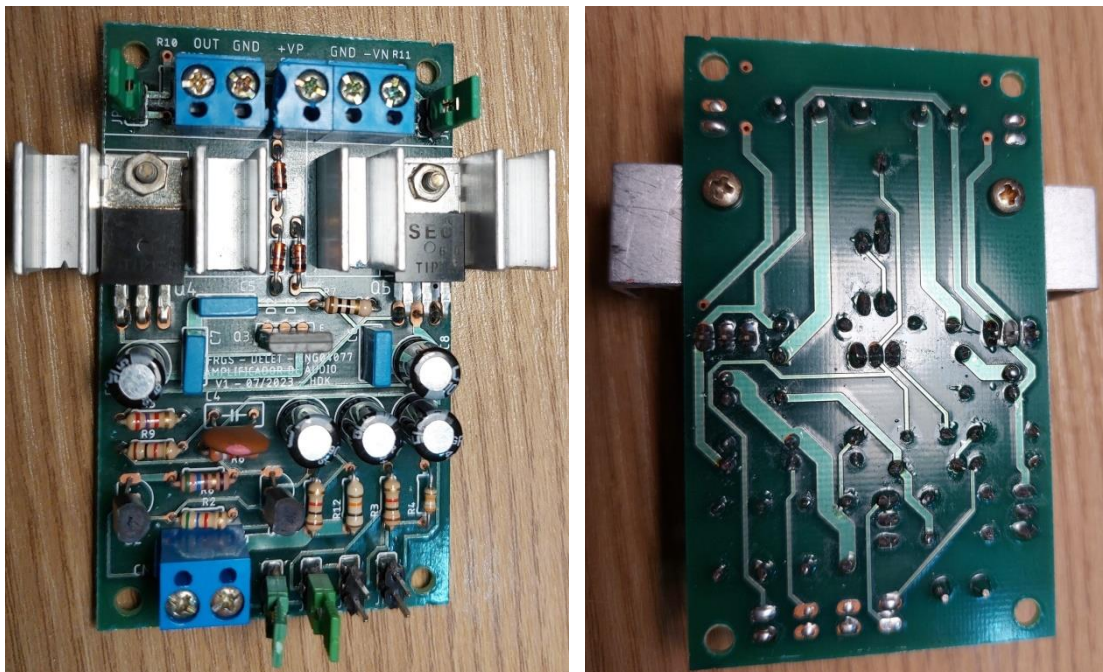


Fig. 10: Foto mostrando o amplificador montado.

Verifique se os parafusos estão bem fixados, e se os dissipadores não se movem. O aspecto final da montagem é apresentado na Fig. 10.

Parabéns, você acabou de montar o amplificador!

6. TESTES

6.1 Equipamentos

Para realizar os testes do amplificador, serão necessários os seguintes equipamentos e materiais:

- Multiteste;
- Gerador de funções;
- Fonte de alimentação simétrica variável;
- Osciloscópio;
- Carga resistiva de $10\Omega/10W$ (providenciem!).

Obs.: se você quiser fazer testes com música, leve para o laboratório um bom alto-falante ou caixa de som com fios de 4 a 8Ω e que suporte ao menos 40W, e um cabinho coaxial com plug P2 estéreo numa das pontas (para inserir na saída de áudio do seu smartphone).

6.2 Conectores e jumpers

Os conectores e jumpers disponíveis na PCB são descritos abaixo:

- CN1: entrada de sinal.
- CN2: saída de sinal, amplificado.
- CN3: conector de alimentação simétrica (CUIDADO PARA NÃO INVERTER A POLARIDADE!!!)

- JP1: sem o strap, acrescenta R9 entre a saída do primeiro e a entrada do segundo estágios.
- JP2: com strap, liga C2 em série com R3, definindo o ganho AC do amplificador.
- JP3: com strap, liga C2 diretamente à entrada inversora do amplificador, eliminando R3, permitindo a medida do ganho a laço aberto do amplificador.
- JP4: jumper para teste de distorção de *cross-over*; deverá estar aberto para operação normal.
- JP5 e JP6: jumpers para medição de corrente de alimentação, que deverão estar fechados para operação normal.

6.3 Testes DC

Após a montagem ter sido concluída, faça uma inspeção visual cuidadosa e verifique novamente o seguinte, marcando o check-list.

- ☐ Todos os componentes estão montados e estão nas posições corretas? Nenhum capacitor eletrolítico, diodo ou transistor foi montado ao contrário?
- ☐ Os dissipadores estão montados adequadamente? Não há contato entre eles? Os parafusos estão bem fixados?
- ☐ Os conectores e pinos de jumpers estão bem soldados?
- ☐ Todas as soltas estão bem feitas? Não existem curtos-circuitos?
- ☐ JP1, JP2, JP5 e JP6 estão inseridos?
- ☐ JP3, JP4 estão abertos?

Antes de iniciar os testes, **calcule as tensões e correntes DC que devem ser esperadas** em todos os nós e componentes do circuito, quando nenhum sinal for aplicado, e anote no esquemático.

Ajuste com cuidado as fontes de alimentação para $\pm 12\text{ V}$ **antes de conectá-las ao seu amplificador**. Agora, ligue os cabos de alimentação ao conector CN3, com CUIDADO para não inverter os 3 fios.

Ligue a fonte de alimentação e com o voltímetro DC meça as tensões nos pinos do conector CN3 e certifique-se que estão corretas. Se estiver usando os resistores R10 e R11, abra os jumpers JP5 e JP6 e meça as quedas nestes resistores, estimando as correntes drenadas das fontes positiva e negativa e compare com os seus cálculos. Observe também se nenhum componente está exageradamente quente.

$+V_{\text{POS}}$	$-V_{\text{NEG}}$	$V_{R10} \text{ (V)}$	$V_{R11} \text{ (V)}$	$I_{\text{POS}} \text{ (mA)}$	$I_{\text{NEG}} \text{ (mA)}$

Se estiver tudo certo, recoloque os jumpers JP5 e JP6 e meça as tensões DC nos seguintes pontos de teste e anote:

V_{B1}	V_{B2}	$V_{E1} = V_{E2}$	$V_{C1} = V_{B3}$	V_{EB3}	V_{B4}	V_{B5}	V_{OUT}

Os valores estão de acordo com o que foi calculado? Caso não estejam, desligue a fonte e verifique novamente se há algum erro de montagem.

Se tudo parecer correto, ligue a carga resistiva de $10\Omega/10W$ ao conector de saída CN2 e verifique novamente todas as tensões medidas e as correntes drenadas das fontes.

Se tudo estiver certo após estas medidas, desligue a alimentação, recoloque os jumpers JP5 e JP6 e passe para os testes com sinal (AC).

6.4 Testes AC

Após realizados os testes DC com sucesso, com o amplificador alimentado, os jumpers conectados como dito em 6.3, e com a carga resistiva de $10\Omega/10W$ ligada à saída CN2, passe para os testes com sinal.

Usando o gerador de funções, aplique um sinal senoidal de 1 kHz com 100 mVpp de amplitude à entrada CN1.

Ligue os dois canais do osciloscópio, CH1 à entrada (Vin) e CH2 à saída (Vout) do amplificador e observe. Aumente a amplitude do sinal do gerador até que o sinal em Vout seja máximo, sem distorção por *overdrive*.

Observe se o sinal de saída apresenta distorções ou deformações. Verifique se sua amplitude está de acordo com o esperado, em função do ganho projetado (≈ 40).

Varie a frequência do sinal entre 100 Hz e 10 kHz e observe se a amplitude se mantém a mesma na saída.

Verifique novamente se nenhum componente está exageradamente quente. Se tudo parecer correto, passe para as medidas de desempenho do seu amplificador.

6.4.1 Medidas de amplitudes, ganho, consumo, potência e rendimento

Na frequência de 1 kHz, meça a amplitude pp dos sinais de saída e de entrada e calcule o ganho de tensão de seu amplificador realimentado $A_{VF} = V_{out}/V_{in}$. O ganho está de acordo com o que foi projetado?

Aumente a amplitude do sinal do gerador, até perceber distorções de *overdrive* na saída (ceifamentos). Esta é a máxima amplitude que seu amplificador pode oferecer a uma carga sem distorção. Calcule a máxima potência que ocorre sobre a carga de $10\Omega/10W$ sem distorção. Qual a máxima potência que será aplicada a um alto-falante de 8Ω com esta amplitude? E a um alto-falante de 4Ω ?

Se estiver usando os resistores R10 e R11, abra os jumpers JP5 e JP6 e meça as correntes drenadas das fontes positiva e negativa. Verifique o efeito de ajustes na amplitude do sinal sobre a corrente consumida. Anote as correntes consumidas com sinal Vout em 3 situações: Vout máximo, Vout = 10 Vpp e Vout = 1 Vpp. Note que o consumo de potência depende da amplitude do sinal de saída (potência de saída).

Na situação em que o amplificador opera com a **máxima potência de saída** possível e sem distorção, calcule seu rendimento:

$$\eta\% = 100\% \times P_{out}/P_{CC} = 100\% (V_{outRMS}^2/R_L)/(V_{POS} \times I_{POS} + V_{NEG} \times I_{NEG})$$

Após, recoloque os jumpers JP5 e JP6.

6.4.2 Medidas de faixa de frequências de operação

Ajuste a amplitude do sinal a 1 kHz de forma a obter na saída um sinal com 2 Vpp. Reduza a frequência do sinal de entrada até que a saída caia para o valor de 70% do valor a 1 kHz. Esta é a mínima frequência de operação do seu amplificador f_{\min} . Agora aumente a frequência até que novamente o sinal de saída caia para 70% do que era a 1 kHz. Esta é a máxima frequência de operação de seu amplificador f_{\max} .

Observe se entre os limites f_{\min} e f_{\max} a saída se manteve aproximadamente constante. Isso significa que seu amplificador tem resposta “plana” entre estes dois limites. Os amplificadores frequentemente têm resposta em frequência (curva ganho vs frequência do sinal) como mostrado na Fig. 11, com resposta aproximadamente ‘plana’ entre os limites de frequência mínima e máxima (ω_1 e ω_2). Estes limites são definidos quando o ganho cai 3dB, o que representa cerca de 0,7 ou $1/\sqrt{2}$. Um amplificador para uso em áudio deve ter uma faixa de resposta plana entre 20 Hz e 20 kHz, ou maior.

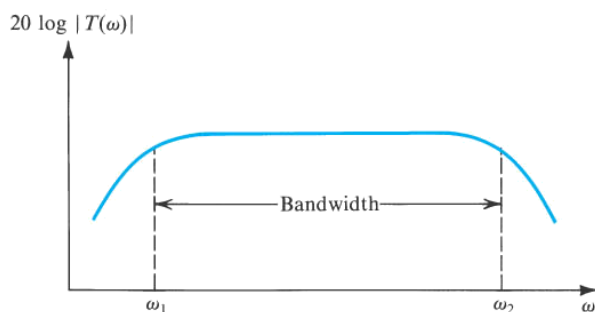


Fig. 11: Diagrama de resposta em frequência típico de um amplificador.

6.4.3 Medidas de distorção de cross-over

Ajuste o gerador para 20 kHz, com a saída tendo cerca de 4 Vpp. Com o osciloscópio mostrando a saída senoidal, coloque o jumper JP4 (que coloca os diodos em curto-circuito, eliminando a pré-polarização de Q4 e Q5) e observe se ocorre distorção de *cross-over* na saída.

6.4.4 Medida do ganho do estágio 2

Estas medidas são difíceis de serem realizadas, pois o amplificador tem ganho muito elevado sem realimentação e talvez você não consiga realizá-las.

Com o amplificador em funcionamento e o osciloscópio mostrando a saída senoidal, ajuste o gerador em 1 kHz, de modo a observar o maior sinal de saída sem distorção.

Agora, com CH1 no modo AC, observe a base de Q3 (onde está JP1) e meça a amplitude do sinal neste ponto. O ganho do segundo estágio é aproximadamente $A_{V2} = v_{out}/v_{b3}$.

6.4.5 Medida do ganho do estágio 1

Remova o strap de JP1 e coloque o strap de JP3. Reajuste o gerador de modo a obter na saída Vout o maior sinal possível, sem distorção, com 1 kHz.

Tente medir os sinais na entrada (gerador) e no coletor de Q1 (pino 1 de JP1). A razão entre estas amplitudes é o ganho do estágio 1, ou $A_{V1} = v_{c1}/v_{in}$.

O ganho total do seu amplificador, sem o efeito da realimentação negativa, é o produto dos dois ganhos obtidos anteriormente.

6.4.6 Medidas com áudio e alto-falante

Recoloque JP1 e remova JP3. Os straps JP2, JP5 e JP6 devem estar inseridos. JP4 deve estar removido.

Remova da saída do seu amplificador a carga resistiva e ligue um alto-falante de 4 ou 8 Ω que suporte ao menos 40 W.

Aplique o sinal senoidal do gerador à entrada do amplificador e observe com o osciloscópio se o sinal de saída está correto. Ouça seu amplificador funcionando com sinais senoidais.

Varie a frequência do gerador e a amplitude do sinal e perceba como o som é modificado. Observe quando o sinal de saída começa a ter distorção por *overdrive* e perceba como o som é modificado. Aplique o jumper JP4 com estes sinais e verifique como ocorre a distorção por *cross-over*.

Por fim, use um cabo coaxial com conector P2 estéreo em uma das pontas e aplique à entrada do amplificador o sinal de saída de um smartphone. Ouça a qualidade sonora do seu amplificador.

Se quiser, utilize dois amplificadores com alto-falantes iguais ligados às saídas L e R do conector de áudio do seu smartphone para ter uma reprodução em estéreo.

E se quiser incrementar mais ainda seu projeto, poderia incluir um módulo de interface Bluetooth, e fazer uma caixa de som com recepção através da interface Bluetooth do seu smartphone.

7. VERSÃO COM PCB DE FACE SIMPLES

Se quiser, utilize dois amplificadores com alto-falantes iguais ligados às saídas L e R do conector de áudio do seu smartphone para ter uma reprodução em estéreo.

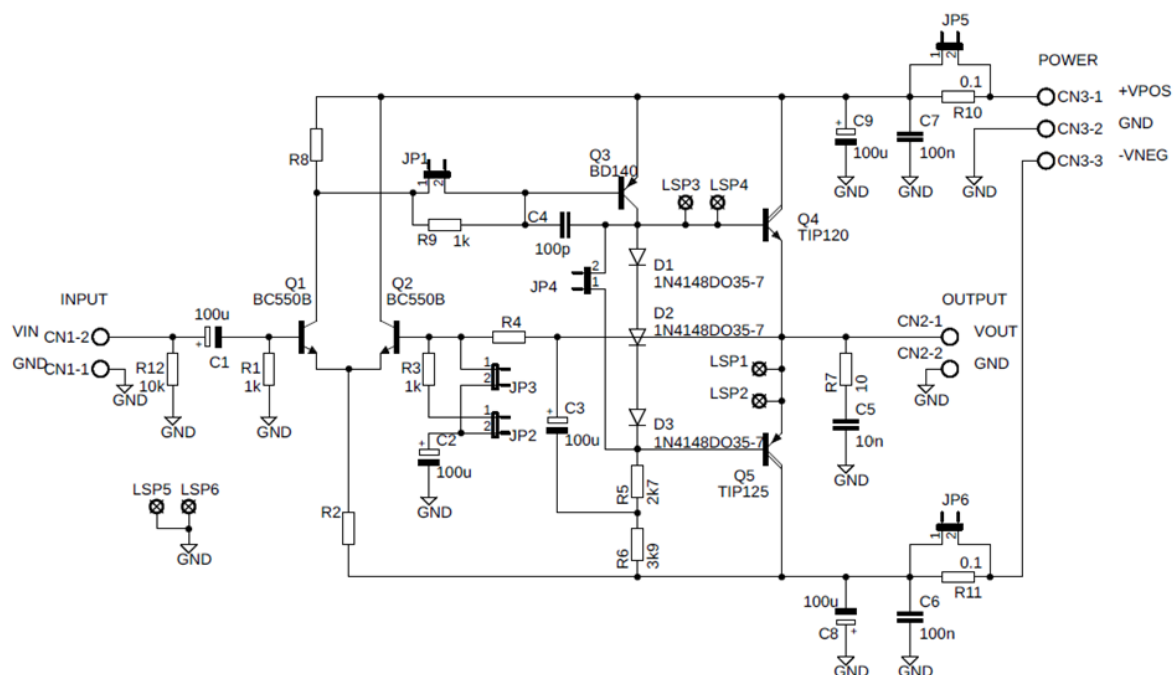


Fig. 12: Diagrama esquemático do amplificador.

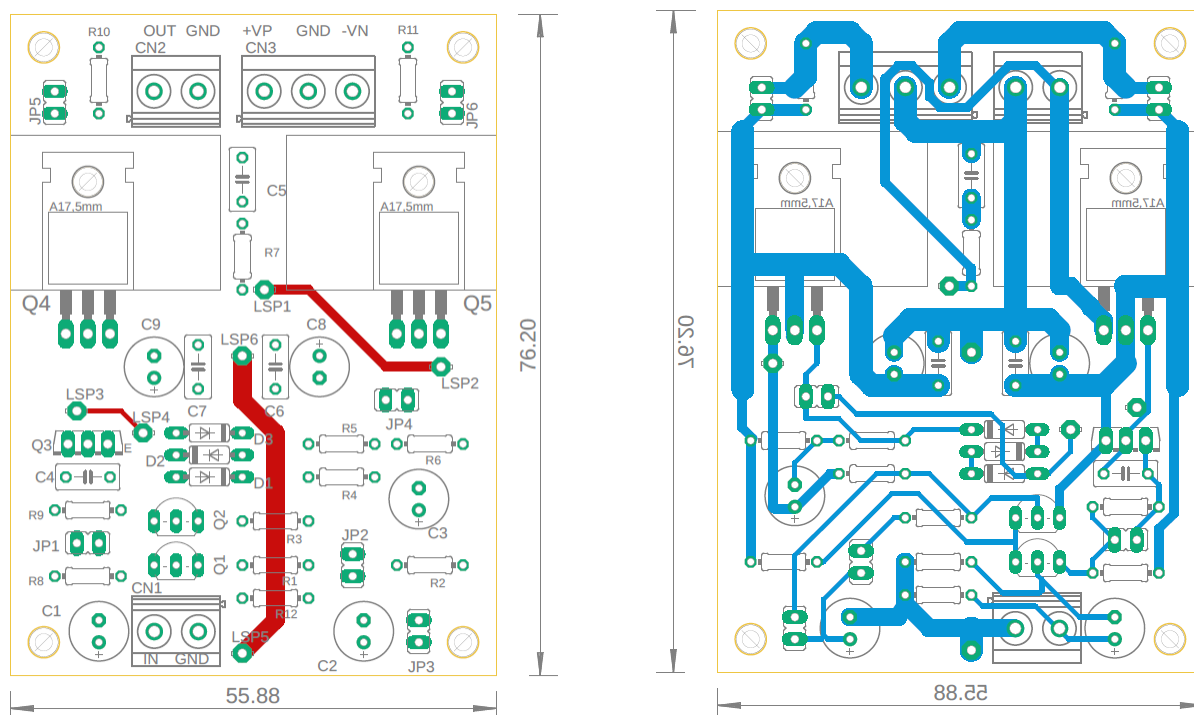


Fig. 13: Leiaute da PCB em frente (esq.) e verso (dir.).

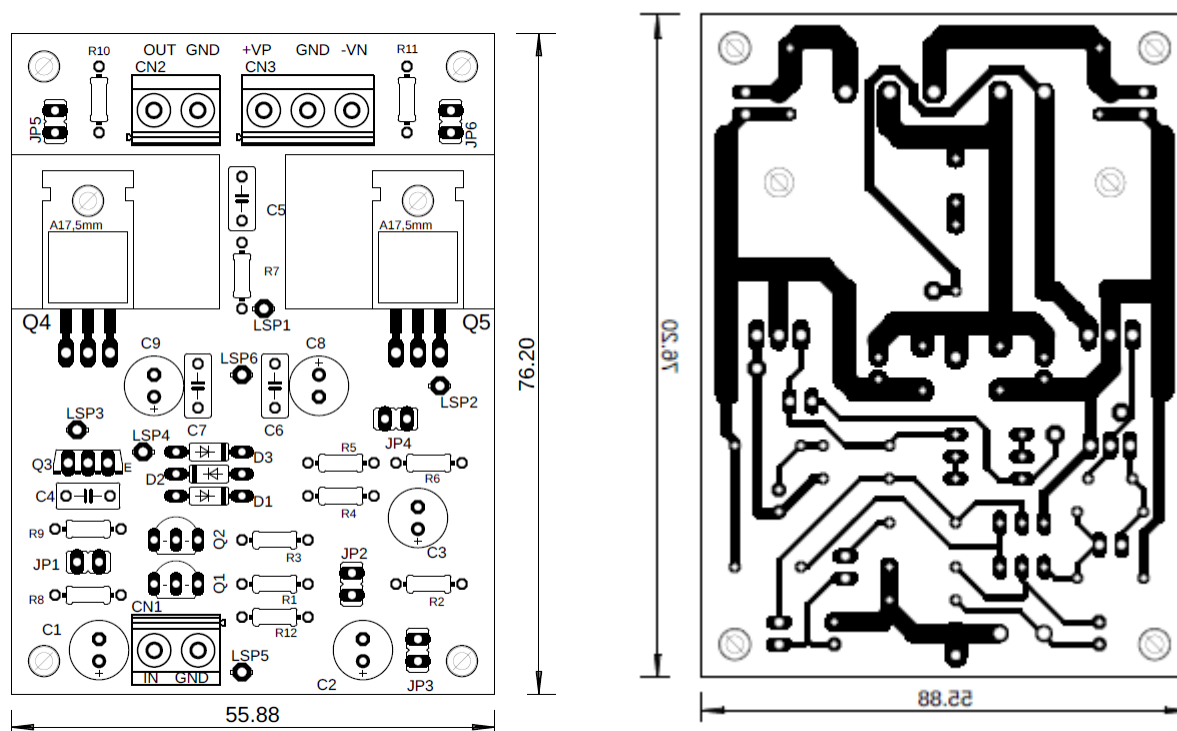


Fig. 14: Posição dos componentes (esq.) e leiaute do verso da PCB (dir.), em tamanho real, para confecção.

A Fig. 13 apresenta a versão ‘face simples’ da PCB, em frente (esq.) e verso (dir.). No desenho frontal se pode ver os componentes e suas posições. As 3 trilhas em vermelho são de fato FIOS, que devem ser soldados, fechando curto-circuitos nas ilhas correspondentes: LSP1-LSP2, LSP3-LSP4, LSP5-LSP6, e são necessários porque a PCB é face única.

A Fig. 14 mostra a PCB em frente e verso em P&B e em tamanho real, sendo a imagem da direita adequada à reprodução em placa virgem, para corrosão com percloro de ferro.

Em condições de uso normal, os jumpers JP1, JP2, JP5 e JP6 devem ser mantidos em curto-circuito (strap inserido), e os jumpers JP3 e JP4 deve ser mantidos abertos (sem strap).