

Amplificador de Áudio

Celso Uberti, Joel Zeni, Vinicius Gasperin

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

Campus Universitário da Região dos Vinhedos
Centro de Ciências Exatas, da Natureza e Tecnologia
Curso de Engenharia

Alameda João Dal Sasso, 800

95700-000 – Bento Gonçalves – RS – Brasil

e-mails: cjuberti@ucs.br, jlzeni1@ucs.br, vlgasperin@ucs.br

RESUMO

O relatório apresenta a construção de um amplificador de áudio classe AB, tendo como objetivo obter a potência de 10 Watts RMS com uma impedância de saída de 8 Ohms. O circuito deve ser transistorizado, para assim haver total aplicação do estudo desenvolvido na disciplina de eletrônica analógica ministrada pelo professor Rodrigo Porto. No estágio de amplificação será utilizado um amplificador emissor-comum, e a entrada de sinal será padronizada de áudio (nível de linha). Serão descritos no trabalho todo o processo de montagem e cálculos e é claro, os problemas encontrados.

Palavras Chave: engenharia, transistores, amplificadores, potência, impedância.

1. OBJETIVOS

Projetar um amplificador de áudio de 10 Watts RMS, que poderá ser utilizado em diferentes aplicações. Colocar em prática todo conteúdo abordado em aula teórica e provar que são realmente eficientes e práticos.

2. INTRODUÇÃO

É amplificador o equipamento eletrônico que a partir de um pequeno sinal colocado na sua entrada, fornece na sua saída este sinal ampliado e adequado ao funcionamento de algum equipamento.

A função básica de um amplificador é simples: Amplificar. Mas são tão variados os equipamentos que precisam da sua amplificação e também tantos os tipos de falantes que precisam de sua alimentação, que se torna indispensável conhecer melhor a Potência, como é vulgarmente chamado, para poder ao final se estabelecer um equilíbrio entre preço e desempenho para a aplicação que se deseja.

O tipo de amplificador mais comum é o eletrônico, comumente usado em transmissores e receptores de rádio e televisão, equipamentos estéreo de alta fidelidade (high-fidelity ou hi-fi), microcomputadores e outros equipamentos eletrônicos digitais, e guitarras e outros instrumentos musicais elétricos. Seus componentes principais são dispositivos ativos, tais como válvulas ou transistores.

Quando leigos refere-se a amplificadores, normalmente estão falando de componentes estéreos ou equipamentos musicais. E é justamente este tipo de amplificador que será aqui projetado.

O som é um fenômeno fascinante. Quando algo vibra na atmosfera, move as partículas de ar à sua volta. Essas partículas, por sua vez, movem outras partículas de ar à sua volta, carregando a vibração pelo ar. Nossos ouvidos captam essas alterações na pressão do ar e as transformam em sinais elétricos processados pelo cérebro.

Um amplificador de áudio ideal deve possuir no mínimo três estágios. O estágio inicial denominado par diferencial, que prevê a amplificação com baixo ruído e alta impedância de entrada não será abordado, pelo tempo necessário para execução do projeto ser pequeno. Abordaremos apenas o estágio intermediário que é o coração do amplificador e o estágio de potência.

O estágio de amplificação é onde acontece a amplificação do sinal de entrada da ordem de milivolts para ordem de volts, utilizando um amplificador emissor comum com um ganho de tensão necessário para o fornecimento de 10W na saída e que receba a tensão de linha padrão na entrada, que é por volta de 200mVpp. O último estágio, o par complementar, consiste na elevação da corrente de trabalho e no abaixamento da impedância de saída para uma impedância próxima a da carga de 8Ω, denominado também estágio de potência.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A proposta estabelecida pelo do professor foi a montagem um amplificador de classe AB com potência de 10W RMS e impedância de saída de 8 Ohms. Com essas especificações já é possível fazer uso dos cálculos desenvolvidos em aula.

Na figura 2 pode ser visto a diferença entre as classes A, B e AB:

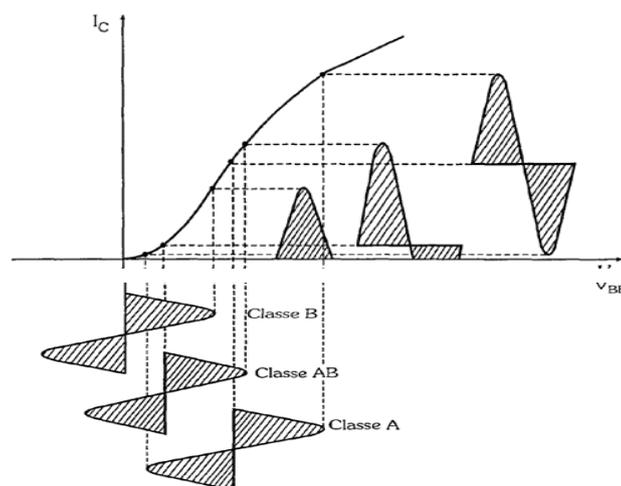


Figura 2. Comparação das classes de amplificação em classe A, B e AB

O amplificador de classe AB tem um funcionamento essencialmente como o de classe B mas com uma característica do de classe A. Vejamos, por isso, primeiro a diferença entre as classes A e B.

Nos amplificadores de classe A, o transistor está polarizado de forma que o ponto de funcionamento em repouso se encontra no meio das características de saída (região ativa). Por isso produz pouca distorção, pois as variações do sinal de entrada são igualmente amplificadas em torno do ponto de repouso. Tem, no entanto, um inconveniente que é de ter um baixo rendimento, devido ao facto de existir corrente de coletor mesmo quando o sinal de entrada é nulo.

Nos amplificadores de classe B o ponto de repouso não está no meio das características (região ativa) mas sim na zona de corte. Por isso, a corrente de coletor em repouso é zero e também a potência. Só é consumida potência quando existe sinal de entrada, o que faz aumentar o rendimento em relação aos amplificadores de classe A. Além

disso, como o ponto de funcionamento em repouso está no limite inferior das curvas características de saída, permite amplificação de sinais de maior amplitude que nos de classe A, pois nestes últimos, sinais de grande amplitude produzem distorção por atingirem as zonas de corte e de saturação. No entanto, na classe B só são amplificados metade dos ciclos do sinal de entrada, os positivos ou os negativos (consoante se trate de transístores npn ou pnp) pois, estando o ponto de funcionamento em repouso na zona de corte, o outro semiciclo é cortado. Além disso, devido também a esta posição do ponto de funcionamento em repouso, existe uma distorção de *crossover*. Esta distorção resulta do facto de a curva de corrente-tensão da junção pn base-emissor do transístor não ser, como se sabe linear, principalmente na zona em que a tensão base-emissor é pequena. Para tensões maiores a curva aproxima-se de uma recta. Com esta classe ganhou-se em rendimento e na possibilidade de amplificar sinais de maior amplitude e perdeu-se na maior distorção. O facto de só serem amplificados os meios ciclos resolve-se com dois transístores. Quanto à distorção de *crossover* pode diminuir-se com a classe AB.

Os amplificadores de classe AB funcionam de forma semelhante aos de classe B mas, para se minimizar aquela distorção, polariza-se a junção base-emissor como se faz na classe A, mas com um valor inferior (para não ter o problema referido de baixo rendimento) e próximo da zona de corte, mas acima dela para evitar a zona da característica da junção base-emissor que origina a distorção de *crossover* por falta de linearidade. Obtém-se assim um sinal amplificado com menos distorção que na classe B e mais rendimento que na classe A. Em relação ao ângulo de fase correspondente à amplificação, na classe A, como se disse, todo o sinal é amplificado (360°), na classe B apenas metade do ciclo o é (180°) e a classe AB corresponde a uma situação intermédia em que é amplificado mais que meio-ciclo e menos que um ciclo (entre 180° e 360°).

O tipo de classe apresentado no desenvolvimento do trabalho será a classe AB.

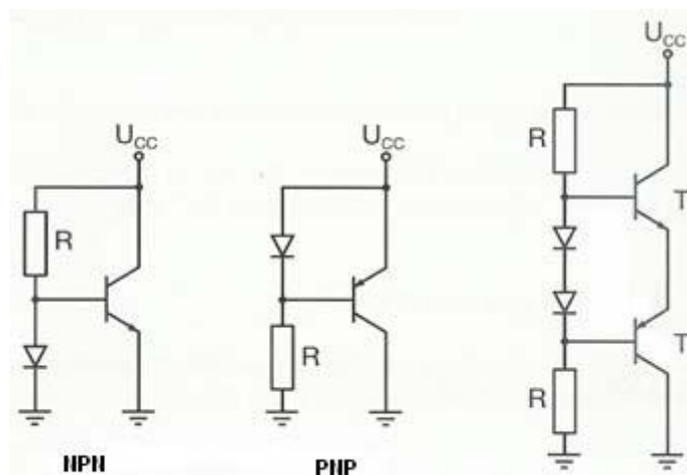


Figura 3. Amplificador em classe AB polarizado por díodos

Os esquemas da figura anterior representam circuitos designados para que não ocorra a tão indesejada distorção, em que o da esquerda utiliza um transistor NPN e o do meio um PNP. Se a característica dos díodos for idêntica à característica de cada díodo emissor, então a corrente que circula no díodo de polarização é aproximadamente igual à corrente de emissor do transistor. Assim, conhecendo a tensão de alimentação ficamos a conhecer a queda de tensão na resistência R, pelo que podemos determinar a corrente que circula no díodo e assim, saber a corrente de coletor, considerando-a aproximadamente igual à corrente de emissor.

Para manter o ponto Q o mais estável possível, por vezes podem ser utilizados dois díodos de polarização, como se apresenta na figura 2 (à direita). Este processo tem um inconveniente pelo fato de ser difícil encontrar díodos com as mesmas características dos díodos emissores dos transistores, mas tem a vantagem de se evitar deriva térmica. No entanto, é possível utilizar dois transistores ligados como se indica na figura 4 a funcionar como díodos. Se os transistores de polarização tiverem as mesmas características que os transistores do push-pull, garantem a mesma corrente nos dois ramos.

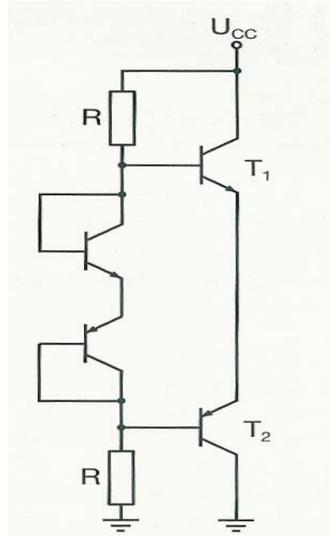


Figura 4. Amplificador em classe AB polarizado por transistores

A deriva térmica pode originar a destruição dos transistores por excessiva corrente de coletor. Analisemos o que sucede:

Quando U_{BE} aumenta devido ao aumento de temperatura, a corrente I_C também aumenta. A informação dada pelo fabricante indica que a corrente de coletor pode aumentar 10 vezes para um aumento de 60 mV do U_{BE} . Como o aumento da temperatura implica um aumento de corrente, que origina novo aumento de temperatura, pode ser perigoso e destruir o transistor.

Por isso que, por vezes, é necessário utilizar dissipadores de calor para este tipo de circuitos. Este efeito é designado por deriva térmica, que se pode resumir utilizando a seguinte simbologia:

$$T \uparrow \Rightarrow U_{BE} \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow T \uparrow$$

Não construímos dissipadores para os nossos transistores, simplesmente utilizamos dissipadores de outros circuitos, tendo em vista que não haveria tanto aquecimento no nosso projeto. Porém, não deixamos de monitorar.

O projeto do amplificador deve ser realizado de traz para frente, por isso, começa-se ao calculo a partir do par complementar, ou estágio de potência.

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$V = 8,94V$$

$$V_{op} = 8,94V \times 1,41 = 12,65V_p$$

Ou seja 25,3Vpp.

É preciso uma fonte de alimentação CC de no mínimo 25,3V para obter o valor de 12,65V de pico sobre a carga, no entanto para evitar a saturação, irá se trabalhar com a alimentação de 40V (+20/-20V).

$$P_d = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} = 5,06W$$

$$P_{dmax} = \frac{2 V_{op}^2}{\pi^2 R_L} = 4,05W$$

$$I_{op} = \frac{V_{op}}{R_L} = 1,58A$$

$$P_s = \frac{2 V_{op}}{\pi R_L} V_{CC} = 20,13W$$

$$\eta = \frac{P_l}{P_s} = \frac{10}{20,13} = 49,7\%$$

Inicialmente foram utilizados transistores do tipo TIP142 e TIP147, porém a fonte de bancada não suportava a corrente fornecida, então tivemos que utilizar um componente com ganho menor e potência ainda alta.

Para isso será utilizado os transistores TIP41 e TIP42 para amplificação neste estágio.

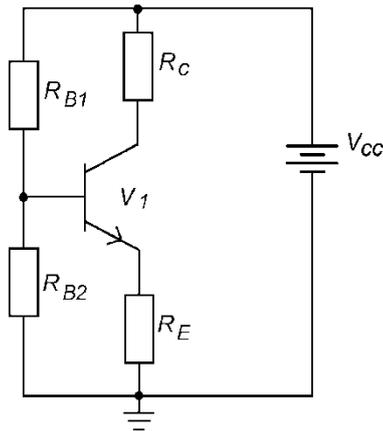
Electrical Characteristics <small>T_C=25°C unless otherwise noted</small>					
Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
V _{CE0(sus)}	* Collector-Emitter Sustaining Voltage : TIP41 : TIP41A : TIP41B : TIP41C	I _C = 30mA, I _B = 0	40 60 80 100		V V V V
I _{CEO}	Collector Cut-off Current : TIP41/41A : TIP41B/41C	V _{CE} = 30V, I _B = 0 V _{CE} = 60V, I _B = 0		0.7 0.7	mA mA
I _{CES}	Collector Cut-off Current : TIP41 : TIP41A : TIP41B : TIP41C	V _{CE} = 40V, V _{EB} = 0 V _{CE} = 60V, V _{EB} = 0 V _{CE} = 80V, V _{EB} = 0 V _{CE} = 100V, V _{EB} = 0		400 400 400 400	µA µA µA µA
I _{EBO}	Emitter Cut-off Current	V _{EB} = 5V, I _C = 0		1	mA
h _{FE}	* DC Current Gain	V _{CE} = 4V, I _C = 0.3A V _{CE} = 4V, I _C = 3A	30 15	75	
V _{CE(sat)}	* Collector-Emitter Saturation Voltage	I _C = 6A, I _B = 600mA		1.5	V
V _{BE(sat)}	* Base-Emitter Saturation Voltage	V _{CE} = 4V, I _C = 6A		2.0	V
f _T	Current Gain Bandwidth Product	V _{CE} = 10V, I _C = 500mA	3.0		MHz

* Pulse Test: PW≤300µs, Duty Cycle≤2%

A - Análise CC de amplificadores

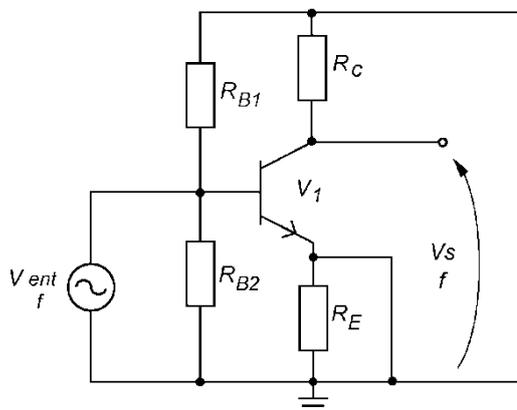
A análise CC consiste em determinarmos o ponto quiescente (Q) do circuito. Para isto, todos os capacitores são retirados do circuito, pois para CC a reatância capacitiva é elevadíssima. Determinar o ponto Q do circuito significa calcular os valores de I_b , I_c e V_{ce} do transistor.

Deste modo, o circuito equivalente para CC do amplificador apresentado anteriormente passa a ser o mostrado a seguir.

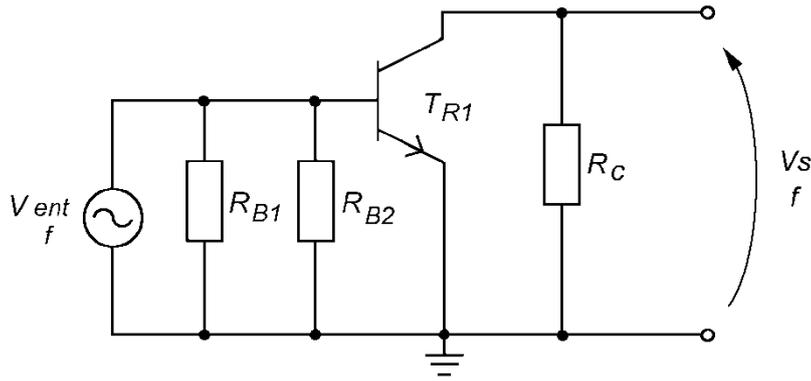


B - Análise CA de amplificadores

A análise CA consiste em determinarmos as impedâncias e os ganhos do amplificador. Para isto todos os capacitores e fontes de alimentação CC são curto-circuitados, pois, para CA, a reatância capacitiva e a impedância da fonte CC são baixíssimas.



Redesenhando o circuito, o modelo equivalente para CA do amplificador mostrado anteriormente passa a ser o mostrado a seguir.



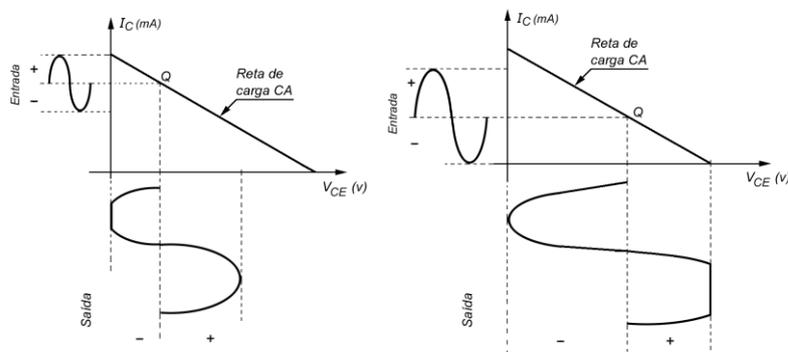
Na análise CA, devemos calcular os valores dos ganhos, de tensão (A_V ou G_V), de corrente (A_I ou G_I) e de potência (A_P ou G_P) e das impedâncias de entrada (Z_{ent}) e de saída (Z_S).

Alguns outros fatores devem ser levados em consideração para início de projeto do estágio de amplificação.

Na configuração emissor comum se sabe que a resistência de saída é igual a resistência de coletor, então

$$R = 120k$$

Sabe-se também que V_p de saída deve ser 12,65V, para que o sinal de entrada seja amplificado sem distorção na saída é necessário que as variações se restrinjam à região ativa. Caso a amplitude do sinal abranja as regiões de corte e/ou de saturação, na saída teremos o ceifamento (distorção) do semi-ciclo positivo e/ou negativo da senóide amplificada.



Então:

$$V_p = V_{CEQ} = 12,65V$$

Como a tensão de saída deve ser em torno de 12,65V_p e a tensão de linha padrão de entrada de amplificadores é 100mV, temos que o ganho deve ser aproximadamente:

$$A_v = \frac{12,65}{100m} = -126,5 \quad (\text{Característica inversora})$$

Para obtenção dos valores ideais dos resistores a serem utilizados no projeto inicia-se os cálculos com as retas de cargas AC e DC.

$$KAC = \frac{1}{(RC // RL) + RE_{\text{bypass}}}$$

$$KAC = \frac{1}{(120k // 120k) + 150} = 16,625\mu$$

Será utilizado um resistor de emissor sem capacitor de by-pass para diminuirmos o ganho.

$$i_c = i_{c\text{sat}} - KAC \times V_{ce}$$

Através da equação acima se consegue a corrente quiescente do transistor que é 0,21mA.

$$ICQ = 2ICQ - 16,625\mu \times 12,65$$

$$ICQ = 0,21 \text{ mA}$$

Com o ICQ conseguimos obter o valor de KDC.

$$ICQ = IC_{\text{sat}} - KDC \times V_{CEQ}$$

$$0,21\text{m} = \frac{40}{R_{\text{etaDC}}} - KDC12,65$$

$$0,21\text{m} = 40KDC - KDC12,65$$

$$KDC = 7,68\mu$$

Com estes valores já podemos traçar as retas de carga.

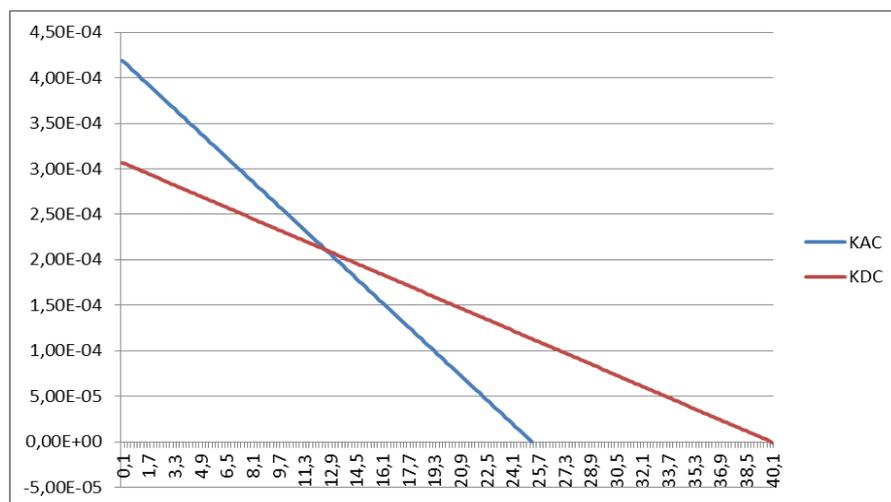


Figura 6. Retas de carga

A equação da reta KDC pode-se ser descrita como:

$$KDC = \frac{1}{RC + RE_{\text{bypass}} + RE_{\text{bypass}}}$$

$$7,68u (120150 + RE_{\text{bypass}}) = 1$$

$$RE_{\text{bypass}} = 10k$$

Precisamos agora polarizar R1 e R2, iniciamos então calculando a tensão sobre RE:

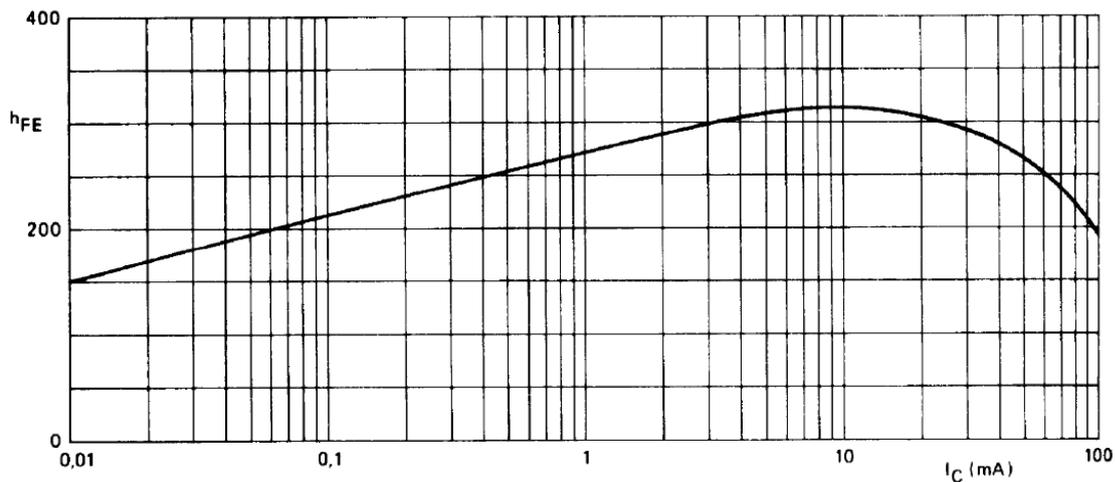
$$VE = 0,21m \times (10k + 150) = 2,13V$$

Considerando uma queda de tensão Base-Emissor de 0,6V temos:

$$VB = 2,13 + 0,6 = 2,73V$$

O transistor utilizado no estágio de amplificação será o BC548. Este transistor tem uma característica de variação de hfe com a corrente quiescente.

Temos que hfe é aproximadamente 240 para $I_c = 0,21mA$.



$$R2 < 0,1 \times 241 \times 10k = 241k$$

Percebeu-se uma melhor eficiência com o resistor de 330k, provavelmente devido às variações de hfe. Portanto $R2 = 330k$.

Para o calculo de R1 sabe-se que:

$$R1 = \frac{VCC - VB}{VR2} \quad R2 = \frac{40 - 2,73}{2,73} 330k = 4M5$$

Para um resistor comercial, tem-se $R1 = 4M7$.

Agora é necessário o cálculo de hie , para obtenção do ganho. Hie se dá por:

$$hie = \frac{26m}{\frac{Ic}{B}} = \frac{26m}{\frac{0,21m}{240}} = 29714,28 \Omega$$

Agora tem-se o ganho através de :

$$Av = \frac{-B(RC // RL)}{hie + RE \text{ ñ bypass}(B + 1)} = \frac{-240(120k // 120k)}{29714,28 + 150(241)} = -218$$

Pode-se calcular também a impedância de entrada através de:

$$Rin = R1 // R2 // (hie + RE \text{ ñ bypass}(B + 1))$$

$$Rin = 330k // 4M7 // 65,86k = 52,21k\Omega$$

O próximo passo é efetuar os cálculos dos capacitores (utiliza-se como frequência de corte 100Hz):

$$Ci > \frac{1}{2\pi \times 100 \times (Rin)} \times 10 = 1\mu F$$

$$Co > \frac{1}{2\pi \times 100 \times (RC + RL)} \times 10 = 1\mu F$$

$$CE > \frac{1}{2\pi \times 100 \times (RE // \frac{hie}{240 + 1})} = 47\mu F$$

Então tem-se o esquemático do circuito final.

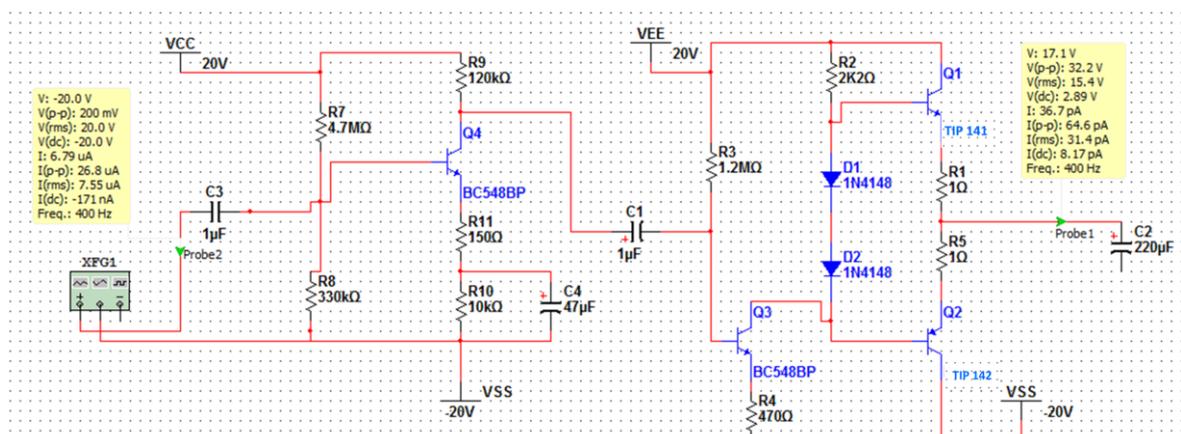


Figura 7. Circuito final sem carga

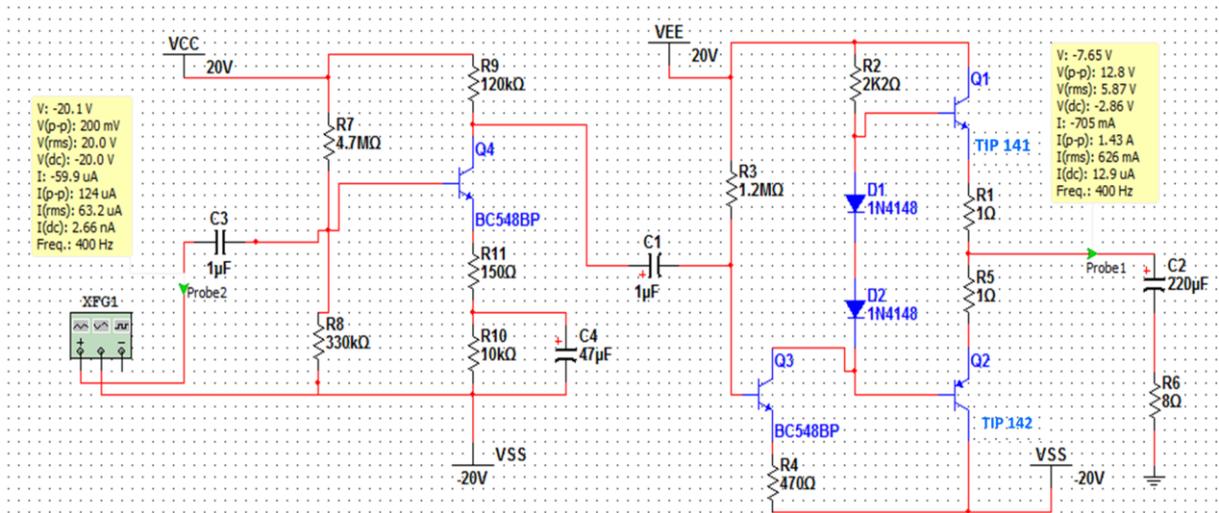


Figura8. Circuito final com carga

Com o projeto desenvolvido, o montamos em uma Protoboard.

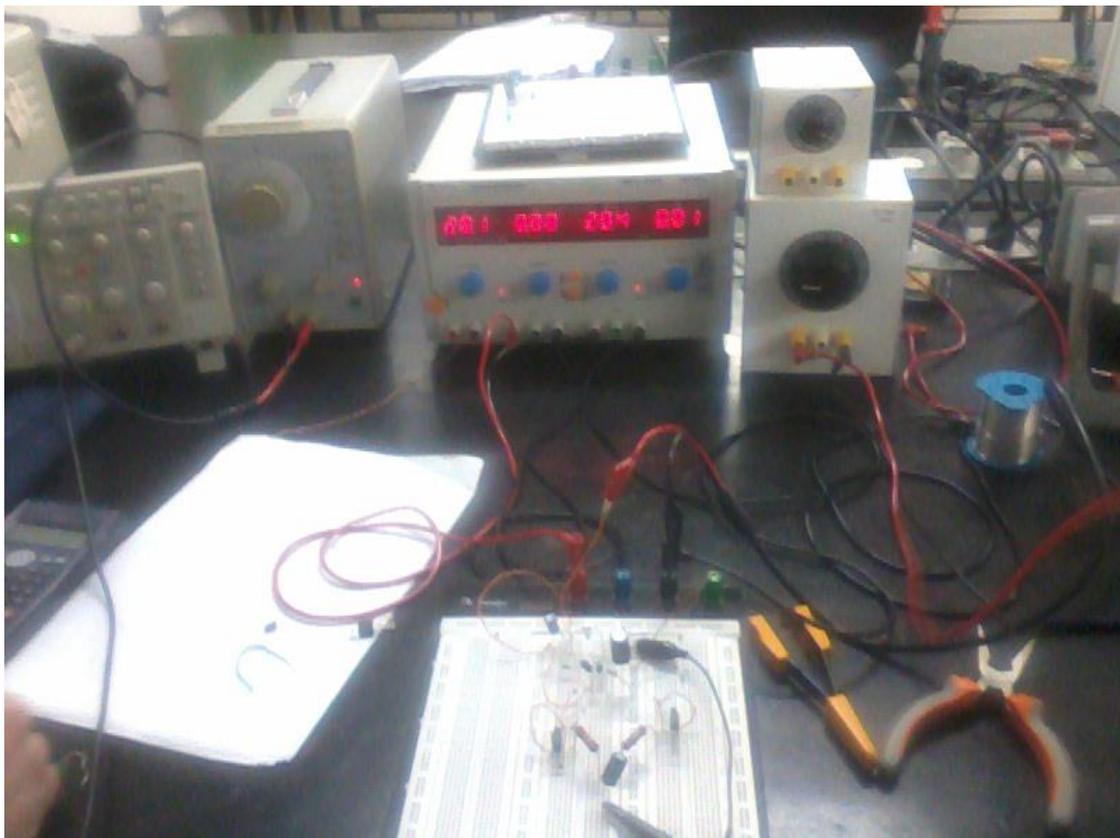


Figura9. Circuito na protoboard

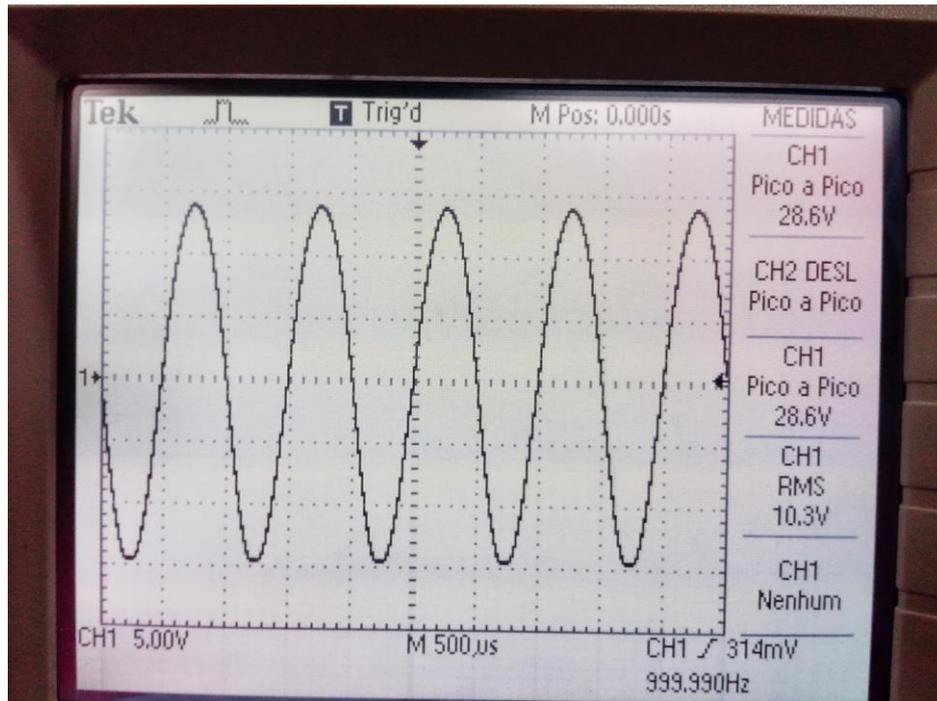


Figura 10. Onda de saída do estágio de amplificação

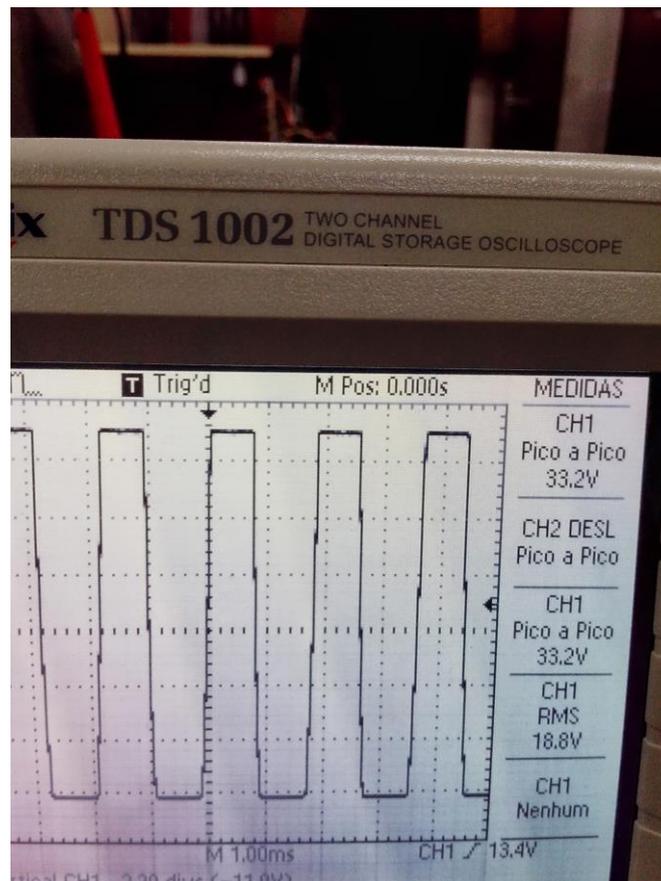


Figura 11. Onda de saída do estágio de potência sem carga

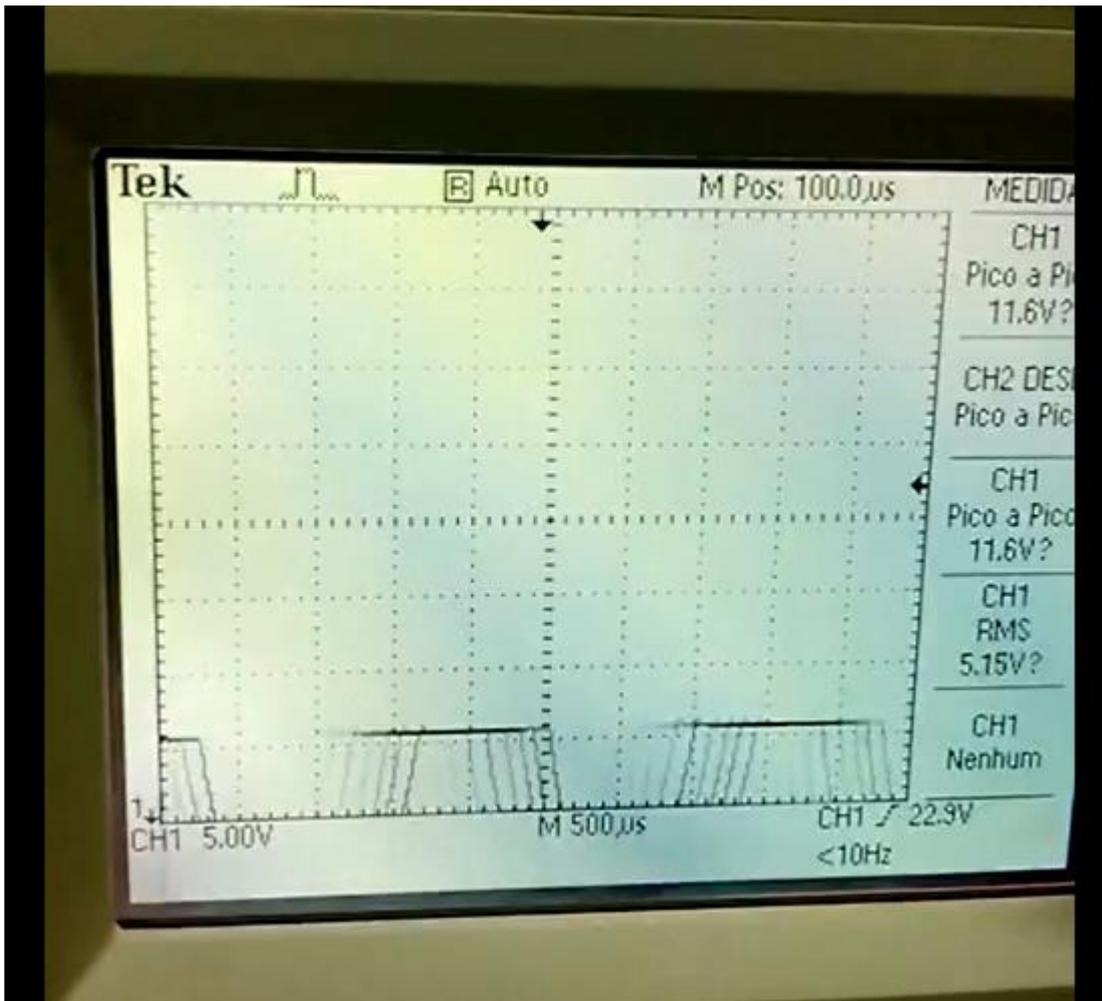


Figura 12. Onda de saída do estágio de amplificação com carga e 150mVpp na entrada

Depois de verificada a aplicação na protoboard, foi desenhada a PCB.

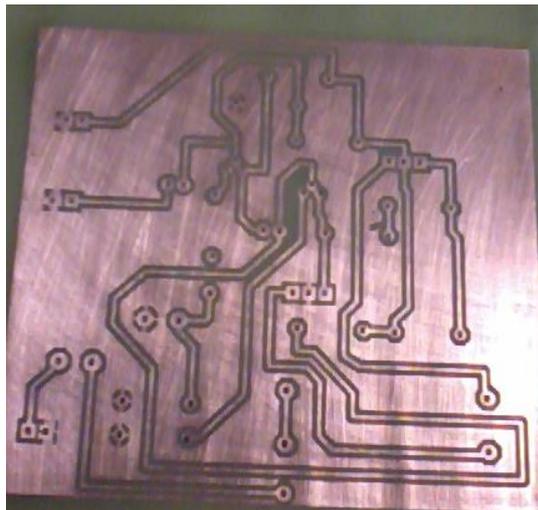


Figura 13. Desenho da PCB já corroída

Depois de desenhada foi feito todo o processo de desenvolvimento de PCB, constituindo:

1. Impressão;
2. Corrosão;
3. Perfuração;
4. Colocação dos componentes;
5. Soldagem.

Ao final do processo obtivemos o seguinte resultado:



Figura 14. Placa montada

Ao final fizemos testes utilizando um instrumento musical. A tensão de saída da guitarra elétrica varia entre 50mV a 300mV, este último apenas em captadores com bobinamento especial.

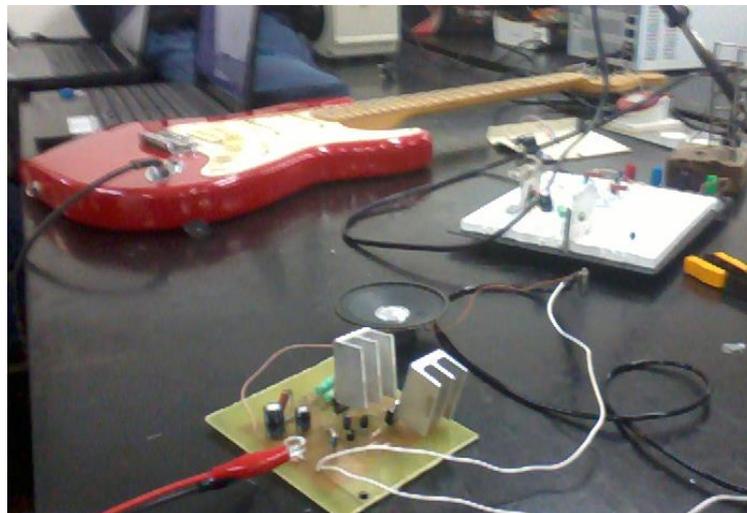


Figura 15. Teste com guitarra

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No primeiro circuito montado na protoboard foi conseguido um bom ganho. Porém ao inserirmos alguma carga na saída do circuito, no caso 8 Ohms, ele cortava o sinal. A partir disso decidimos montar outro circuito.

Já no segundo circuito, o mesmo descrito no relatório, a onda obtida com a carga de 8ohms atingiu 11,6Vpp com 150mVpp de entrada e 14Vpp com 200mVpp de entrada o que corresponde a aproximadamente 3,1W de potência.

Ao testarmos com um instrumento musical percebemos que a ausência de um pré-amplificador distorceu consideravelmente a qualidade do áudio. A sensação que se teve foi de estar tocando em um rádio a pilha. O circuito desenvolvido foi simples e com apenas dois estágios que pode ter sido crucial na qualidade do áudio.

5. CONCLUSÕES

Pode se obter um resultado satisfatório com o projeto final apesar do resultado não ter sido alcançado. Obteve-se um ganho elevado e esperado conforme o calculado no estágio de amplificação, porém o incorreto casamento de impedâncias entre os estágios de amplificação e par complementar ocasionou o corte da onda no estágio final.

Percebe-se que as características da configuração emissor-comum são realmente eficazes para a amplificação da tensão no estágio de saída, porém, a dificuldade e a complexidade para projetar o estágio de potência ocasionou uma perda significativa na obtenção do resultado proposto.

Um dos possíveis problemas pode ter sido a ausência de pré-amplificação, tendo em vista que nos semestre anterior todos os projetos possuíam.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INCROPERA, Frank P. *Fundamentals de Transferência de Calor e de massa*. Rio de Janeiro: LTC, 1992

OZISIK, M. Necati. *Transferência de Calor: um texto básico*. Bogotá: McGraw-Hill, 1990.

SCHMIDT, Frank W. *Introdução às ciências térmicas*. 2ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1996.

BERTHOLDO, Delma T. *Apostila da Disciplina de Fenômenos de Transporte*

ELEKTRON. *Amplificadores classe AB*. Disponível em:

<<http://elektron.no.sapo.pt/amplificadordeclasseAB.html>>. Acesso em: 16 jul. 2013

PHYSIKA. *Projeto de Amplificadores Transistorizados I*. Disponível em: < <http://physika.info>>. Acesso em: 16 jul. 2013.

MALVINO, A. “Eletronic principles”, Quarta Edição; Volume II; São Paulo, Pearson Education do Brasil.