



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia e Informática - CEEI

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Relatório de Estágio Supervisionado

CLEBER CAMPOS BATISTA JUNIOR

Campina Grande - PB

Mai de 2009

CLEBER CAMPOS BATISTA JUNIOR

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório apresentado à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Prof. Eurico Bezerra de Souza Filho
Orientador

Prof. Talvanes Meneses Oliveira
Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Eurico Bezerra de Souza Filho
Orientador

Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
2. DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA.....	5
2.1 Projeto e desenvolvimento do protótipo.....	5
2.2 Desenvolvimento da placa de circuito impresso para o circuito amplificador.....	11
2.3 Montagem e alocação do circuito amplificador.....	13
2.4 Análise das respostas obtidas com o amplificador em sua versão final.....	15
3. Considerações Finais.....	16
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
ANEXOS.....	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeto de um amplificador de áudio de 25W + Projeto da sua fonte de alimentação.....	06
Figura 2 – Protótipo implementado em protoboard.....	07
Figura 3 – Esquema do amplificador implementado em placa universal.....	08
Figura 4 – Protótipo implementado em placa universal.....	08
Figura 5 – Esquema final do amplificador de potência projetado.....	09
Figura 6 - malha de realimentação do amplificador.....	10
Figura 7 – configuração push-pull utilizada no circuito.....	11
Figura 8 – layout da placa de circuito impresso do circuito amplificador.....	11
Figura 9 – ProtoMat S62 da Laser & Electronics.....	12
Figura 10 – placa de circuito impresso pronta para uso.....	12
Figura 11 – circuito amplificador em sua versão final.....	13
Figura 12 – circuito amplificador em sua devida alocação.....	14
Figura 13 – Amplificador pronto para uso em sua versão final.....	14
Figura 14 – Resposta a uma carga puramente resistiva. CH1 é o sinal de entrada do gerador de sinais e o CH2 é a saída do amplificador.....	15
Figura 15 – Efeito da saturação do transformador da fonte na tensão de saída do amplificador.....	16

1. INTRODUÇÃO

O estágio supervisionado foi realizado na Universidade Federal de Campina Grande, no Laboratório de Proteção e Simulação de Sistemas de Potência (LASSE) do Departamento de Engenharia Elétrica, coordenado pelo Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra. Sob supervisão do Prof. Eurico Bezerra de Souza Filho, no período de Abril de 2008 a Abril de 2009, foi desenvolvido um circuito amplificador de potência para uso nos experimentos realizados no LASSE.

O Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra solicitou a construção de um amplificador de potência a ser utilizado junto aos geradores de sinais disponíveis no LASSE para que o nível de tensão e corrente, fornecidos por estes equipamentos, fossem elevados de forma que fosse possível a excitação de determinados núcleos Fe-Si de transformadores. Estes núcleos seriam submetidos a ensaio de medição de perdas magnéticas.

O estágio teve como objetivo o aprendizado no desenvolvimento de projetos e implementação de circuitos eletrônicos, além da familiarização com o software de desenvolvimento de placas de circuito impresso *Layout Plus*, do pacote de softwares ORCAD da Cadence.

Todo o trabalho está devidamente documentado e toda esta documentação está localizada na sessão ANEXOS deste relatório. Os arquivos para a confecção das placas de circuito impresso da fonte e circuito amplificador estão disponíveis em um CD-ROM no LASSE para futuras melhorias e adaptações de colegas interessados neste trabalho.

2. DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

2.1. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Baseado no projeto de um amplificador de áudio de 25W, ilustrado na figura 1, foram feitas algumas modificações de forma que fossem atendidas as

exigências requeridas pelo usuário do amplificador. Simulações em ambiente *CircuitMaker* foram realizadas e um protótipo em protoboard foi desenvolvido. A figura 2 ilustra o protótipo desenvolvido em protoboard que foi submetido a alguns testes. Após algumas falhas e alguns problemas de projeto o circuito finalmente passou nos testes iniciais e o primeiro protótipo em uma placa universal foi confeccionado para que outros testes com cargas mais elevadas pudessem ser realizados. A figura 3 ilustra o esquema que foi implementado na placa universal e a figura 4 ilustra o circuito amplificador confeccionado.

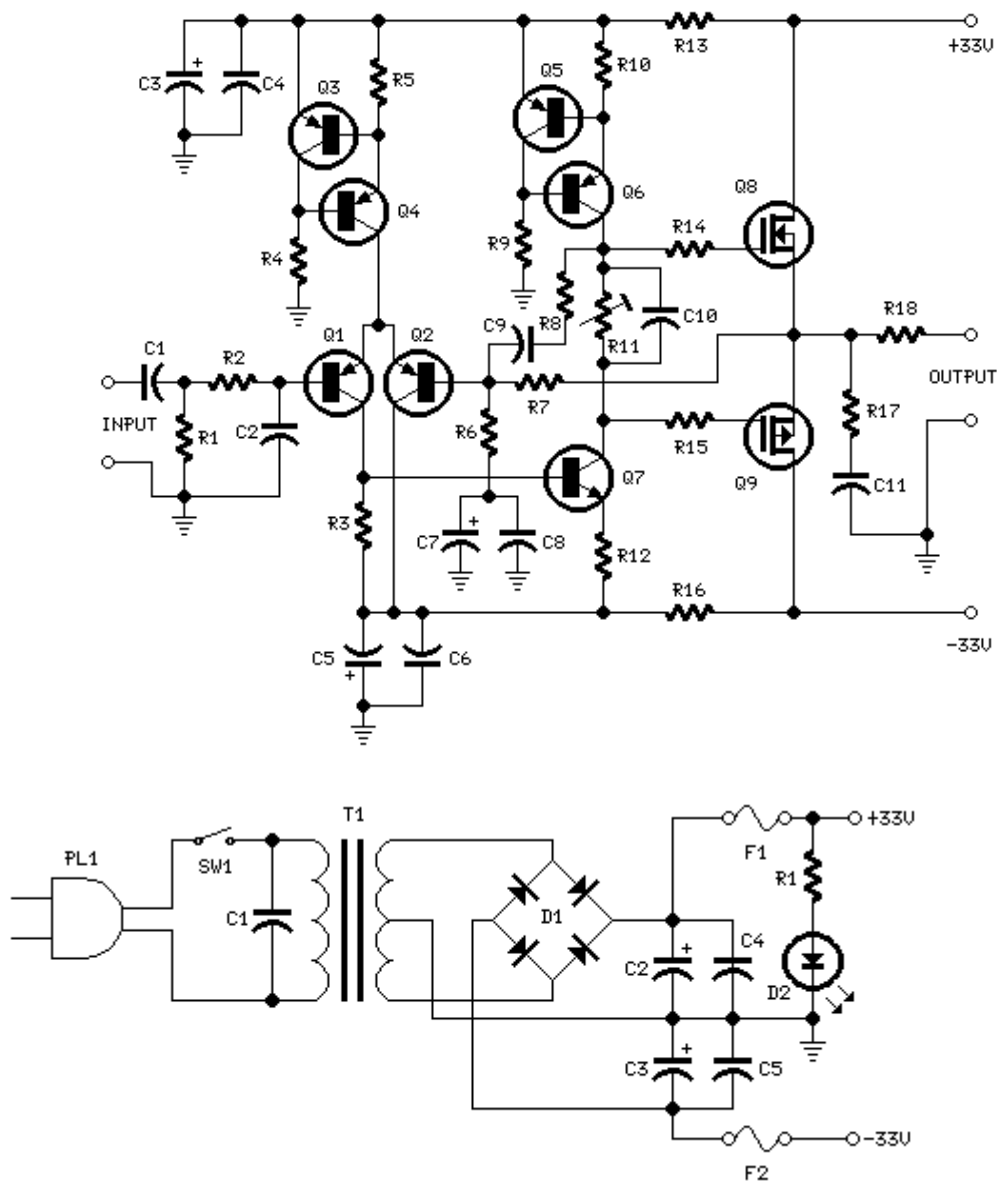


Figura 1 – Projeto de um amplificador de áudio de 25W + Projeto da sua fonte de alimentação.

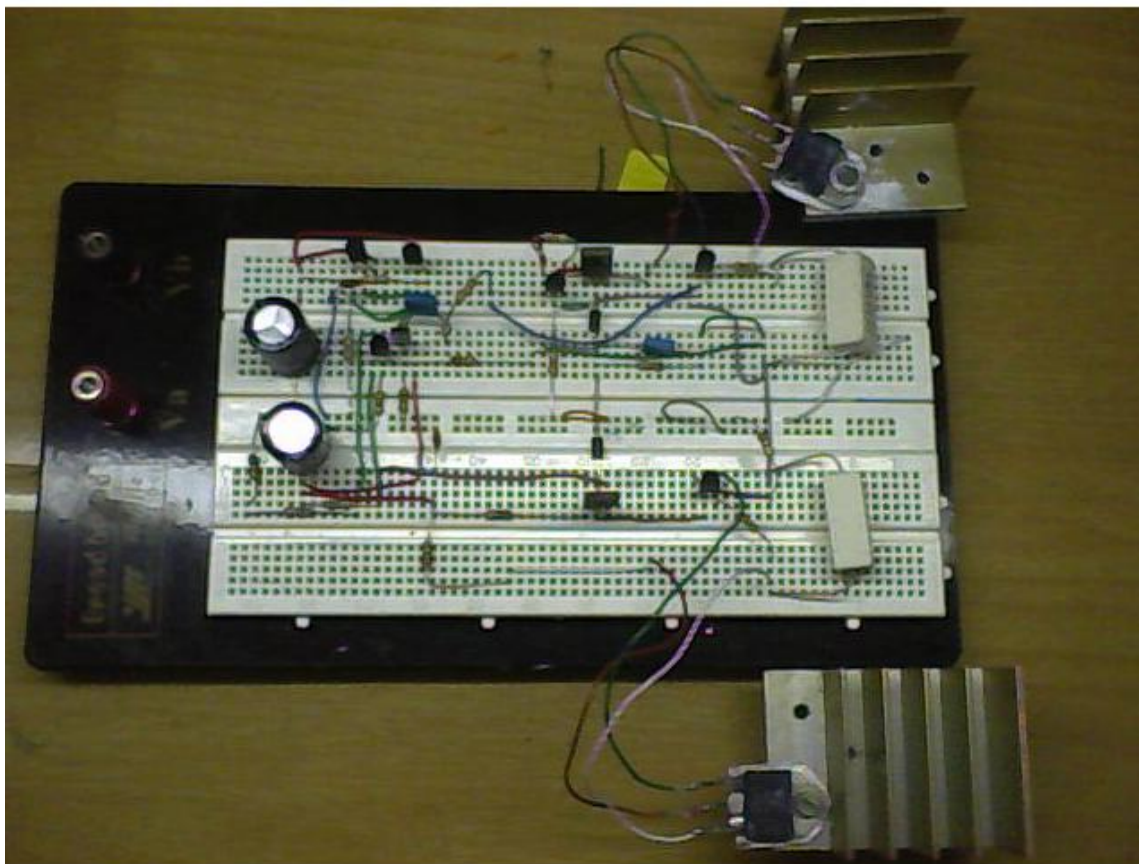
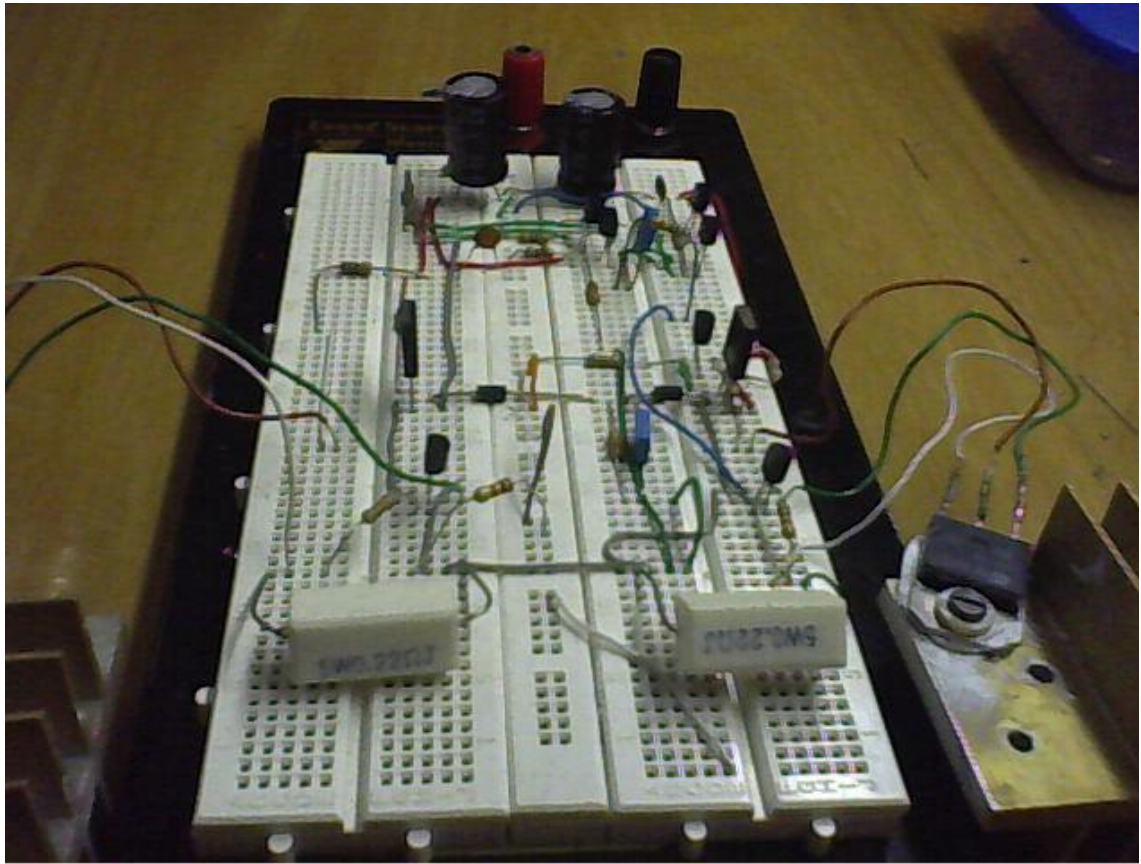


Figura 2 – Protótipo implementado em protoboard

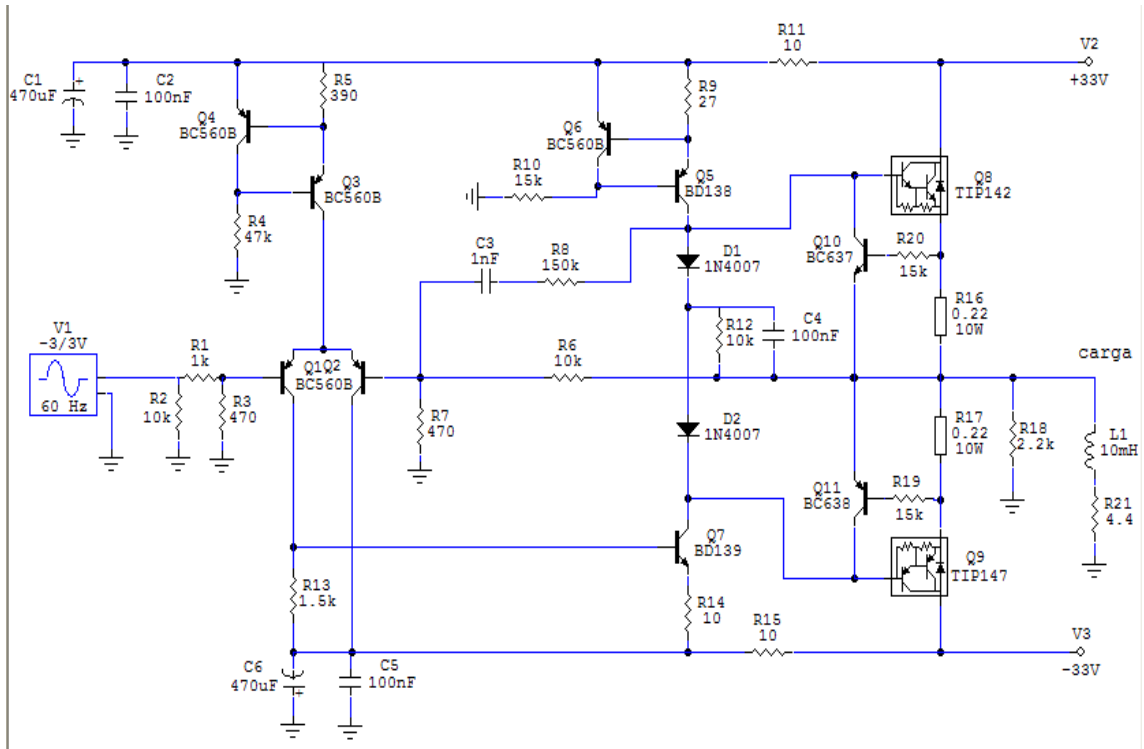


Figura 3 – Esquema do amplificador implementado em placa universal

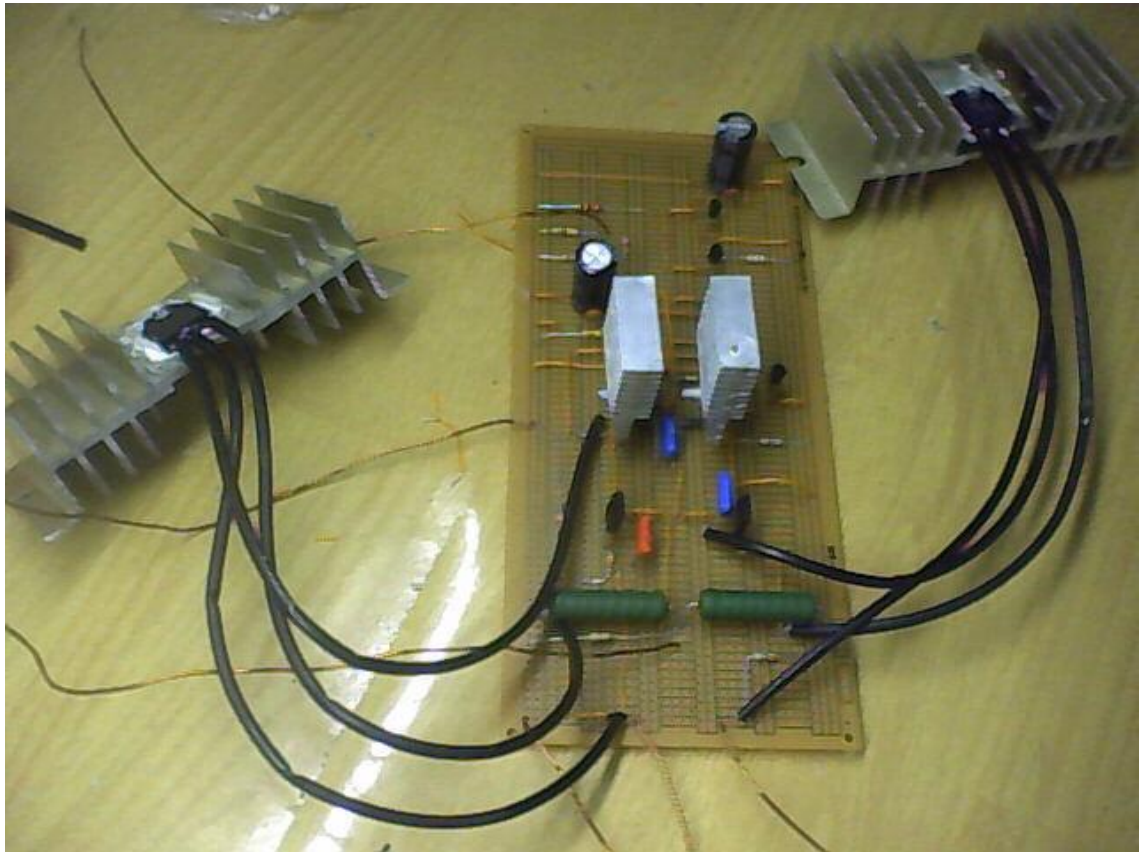


Figura 4 – Protótipo implementado em placa universal

A resposta obtida com o circuito desenvolvido em placa universal foi satisfatória, porém observou-se que um ruído de alta frequência estava aparecendo no sinal de saída e a solução adotada foi a introdução de dois capacitores polyester entre a base e o coletor dos transistores de potencia TIP 142 e TIP 147. Com a introdução dos capacitores o ruído foi eliminado e chegamos a versão final do esquema do amplificador de potência que foi confeccionado em placa de circuito impresso. Antes dos detalhes da placa de circuito impresso vamos mostrar o esquema final do circuito amplificador e tecer alguns comentários sobre suas partes constituintes. A figura 5 ilustra o esquema final do amplificador projetado.

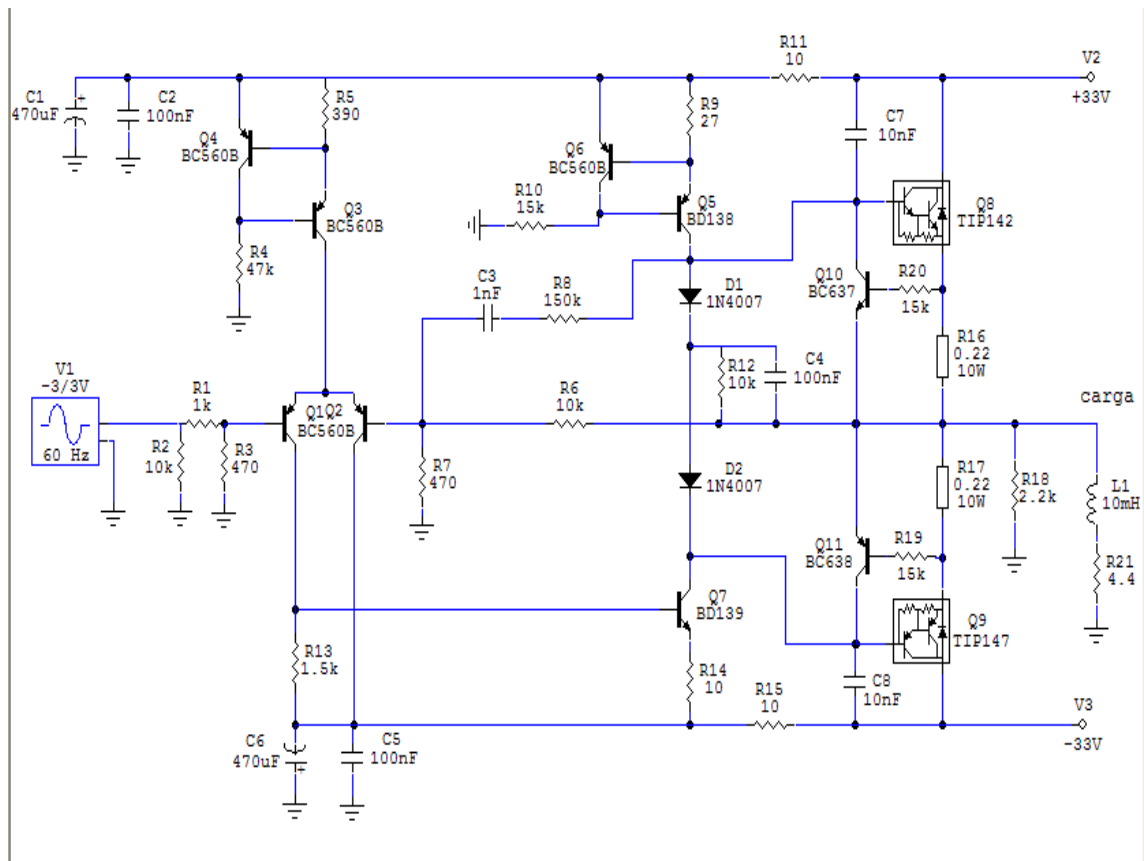


Figura 5 – Esquema final do amplificador de potência projetado

A figura 6 destaca a malha de realimentação do amplificador. O amplificador utiliza realimentação série-paralelo. As principais propriedades da realimentação são:

- Dessensibilidade do ganho – o valor do ganho depende menos das variações nos valores dos componentes devido a mudanças na temperatura.
- Redução da distorção não-linear – ganho constante independentemente do nível do sinal. Saída proporcional a entrada.
- Redução do efeito do ruído – minimiza as contribuições na saída de sinais indesejáveis.
- Extensão da faixa de passagem do amplificador

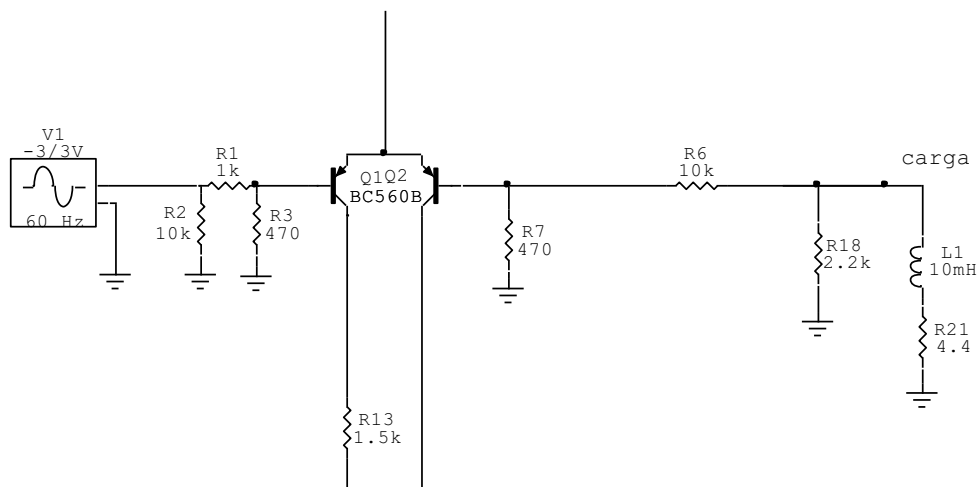


Figura 6 - malha de realimentação do amplificador

A figura 7 destaca a configuração push-pull utilizada no circuito para amplificação do sinal. Quando estamos no semi-ciclo positivo do sinal a ser amplificado, o transistor de potência npn (TIP 142) “empurra” a corrente da fonte de alimentação para a carga acoplada. Quando estamos no semi-ciclo negativo do sinal a ser amplificado, o transistor de potencia pnp (TIP147) “empurra” a corrente da carga para a fonte. Por isso esta configuração é conhecida como push-pull, existe um problema chamado *distorção de cruzamento* quando esta configuração é utilizada, porém este problema é resolvido pela malha de realimentação.

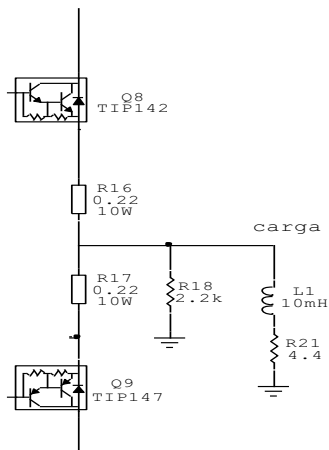


Figura 7 – configuração push-pull utilizada no circuito

2.2. DESENVOLVIMENTO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO PARA O CIRCUITO AMPLIFICADOR

Depois de ter passado nos testes de alta exigência de carga, o amplificador entra em sua fase final com a confecção de sua placa de circuito impresso. Com o auxílio do software *Layout Plus*, do pacote de softwares ORCAD da Cadence foi possível desenvolver o layout da placa de circuito impresso do circuito amplificador projetado. A figura 8 ilustra o layout da placa de circuito impresso do amplificador desenvolvido em ambiente ORCAD.

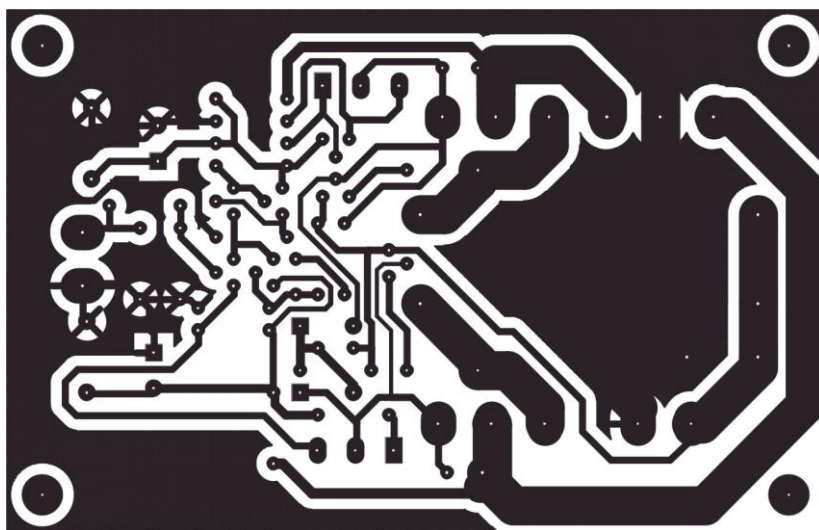


Figura 8 – layout da placa de circuito impresso do circuito amplificador

Com o layout totalmente pronto os arquivos contendo as informações necessárias para a confecção das placas foram enviados ao Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), o qual possui o equipamento *ProtoMat S62*, da empresa americana *LPKF Laser & Electronics*. Este equipamento confecciona placa de circuito impresso. A figura 9 ilustra o *ProtoMat S62* da *Laser & Electronics*.

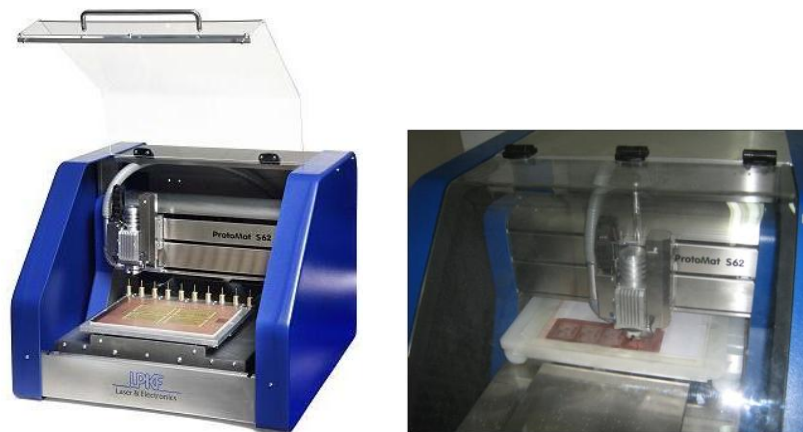


Figura 9 – *ProtoMat S62* da *Laser & Electronics*.

De posse das placas, finalmente, o circuito pode ser implementado em sua versão final. A figura 10 mostra a placa de circuito impresso pronta para uso.

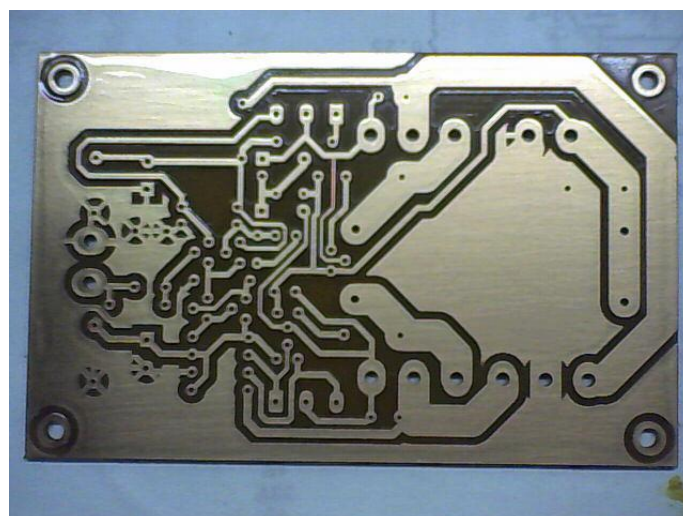


Figura 10 – placa de circuito impresso pronta para uso.

2.3. MONTAGEM E ALOCAÇÃO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR

Visando oferecer uma maior acessibilidade e facilidade na utilização dos recursos do equipamento projetado, foi concebida uma alocação ótima para o circuito amplificador e sua fonte de alimentação. Um gabinete de um antigo pc foi o local escolhido e após algumas adaptações chegou-se ao resultado final deste trabalho de estágio. A figura 11 mostra o circuito amplificador montado na placa de circuito impresso e as figuras 12 e 13 mostram o circuito completo alocado no gabinete de PC.

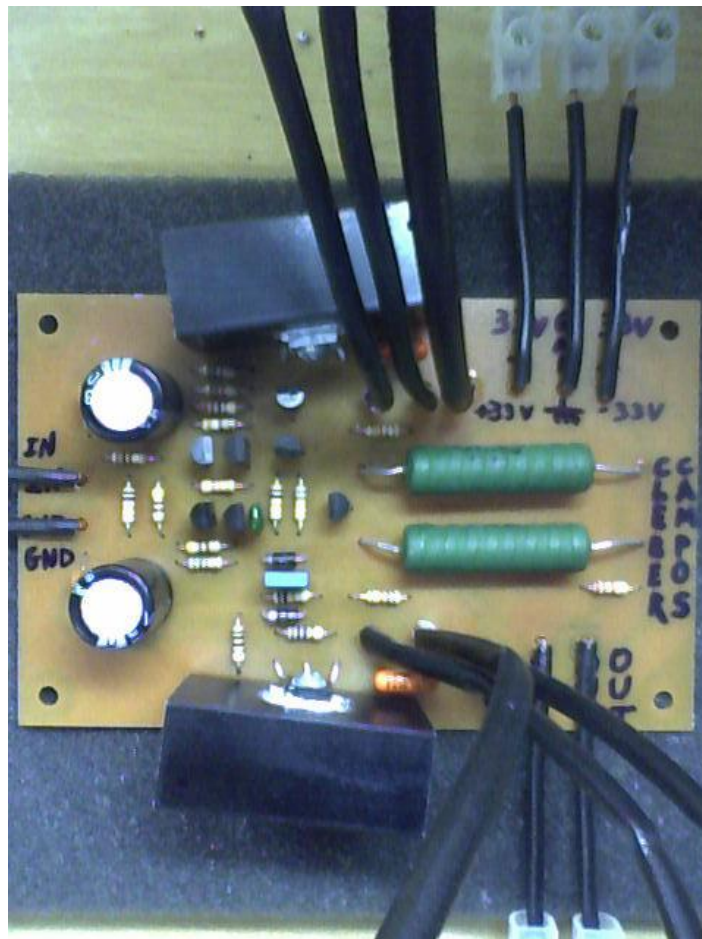


Figura 11 – circuito amplificador em sua versão final

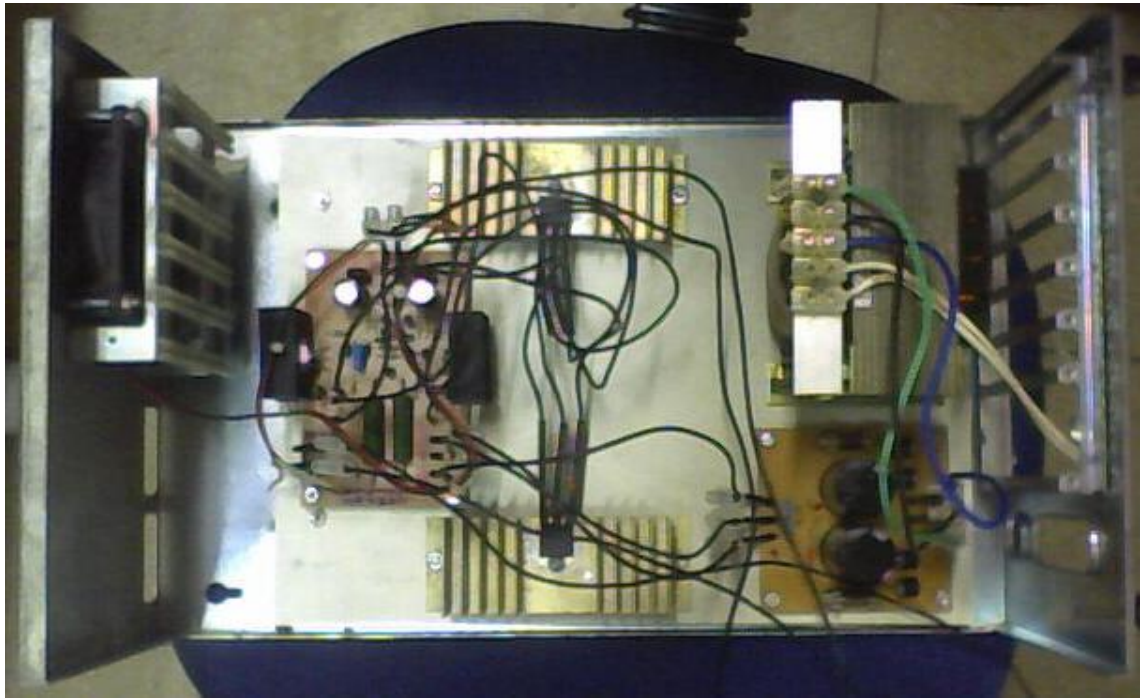


Figura 12 – circuito amplificador em sua devida alocação



Figura 13 – Amplificador pronto para uso em sua versão final

2.4. ANÁLISE DAS RESPOSTAS OBTIDAS COM O AMPLIFICADOR EM SUA VERSÃO FINAL

Objetivando demonstrar que os resultados obtidos nos testes com o amplificador em sua versão final foram satisfatórios as figuras 14 e 15 mostram as respostas obtidas em um ensaio onde a carga era uma associação em série de 3 reostatos de $2,2 \Omega$, resultando numa carga puramente resistiva de $6,6 \Omega$.

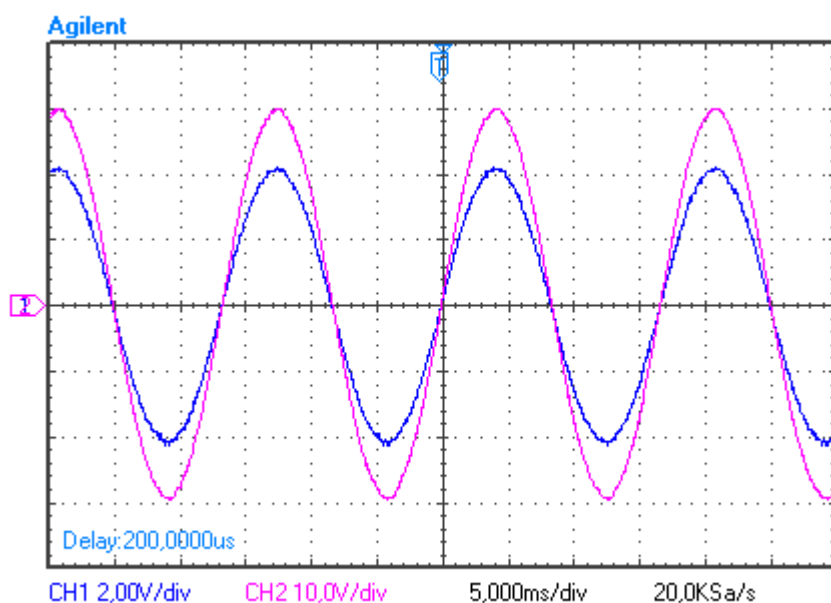


Figura 14 – Resposta a uma carga puramente resistiva. CH1 é o sinal de entrada do gerador de sinais e o CH2 é a saída do amplificador.

A corrente chegou a $4,5A$ de pico sem maiores problemas o único efeito sendo o aquecimento dos transistores TIP142 e TIP 147. Para um valor de tensão superior a $30V$ de pico na saída do amplificador a forma de onda da tensão começa a distorcer. Alguns testes foram feitos e constatou-se que a distorção é devido a saturação do transformador da fonte de alimentação, pois quando substituímos tal transformador por um de maior potencia a resposta distorcia em níveis mais elevados de tensão e quando substituímos por um de menor potencia a resposta distorcia em níveis cada vez menores de tensão. A figura 15 mostra o efeito da saturação do transformador na forma de onda da tensão de saída do amplificador.

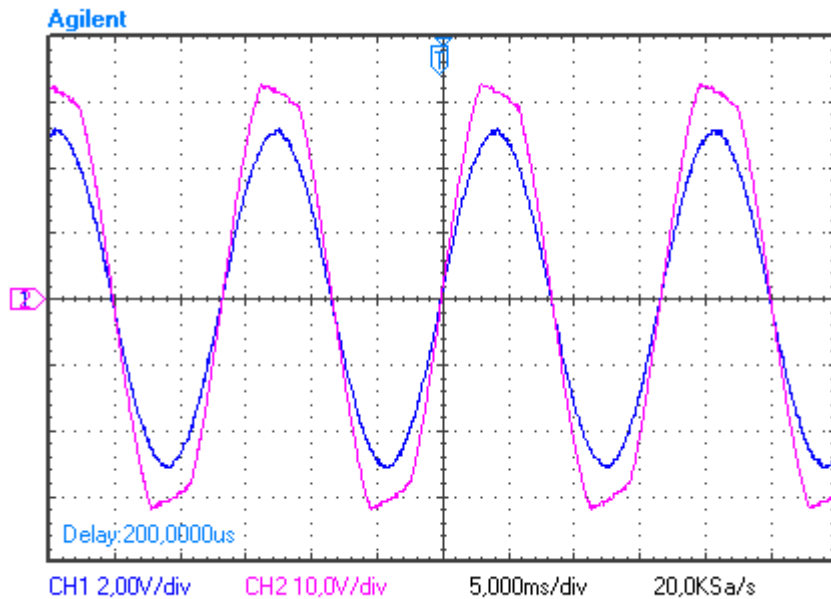


Figura 15 – Efeito da saturação do transformador da fonte na tensão de saída do amplificador.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estágio realizado proporcionou um aprendizado extremamente relevante na formação do engenheiro na área da eletrônica analógica, pois desde a simples habilidade da soldagem até o projeto de circuitos e o desenvolvimento de placas de circuito impresso através de software CAD foi abordado. Todo o trabalho está devidamente documentado e a reprodução dos circuitos e das placas podem ser feitos sem maiores problemas, então, futuras melhorias e adaptações a outras exigências podem ser feitas dando continuidade a este trabalho.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SEDRA, A.S., Microeletrônica - 4ª Ed, Prentice Hall, 2000.
2. MALVINO, A.P., Eletrônica Vol. 1 Editora: Makron Books, 1982.

ANEXOS

LISTA DE COMPONENTES PARA A MONTAGEM DO AMPLIFICADOR

FONTE SIMÉTRICA:

1. Transformador 400W com derivação central no secundário para $\pm 25V$ rms
2. 2 capacitores eletrolíticos de 4700 μF 50V ou superior
3. 2 capacitores polyester 100nF
4. 4 diodos 6A
5. 2 fusíveis 5A e seus respectivos porta fusíveis
6. 2 resistores 3k3 (1/8)
7. 2 leds

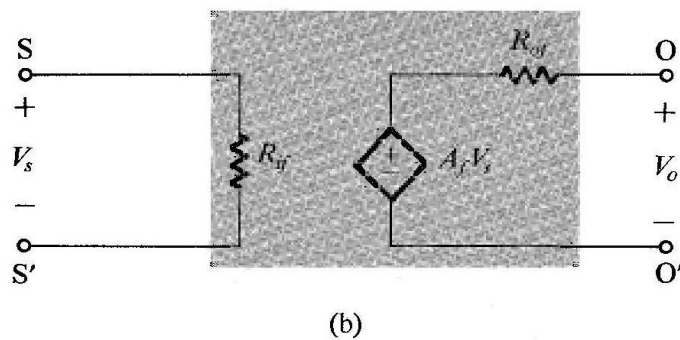
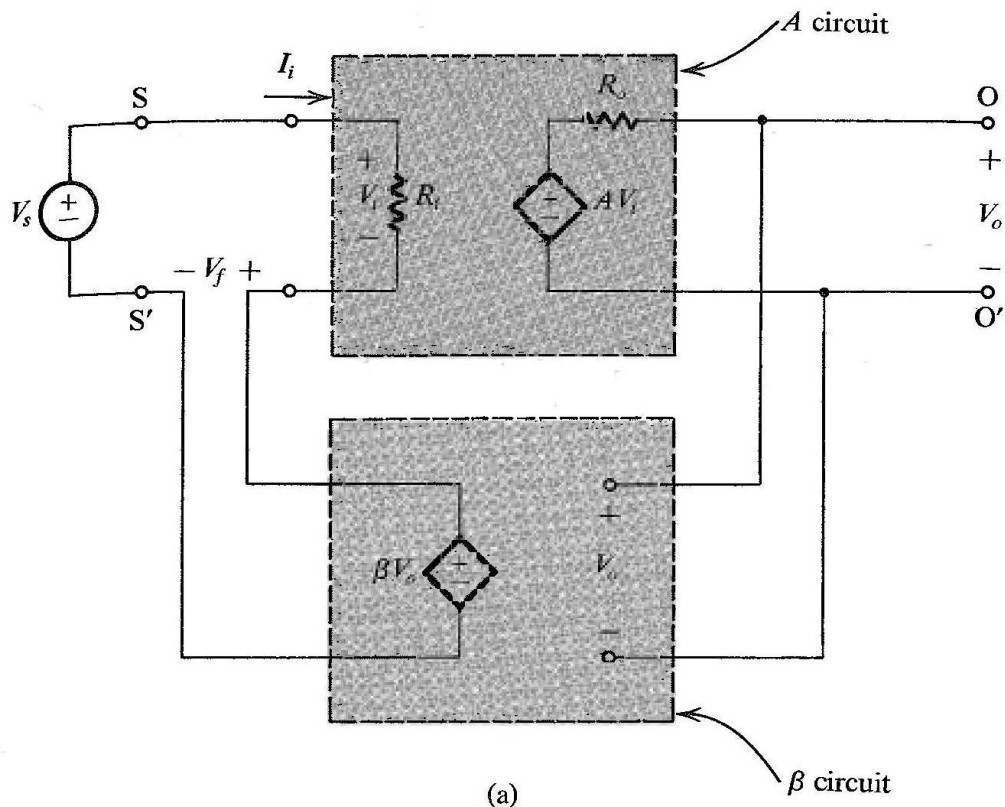
AMPLIFICADOR:

resistores de 1/8 (Ω)	capacitores polyester (nF)	transistores
1x1k	3x100	5xBC560
3x10k	2x10	1xBC637
2x470	1x1	1xBC638
1x1.5	2x470μF (50Veletrolítico)	1xBD138
1x390		1xBD139
1x47k		1xTIP142
1x150k		1xTIP147
3x15k		2x1N4007(diodo)
1x27		
3x10		
1x2k2		
2x0.22 (10W)		

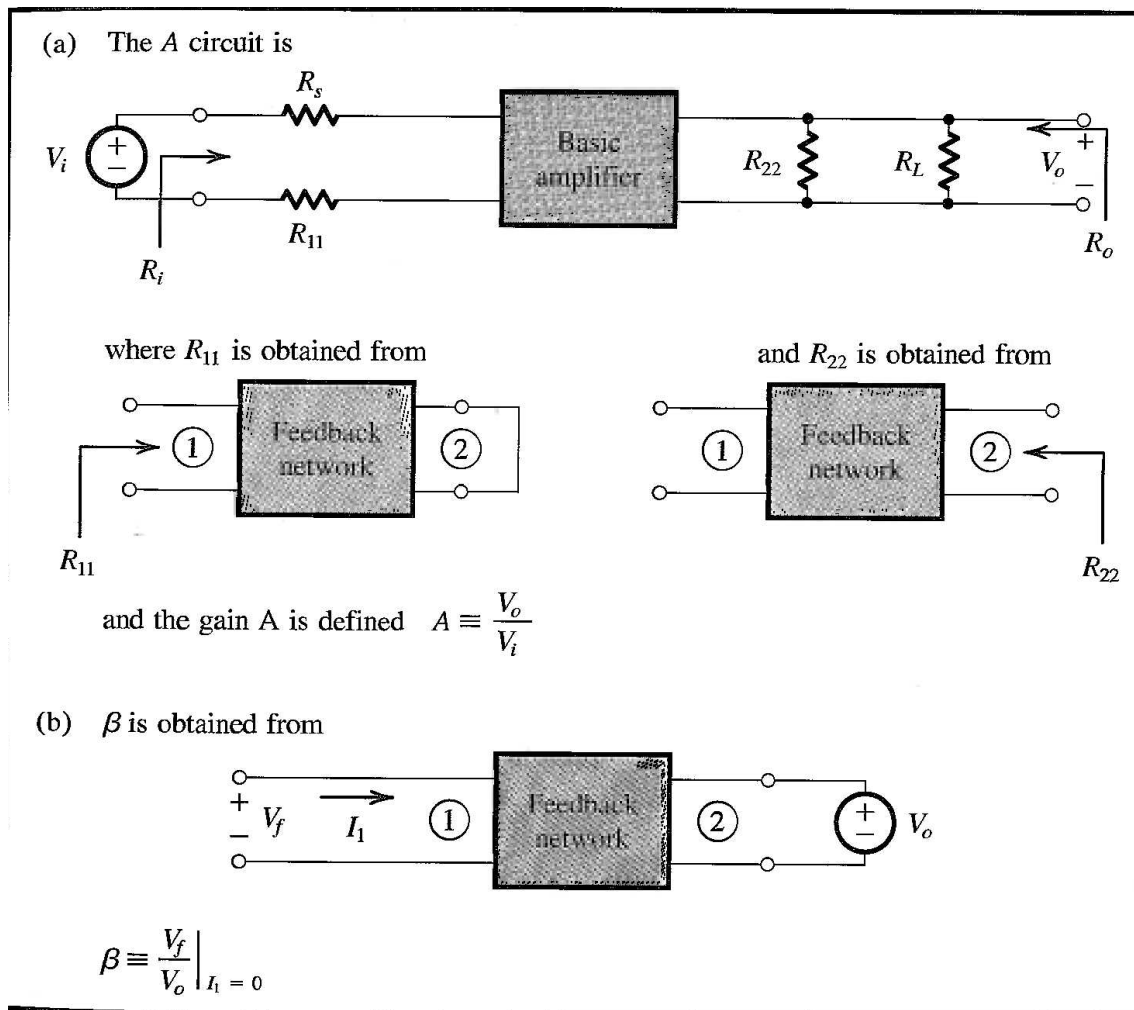
É necessária a utilização de dissipadores de calor nos transistores TIP142, TIP147, BD138, BD139. Tais dissipadores não possuem especificações, cabe ao projetista a sensibilidade de escolher dissipadores adequados. As figuras inseridas no relatório mostram os dissipadores escolhidos.

Estrutura da realimentação série-paralelo

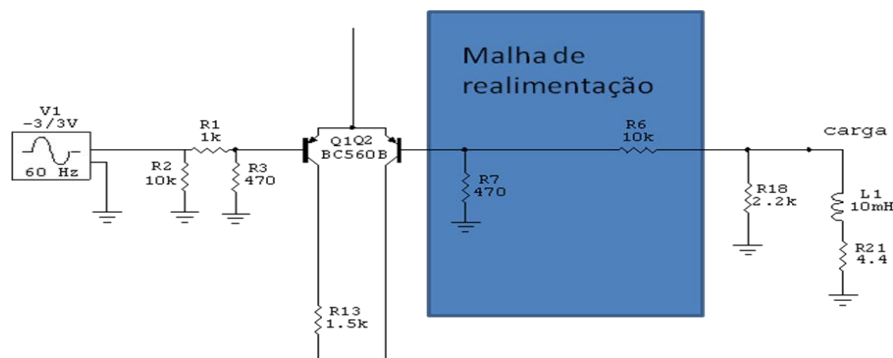
A estrutura da realimentação do amplificador projetado é a série-paralelo. Ela consiste em um amplificador em malha aberta unilateral (o circuito A) e um elo de realimentação do tipo amostragem de tensão com comparação em série (o circuito β). A figura abaixo ilustra o modelo ideal da realimentação série-paralelo utilizada no circuito amplificador. Observe que o circuito β não carrega o circuito A, ou seja, a conexão do circuito β não altera o valor de A (definido como sendo $A \equiv V_o/V_i$).



A figura abaixo apresenta um resumo das regras para determinar A e β do circuito com realimentação série-paralelo.



Desta forma, podemos calcular o valor de β do circuito e depois calcular o ganho A.



Logo, o valor de β será:

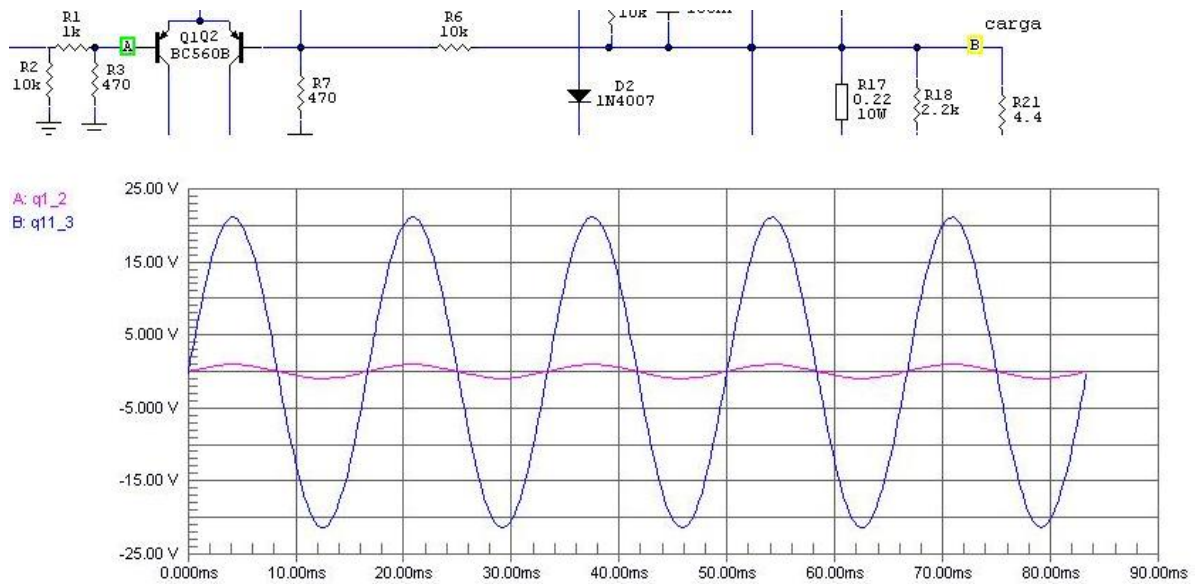
$$\beta = R_{470}/(R_{470}+R_{10k})$$

$$\beta = 0.04489$$

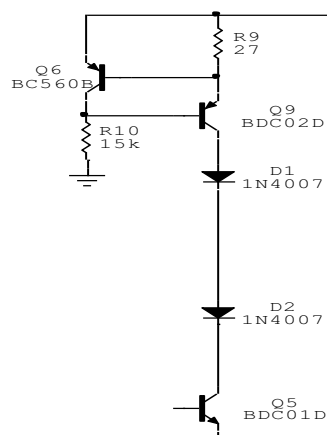
Como o ganho em malha fechada $A_f = A_{vma}/(1+\beta A_{vma})$ e o ganho de malha aberta A_{vma} é muito elevado, o ganho do amplificador $V_o/V_i = 1/\beta$.

$$V_o/V_i \cong 22,28$$

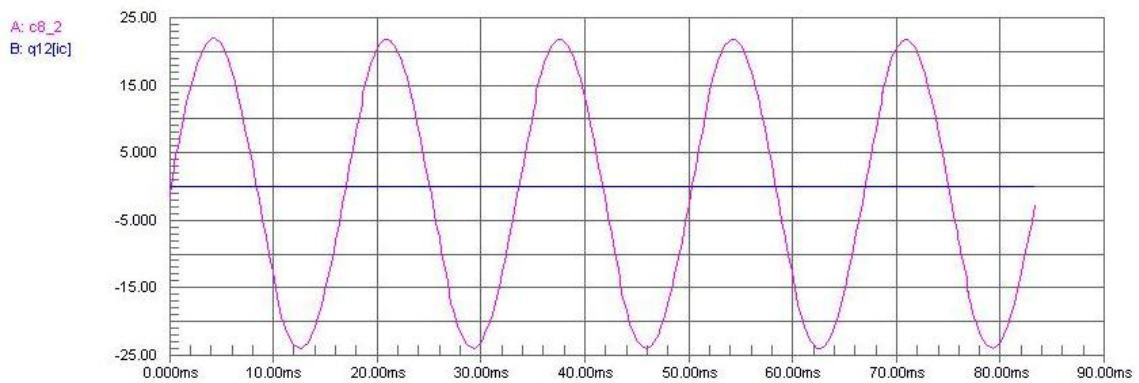
A figura abaixo foi retirada da simulação do circuito feita em ambiente *CircuitMaker* e ilustra que o ganho do circuito está de acordo com o calculado teoricamente.



A figura ilustrada abaixo representa uma carga ativa do circuito amplificador responsável pelo ganho em malha aberta infinito.



Esta configuração faz com que a resistência associada ao coletor do transistor BD139 seja muito elevada (tende ao infinito), conseqüentemente, a corrente de referência no coletor do BD139 é muito baixa (tende a zero). O ganho do amplificador está associado de forma inversa à corrente de referência, logo, o ganho em malha aberta do amplificador é quase infinito. A figura abaixo ilustra a forma de onda da tensão e da corrente no ramo onde está conectado o coletor do BD139 e a carga ativa responsável pelo ganho infinito em malha aberta.



Como é possível observar a tensão é muito elevada em comparação com a corrente que aparece no gráfico como sendo zero. Isto porque a resistência associada à carga ativa conectada ao ramo do coletor do B139 é muito elevada.