

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO  
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02139

6.101 Laboratório de Introdução a Eletrônica Analógica

Laboratório No. 6

**NOTA: ESTE LABORATÓRIO REQUER UMA VERIFICAÇÃO PARA A EXPERIÊNCIA UM. Agende sua verificação na lista afixada na porta da sala do TA. Queremos utilizar todos seus controles e usar seus circuitos com um microfone, CD Player e alto-falante reais,. Nenhum crédito será dado para o relatório se ele não foi verificado.**

**Experiência 1: Um pré-amplificador ou “front-end” para o amplificador de potência.**

Agora que você projetou um amplificador que pode colocar poucos volts de sinal áudio em uma impedância elevada e gerar uma tensão mais alta em corrente elevada em uma impedância baixa [do alto-falante], você necessita de algum tipo de controle de seção na entrada do amplificador. O projeto tradicional de controle inclui o volume, balanço, tom e as facilidades para comutar entre várias fontes de sinal, isto é o seletor de FM, seletor de AM, CD Player, placa de som do computador, microfone, etc. Todas as fontes precedentes exceto o microfone são conhecidas como fontes de “nível de linha”, isto é, geram no máximo alguns poucos volts RMS a partir de uma fonte de resistência relativamente baixa, talvez  $0\Omega$  na escala de  $k\Omega$  [geralmente um seguidor de emissor ou a saída de um AO]. Um microfone dinâmico, entretanto, produz uma saída de alguns milivolts RMS com impedância da fonte que pode ser mais elevada do que a faixa dada para as fontes de nível de linha acima.

Hoje em dia, ouvimos FM ou CD's enquanto trabalhamos com nossos computadores; e já que muitos dos computadores têm placa de som, pode ser útil ouvir aqueles pequenos apitos e outros sons ocasionais feitos pelo Windows e ainda assim continuar a ouvir nossas músicas. Para fazer isto, sua interface deve ser um tipo de misturador, isto é, você deve poder escutar duas ou mais entradas de uma vez e ainda ajustar individualmente o nível de sinal em cada entrada e o nível total [controle mestre do ganho]. Consulte o diagrama de bloco da figura 1 [que usa seu amplificador de potência do laboratório 5] e projete seu circuito com as seguintes especificações:

- Use o mínimo de AO's caros para todos os circuitos de acordo com as especificações. Dois dispositivos em um pacote podem economizar dinheiro na disposição da placa, menos capacitores de isolamento, etc.. Usar 741 pode ser a maneira a mais barata no início, mas pode resultar no uso de resistores ou dos capacitores extras.
- Forneça três entradas: uma para o CD, uma para a placa de som e uma para o microfone.

- As entradas de nível de linha devem ter um máximo  $A_V$  de 20 dB, a entrada de microfone deve ter um máximo  $A_V$  de 46 dB, ambas em 1000 hertz.
- Cada amplificador de entrada deve ter um divisor de tensão ou um controle de ganho de realimentação. Um controle de ganho de divisor da tensão é basicamente um potenciômetro cujas extremidades fixas são conectadas entre a saída de um estágio e o terra, como se fosse um resistor de carga! O terminal variável do potenciômetro é conectado à entrada do estágio seguinte. Quando este terminal é girado em direção ao terra da resistência, o nível do sinal é zero e quando é girado no sentido contrário o sinal começa a ser maior devido à ação do divisor da tensão. Os controles de volume por divisor da tensão podem ser acoplados por um capacitor na entrada ou na saída respectivamente ou em ambas. A razão principal para eliminar a DC de um potenciômetro do controle de volume é prevenir a geração de ruído de contato, que ocorre quando o atenuador é movido ao longo do elemento de resistência quando a corrente DC o atravessa. Embora este ruído ocorra somente durante a rotação do controle, pode ser intenso e irritante. Se o capacitor de acoplamento for usado, um outro aspecto deve ser considerado em torno de seu valor para um dado ponto de baixa frequência 3dB, já que a impedância da fonte olhando por trás do atenuador para o divisor de tensão varia drasticamente de um lado do potenciômetro ao outro. Isto pode também ter implicações na carga apresentada ao estágio que alimenta o controle de volume. Os controles de ganho do divisor de tensão não devem ser colocados demasiadamente próximos do estágio de entrada de um amplificador multi-estágio de ganho elevado. Quando os estágios de ganhos elevados vêm após o controle de volume, a redução do controle não apresentará nenhum efeito no ruído gerado nos estágios subsequentes. Poderia ter uma situação onde reduzir o volume para gerar um sinal de saída relativamente baixo, mas esse sinal pode ser acompanhado por um nível elevado de ruído do amplificador que é mascarado normalmente por um sinal de saída de nível elevado.

Um controle de ganho de realimentação usa um potenciômetro conectado como um reostato; isto é, um lado da resistência fixa é conectado ao wiper. Você tem que ter cuidado com o lado conectado ao wiper, já que você quer que o ganho aumente quando girar o potenciômetro para a direita e diminua quando girar o potenciômetro para a esquerda. Um controle de ganho de realimentação substitui o resistor de realimentação em um amplificador inversor. [Por que não pode ser usado em um amplificador não-inversor?] Isto funcionará somente usando AO's que são compensados para ganhos abaixo de um. O LF357, por exemplo, não pode ser usado, porque é compensado somente internamente para ganhos abaixo de 5. Um 357 irá oscilar assim que o ganho for girado abaixo de 5. Há também problemas quanto a gerar tensões offset DC à medida que você muda o valor do resistor do potenciômetro de realimentação, pelo menos quando se trata de AO's de entrada bipolar.

- Os três amplificadores de entrada devem alimentar um amplificador aditivo que tenha um controle mestre do ganho de realimentação e um  $A_V$  apropriado para cada entrada.
- Você deve projetar para uma impedância máxima da fonte de 1 k $\Omega$ .

- A largura de faixa de áudio **mínima** da seção inteira do pré-amplificador deve ser de 10 hertz a 50.000 hertz (pontos de -3dB.)
- Todas as entradas AC devem ser acopladas com suas fontes, você pode acoplar DC para todos os circuitos restantes desde que não viole as especificações do offset de saída para o amplificador de potência. Como um controle de ganho de realimentação afeta potencialmente a tensão offset DC de um amplificador operacional? Que tipo de capacitor de acoplamento deve ser usado nesta aplicação? Por quê?

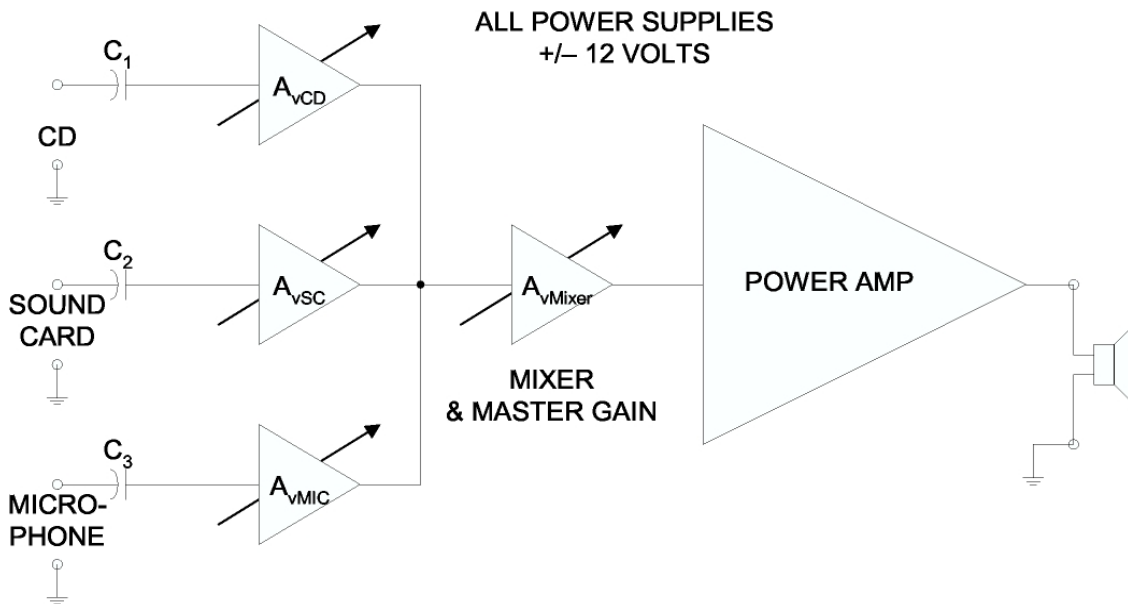


Figura 1: Amplificadores de Controle para a Experiência 1

Para os mais curiosos, uma versão alternativa da experiência do amplificador de controle é mostrada na figura 2. Em vez de misturar as três fontes, esta aproximação usa interruptores comutadores analógicos apenas em uma das fontes em um determinado instante. Os interruptores analógicos seriam controlados normalmente pelas push-pads que controlam um circuito latching para operar os interruptores analógicos, mas você pode usar os pedaços de fios em seu proto-board para controlar os interruptores, ou usar interruptores construídos em seu kit. Já que você não precisa de um somador [misturador], você pode usar um potenciômetro [com perdas] como uma forma de controle de ganho nesta versão, ao invés de usar um estágio ativo para o controle mestre do ganho. Este tipo de potenciômetro tem geralmente uma atenuação logarítmica para o funcionamento do áudio, mas você terá que fazer o seu trabalho com o tipo linear que se encontra no seu kit ou no almoxarifado. [os controles individuais de ganho da entrada não são necessários nesta versão já que não existe nenhum misturador e conseqüentemente não há necessidade de equilibrar o nível do sinal. Você pode ainda querer usar um estágio com ganho ou um seguidor para isolar os níveis variáveis de impedância do controle de volume provenientes de outros estágios.

A principal vantagem de interruptores analógicos sobre os mecânicos é o fato que uma tensão DC é usada para controlar o interruptor e o chaveamento real do sinal é feito

próximo dos estágios de ganho, sem ter que trazer para o sinal um interruptor mecânico do lado de fora. Isto reduz o crosstalk (ligação cruzada), zumbido e ruído.

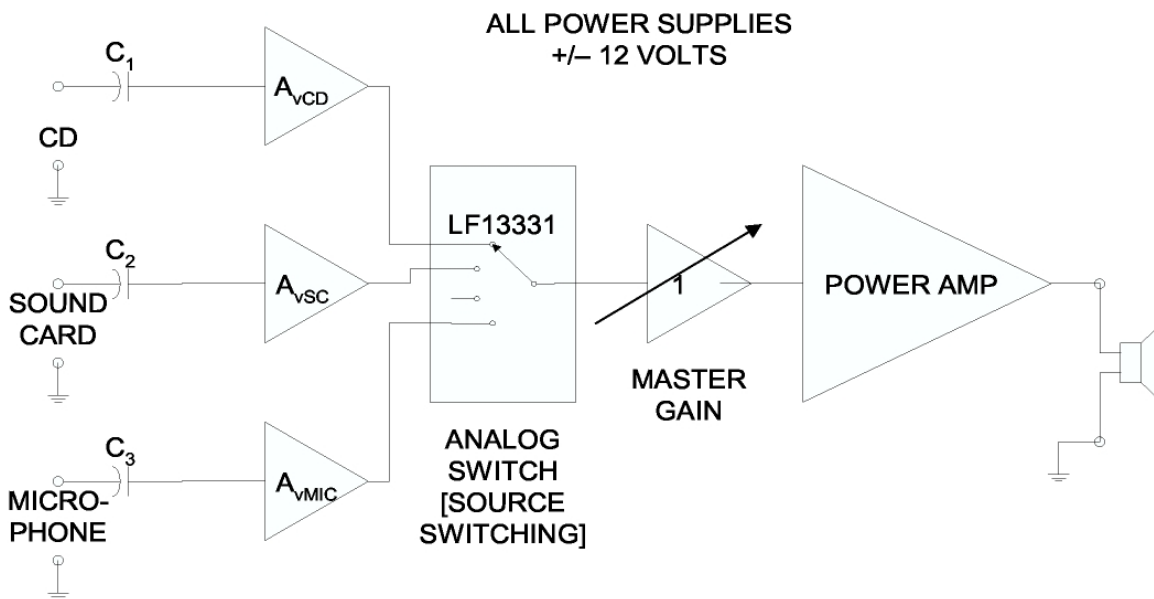


Figura 2: Um controle Alternativo para Amplificadores para a Experiência 1

### Experiência 2: Seguidor de Emissor, Passagem -Série, Regulador de Fonte de tensão DC

Nesta experiência você estudará a operação e projeto de um circuito regulador de tensão. Especificamente, você trabalhará com um circuito no qual uma série de transistores é usada para absorver a diferença entre a tensão DC não regulada na fonte e a tensão regulada que é fornecida à carga. O regulador funciona também como um redutor de ripple (ondulação).

A figura 3 mostra o esquema de um simples regulador de tensão em série. Uma voltagem ac  $v_{AC}(t)$  é retificada pela ponte retificadora e filtrada pelo capacitor  $C_f$ . Esta tensão é aplicada ao coletor do transistor  $Q_1$  que é um 2N2219 em um contenedor TO-5. **NOTA: Este dispositivo pode ficar quente!** Se você desejar, você pode conseguir um dissipador de calor que se ajusta ao contenedor TO-5 nas gavetas verdes próximo ao banco de soldar no laboratório 6.101, sala 38-601. Este transistor é conectado como um seguidor de emissor; uma tensão constante (fornecida pelo diodo Zener  $D_1$  e o resistor  $R_1$ ) é aplicada na base e o resistor de carga  $R_L$  é conectado entre o emissor e o terra. O resultado é que a tensão de carga é mantida constante em uma tensão igual para a do diodo Zener menos a tensão base-emissor do transistor  $Q_1$ .

Seu objetivo é projetar um regulador de tensão deste tipo, seguindo o projeto e as seguintes diretrizes:

- Baseado no diodo Zener 1N754A de 6.8V do seu kit, seu regulador tensão terá uma

tensão de saída de aproximadamente 6V. Por quê?

- A tensão de entrada será de 60 Hz (fornecida pelo transformador de 12.6 VCT RMS do seu kit, ou na caixa de alumínio disponível no almoxarifado). Não conecte o fio terra do osciloscópio com nenhum dos terminais do transformador.
- Deve fornecer tensão regulada de saída para resistências de carga de 100  $\Omega$  e maiores. O ripple da tensão pico a pico não deverá exceder 5 mV com este valor de carga.
- Um pequeno capacitor de saída  $C_2$  *pode* ser necessário para evitar oscilações em frequência alta que pode aparecer na sua tensão regulada de saída. Você pode determinar a capacidade exigida empiricamente.

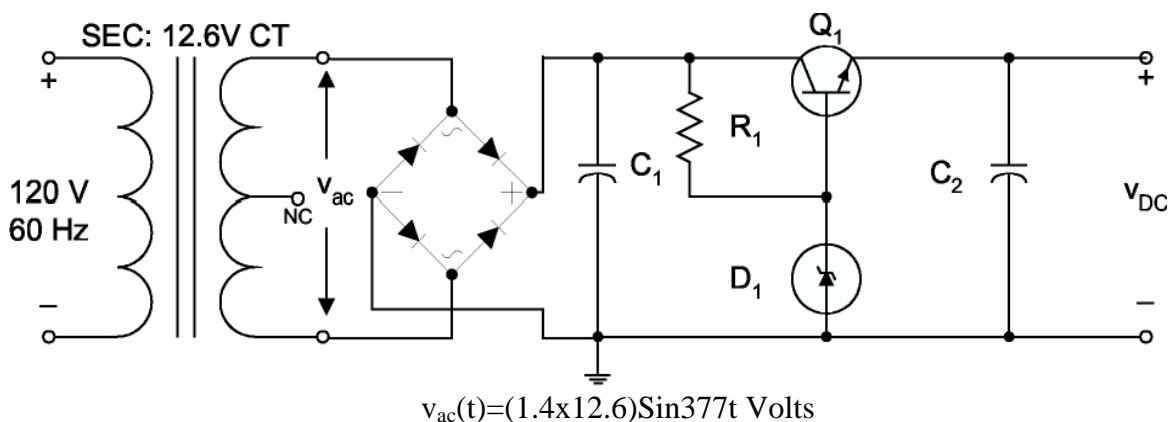


Figura 3: Circuito do regulador de tensão para a experiência 2.

- Para reduzir custos, você deve usar o menor valor para a capacitância de  $C_1$  de acordo com as especificações do projeto. Certifique-se que a avaliação da tensão nominal do capacitor é grande o bastante para resistir à tensão DC e a tensão.
- Evite queimar seu diodo Zener, a corrente máxima através dele deve ser limitada em 55 mA. (O diodo Zener precisa de 55 mA para o circuito funcionar ou um valor mais baixo é de fato melhor?)
- $R_1$  também fornece a corrente da base do transistor. Como um valor maior de  $R_1$  afetará a operação do transistor? Como o  $R_F$  do transistor de passagem afeta o valor de  $R_1$ ?

Usando um resistor de carga de 100  $\Omega$  e 2 watts do seu kit e usando  $C_1 = 100$  uF, preencha a seguinte tabela. Nota:  $C_1$  é definido em um valor relativamente baixo para permitir observar as mudanças na tensão de ripple quando  $R_1$  é modificado. Porém, pode ser necessário aumentar  $C_1$  de acordo com as especificações do ripple quando estiver preenchendo a tabela. Certifique de registrar o valor final de  $C_1$  e  $R_1$ .

Resistor de Carga	$V_{OUTDC}$	$R_1$	$V_{RIPPLE\ ac}$ em $R_L$	$V_{RIPPLE\ ac}$ em $C_1$
100 $\Omega$ , 2W		510 $\Omega$		
100 $\Omega$ , 2W		1.0 k $\Omega$		
100 $\Omega$ , 2W		3.0 k $\Omega$		
100 $\Omega$ , 2W		5.1 k $\Omega$		
100 $\Omega$ , 2W		7.5 k $\Omega$		
100 $\Omega$ , 2W		10.0 k $\Omega$		

NOTA: Se você estiver usando um dos novos osciloscópios *Tektronix sampling*, você pode desejar calcular a tensão média de ripple para ficar mais fácil de ler. Isto pode ser feito através dos seguintes menus:

ACQUIRE / MENU / MODE / SAMPLE / AVERAGE. Você pode ajustar o número das amostras onde é feito o cálculo da média girando o botão *que se encontra no topo do painel do osciloscópio*.

Lembre-se que a análise feita em aula de como o diodo de Zener reduz o à tensão de ripple. Devido ao efeito do divisor de tensão que evoluiu de uma análise de Thevenin da tensão da fonte do ripple e o diodo Zener. Seus dados nos gráficos permitem esta análise? Por que sim ou por que não?

Você pode tentar contornar o ripple no diodo Zener usando um capacitor eletrolítico grande. Entretanto, considerando a baixa impedância ac do Zener, seria necessário um capacitor muito grande para ter muito efeito no ripple do Zener. Esta capacidade é muito mais cara em termos da redução do ripple se ela for usada para aumentar  $C_1$ . Entretanto, contornar o Zener com um capacitor pequeno de 100 nF ou 10 nF pode ajudar reduzir o ruído gerado pelo Zener. [Zeners geram grandes ruídos!] Também você deve realizar isso aumentando  $R_1$  em algum valor que poderia reduzir a corrente Zener o bastante para começar mover o ponto de operação do Zener em torno do joelho da curva Zener, que significa que a impedância ac do irá aumentar.

Experiência 3: Regulador de tensão da fonte de alimentação com passagem série ajustável usando amplificador operacional. ESTE LABORATÓRIO É OPCIONAL PARA O CRÉDITO EXTRA. [equivalente a 30% do valor de um laboratório.] VOCÊ DEVE DEMONSTRAR ESTE PROJETO A UM DOS MEMBROS DA EQUIPE DE ENSINO.

Comece com o transformador, ponte retificadora e capacitor de entrada da experiência 2. Mantenha o circuito de um resistor em série e o diodo de Zener como tensão de referência, mas use um 741 ou outros dispositivos apropriados para alimentar o transistor ao invés de alimentá-lo diretamente do Zener.

Conecte o terminal  $+V_{CC}$  do de 741 ao coletor do transistor da [você pode também tentar o com o lado do emissor; ele pode não “iniciar”, mas a tensão DC tem muito menos ripple lá]. Conecte o terminal  $V_{EE}$  do 741 ao terra.

Use a tensão da referência Zener para polarizar a entrada + do AO. Se você conectar a entrada [realimentação negativa] diretamente ao emissor [saída] do transistor, você terá uma fonte regulada DC de 6,8 volts, já que a realimentação corrigirá a tensão base-emissor apenas como corrige a queda de tensão no diodo no retificador de precisão. Qual é o efeito que o resistor em série com o diodo de Zener terá no ripple na entrada do AO? Qual é a impedância interna do Zener?

Com o objetivo de fazer isto uma fonte ajustável, você precisará usar seu conhecimento da equação de ganho para a conexão do AO não inversor para selecionar um resistor e um potenciômetro de modo a fornecer algum ganho. Para facilitar o ajuste, é melhor limitar o ganho máximo em um valor realístico. Sua tensão de entrada para o AO é 6,8 volts. O circuito da ponte dar-lhe-á algo em torno de 16 volts de entrada para transistor sem carga, assim no máximo espera-se na saída sob a carga algo em torno de 14 volts. Isto requerer um ganho de aproximadamente  $14/6,8 = 2,1$  para o máximo ajuste de ganho.

O D44H8 ou o transistor D44H11 podem trabalhar com correntes de saída de aproximadamente 8 A; porém nas tensões mais baixas de saída quando a queda de tensão no coletor-emissor do transistor for elevada, a dissipação de potência do transistor é elevada em correntes elevadas de carga. A relação de potência do transistor é 20 watts em uma temperatura de  $25^{\circ}$  C. Você deve certificar-se de que seu projeto não excederá esta relação.

Desenhe um diagrama esquemático final do circuito e faça um resumo de todos os cálculos do projeto que você fizer.

#### **Experiência 4: O Indicador Gizmo De Baixa-Bateria**

ESTE LABORATÓRIO É OPCIONAL PARA O CRÉDITO EXTRA. [equivalente a 30% do valor total do laboratório.] VOCÊ DEVE DEMONSTRAR ESTE PROJETO A UM DOS MEMBROS DA EQUIPE DE ENSINO.

No projeto de um dispositivo portátil, cuja operação esteja baseada em bateria é freqüentemente útil ter algum indicador de baixa bateria. Usando as peças do seu kit, ou aquelas disponíveis no almoxarifado e mais um diodo emissor de luz LN29RPP (LED) disponível nas gavetas (a folha de dados deste componente está no conjunto de folhas de dados do curso 6.101), projete um circuito de detecção de baixa bateria de acordo com as seguintes especificações:

- O circuito deve alimentado apenas com a bateria que você está testando.
- Seu circuito deve ligar o LED quando a tensão da bateria (supondo estar normalmente na escala de 10 a 15 volts) fique abaixo de 10 volts. Ele deve continuar a operar o LED até pelo menos 6 volts.

- Seu circuito não deve consumir mais do que 1 mA quando a tensão da bateria estiver em com mais que 10 volts e o LED estiver desligado. Se você usar um IC para este projeto, certifique-se que tenha baixa corrente de dreno quando o diodo emissor de luz estiver desligado.
- Sugestão: a fonte de alimentação variável na experiência 3 pode simular uma bateria cuja tensão pode cair de 15 para 10 volts.

### **Experiência 5: Melhoramento do Estágio de Saída do Amplificador de Potência**

ESTE LABORATÓRIO É OPCIONAL PARA O CRÉDITO EXTRA. [equivalente a 30% do valor total do laboratório.] VOCÊ DEVE DEMONSTRAR ESTE PROJETO A UM DOS MEMBROS DA EQUIPE DE ENSINO.

Projete um estágio melhorado da saída para o amplificador do laboratório 5. Você pode usar o par de realimentação complementar [par de Sziklai] (mostrado) ou um par regular de Darlington. Os dispositivos de saída do caso TO-220 suportam até 8 A e assim você pode usar resistência de carga de  $8\Omega$ . Certifique-se de calcular a potência necessária para este resistor antes de usá-lo no amplificador. A saída de potência melhorada será limitada por uma corrente 1 A construído com as fontes de alimentação de seu kit. Você pode desejar usar um potenciômetro de  $1000\ \Omega$  conectado como um reostato através dos diodos de polarização para ajustar facilmente a polarização. 10 mA de corrente de polarização através dos dispositivos de saída deve ser suficiente. Você deve habilitar o aumento dos valores de  $R_{B1}$  e  $R_{B2}$  usando esta conexão de saída do dispositivo. Por quê? [Nota: Para obter mais potência neste circuito, use LM6152 um amplificador entre limiars] Se você desejar experimentar saídas com potências mais elevadas, você pode obter no almoxarifado um par de fontes de alimentação que pode fornecer correntes maiores e tensões mais altas. ***Aviso: Certifique-se de não usar uma tensão de fonte de alimentação externa maior que o valor máximo absoluta do AO que você estiver usando.***

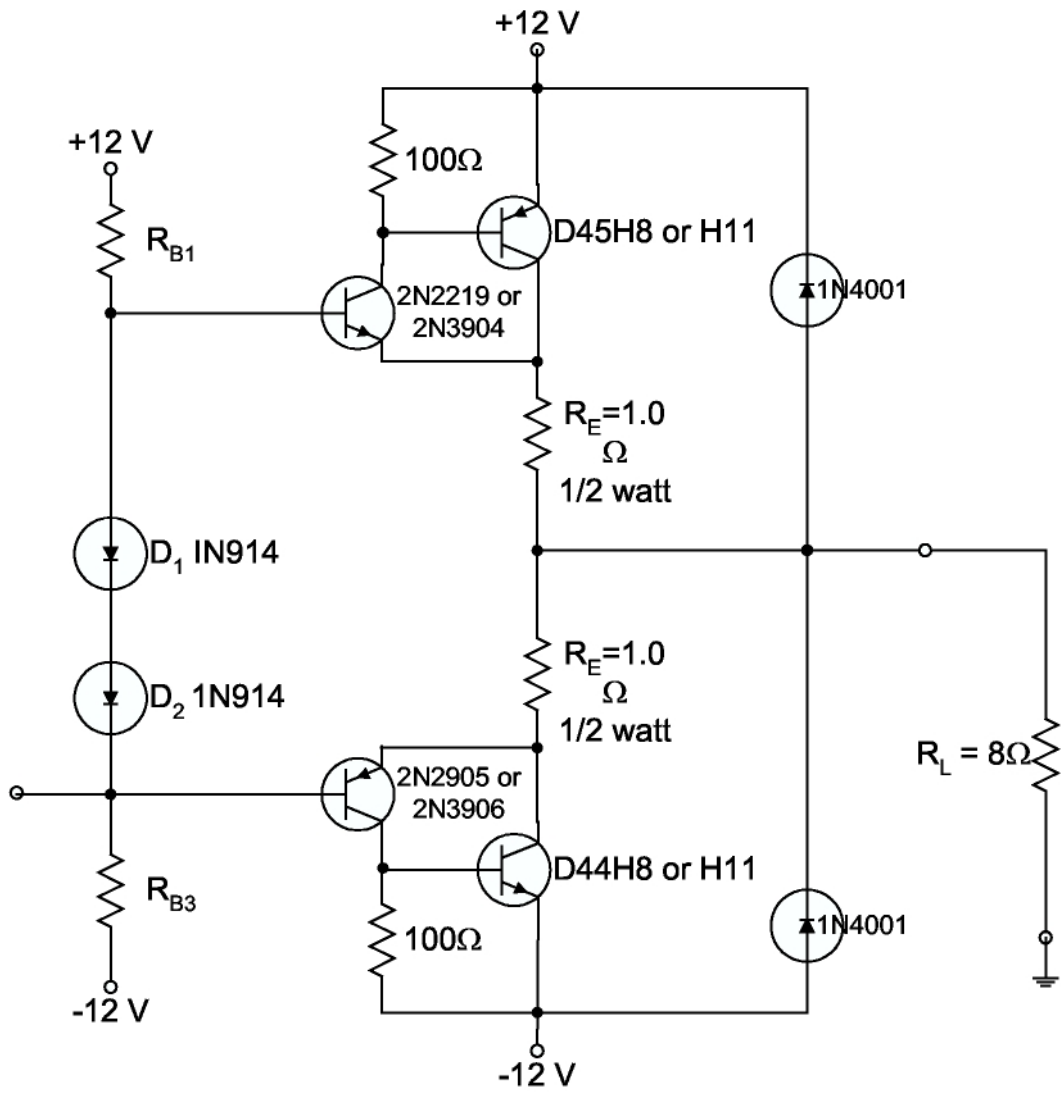


Figura 4: Amplificador de Potência melhorado para a experiência opcional 5