



Laboratório de Dispositivos Eletrônicos

Nome: _____

4º Experimento: Amplificadores com transistores bipolares

OBS 1: o experimento é **em grupo**, e a mesma nota será atribuída ao grupo, com base nos resultados do pré-relatório, e na qualidade do relatório.

OBS 2: a **TABELA DE RESPOSTAS ESPERADAS (Página 2)** deverá ser preenchida por cada dupla e enviada ao professor por **e-mail ANTES DO EXPERIMENTO**. Caso o referido documento seja enviado após o minuto de início do experimento, o conceito atribuído ao experimento irá de 0 (zero) a 5 (cinco).

OBS 3: Após conclusão do experimento, **RESTE RELATÓRIO** contendo os dados experimentais, comparações com simulações, comentários e conclusões deverá ser entregue por e-mail até o fim do dia que antecede a próxima aula (formato: relatorio_exp_04_nome1_nome2.pdf, arquivo único para a dupla, enviado apenas uma vez).

OBS 4: Leia o documento por completo. Assimile a teoria.

Objetivos principais do experimento

Projetar amplificadores com transistores bipolares, com base em um conjunto de especificações ou restrições. Saber como avaliar experimentalmente as características de desempenho do amplificador projetado, tais como **ganho e impedâncias de entrada ou saída**. Ter a noção do que pode ser feito para ajustar a polarização do circuito, caso o transistor na montagem tenha parâmetros diferentes daqueles na simulação (grande diferença de β , por exemplo).

A **simulação prévia** se faz necessária para que o aluno tenha a **noção** do que ele deve encontrar no experimento, para que fiquem claros eventuais **erros de montagem**, situação em que a medida resulta em um valor **fora da janela esperada**. TODA CONDIÇÃO DE MEDIDA SERÁ SIMULADA, OU SEJA, PARA CADA MONTAGEM HÁ UMA SIMULAÇÃO PRÉVIA ASSOCIADA.

RESUMINDO: 1- Você simula com os modelos PSPICE (ver pág. 3) 2-preenche as tabelas de resposta em cada item, copia os resultados na TABELA DE RESPOSTAS ESPERADAS (Página 2). 3- Envia a página 2 ao professor. 4- faz o experimento, levando seu pré-relatório impresso ou em formato eletrônico; 5 -envia o relatório ao professor.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Folha de respostas a ser enviada ao professor por e-mail até o minuto de início do experimento (apenas esta folha, com arquivo com seguinte nome: gabarito_exp_04_nome1_nome2.pdf). Esta página é apenas um agrupamento das tabelas que você terá que preencher nas folhas a seguir.

Simulação 1: PUSH-PULL – análise DC						Valores esperados no experimento			
R_{1REAL} ($=R_{2REAL}$) (Ω)	R_{3REAL} ($=R_{4REAL}$) (Ω)	$V_{IN}(V)$	$V_{OUT}(V)$	$I_{EOTIP122}$ (A)	$I_{EOTIP127}$ (A)	V_{IN} $\pm 0,2V$	V_{OUT} $\pm 0,2V$	$I_{EOTIP122}$ $\pm 50\%$	$I_{EOTIP127}$ $\pm 50\%$
EXPERIMENTO 1: PUSH-PULL – análise DC						Diferença (%) entre simulação e experimento			
$V_{IN}(V)$	$V_{OUT}(V)$	$I_{EOTIP122}$ (A)	$I_{EOTIP127}$ (A)	V_{IN}	V_{OUT}	$I_{EOTIP122}$	$I_{EOTIP127}$		

Simulação 2: PUSH-PULL – análise transiente				Faixa de valores esperados no experimento	
R_{1REAL} ($=R_{2REAL}$) (Ω)	R_{3REAL} ($=R_{4REAL}$) (Ω)	V_{CARGA}/V_{IN}	$Z_{INCARGA}$ (Ω)	$V_{CARGA}/V_{IN} \pm 20\%$	$Z_{INCARGA} \pm 20\%$
EXPERIMENTO 2: PUSH- PULL – análise transiente				Diferença (%) entre simulação e experimento	
V_{CARGA}/V_{IN}	$Z_{INCARGA}$ (Ω)	V_{CARGA}/V_{IN}	$Z_{INCARGA}$		


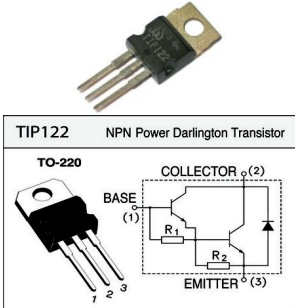
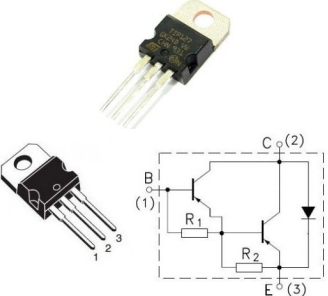

Simulação 3: Emissor-comum – análise DC							Valores esperados no experimento		
R_{1REAL} (Ω)	R_{2REAL} (Ω)	R_{3REAL} (Ω)	R_{4REAL} (Ω)	V_{CO} (V)	V_{BO} (V)	V_{EO} (V)	$V_{CO} \pm 0,2V$	$V_{BO} \pm 0,1V$	$V_{EO} \pm 0,05V$
EXPERIMENTO 3: Emissor-comum – análise DC							Diferença (%) entre simulação e experimento		
V_{CO} (V)	V_{BO} (V)	V_{EO} (V)	V_{CO}	V_{BO}	V_{EO}				

Simulação 4: Estágio de entrada - Transiente						Faixa de valores esperados no experimento	
R_{1REAL} (Ω)	R_{2REAL} (Ω)	R_{3REAL} (Ω)	R_{4REAL} (Ω)	V_{CARGA}/V_{IN}	Z_{IN} (Ω)	$V_{CARGA}/V_{IN} \pm 20\%$	$Z_{IN} \pm 10\%$
EXPERIMENTO 4: Estágio de entrada - Transiente						Diferença (%) entre simulação e experimento	
V_{CARGA}/V_{IN}	Z_{IN} (Ω)	V_{CARGA}/V_{IN}	Z_{IN} (Ω)				

Material a ser utilizado no experimento e MODELOS PSPICE a serem simulados.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

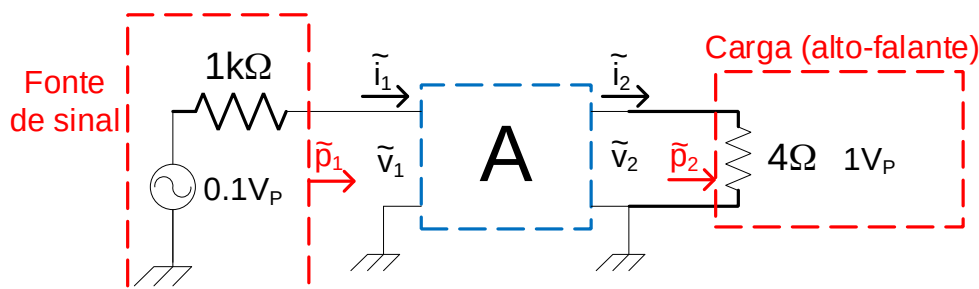
Componente	Ilustração	Observações
Transistor NPN BC547C	 <p>1. Collector 2. Base 3. Emitter</p>	<p>Folha de dados disponível na página da disciplina. Familiarize-se com as especificações. ALUNOS ANTERIORES ERRARAM A PINAGEM, TENTE GARANTIR SEU EMPREGO! Modelo PSPICE: $I_s=7.049f$ $X_{ti}=3$ $E_g=1.11$ $V_{af}=24.76$ $B_f=543.1$ $I_{se}=78.17f$ $N_e=1.679$ $I_{kf}=94.96m$ $N_k=.5381$ $X_{tb}=1.5$ $Br=1$ $I_{sc}=27.51f$ $N_c=1.775$ $I_{kr}=3.321$ $R_c=.9706$ $C_{jc}=5.25p$ $M_{jc}=.3147$ $V_{jc}=.5697$ $F_c=.5$ $C_{je}=11.5p$ $M_{je}=.6715$ $V_{je}=.5$ $Tr=10n$ $T_f=410.7p$ $I_{tf}=1.12$ $X_{tf}=26.19$ $V_{tf}=10$</p>
Transistor NPN TIP122 (Darlington)	 <p>TIP122 NPN Power Darlington Transistor TO-220 BASE (1) COLLECTOR (2) EMITTER (3)</p>	<p>Folha de dados disponível na página da disciplina. Familiarize-se com as especificações. ALUNOS ANTERIORES ERRARAM A PINAGEM, TENTE GARANTIR SEU EMPREGO! Modelo PSPICE: Pegue o modelo diretamente do site da On Semiconductor (o professor se isenta...) : www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP122.LIB</p>
Transistor PNP TIP127 (Darlington)	 <p>TIP127 PNP Power Darlington Transistor TO-220 BASE (1) COLLECTOR (2) EMITTER (3)</p>	<p>Folha de dados disponível na página da disciplina. Familiarize-se com as especificações. ALUNOS ANTERIORES ERRARAM A PINAGEM, TENTE GARANTIR SEU EMPREGO! Modelo PSPICE: Pegue o modelo diretamente do site da On Semiconductor (o professor se isenta...) : www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP127.LIB</p>
Resistores diversos, ¼ watt		<p>Ver anexo com resistores disponíveis.</p>

1. Contextualização do projeto



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

- a. O objetivo principal do experimento é o projeto de um amplificador, que será estimulado por uma fonte de sinal com 100 mV de amplitude e resistência interna de 1 kΩ, e fornecerá um sinal em sua saída a uma carga de 4 Ω (1 alto-falante, por exemplo), que deverá ter aproximadamente 1V de amplitude. Ver o circuito abaixo:

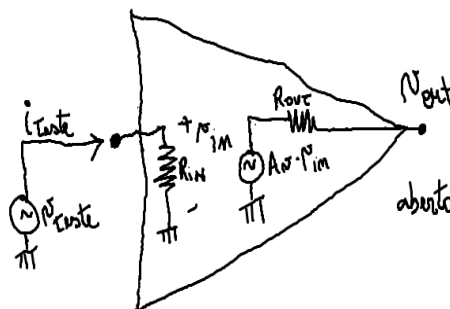


- b. Se a fonte de sinal fosse conectada diretamente à carga, não haveria sinal no alto-falante com amplitude suficiente para que seja audível. Neste caso, o sinal no alto-falante teria uma amplitude de $0,1 \text{ V} \cdot 4 \text{ } \Omega / 1004 \text{ } \Omega \approx 0,4 \text{ mV}$. Necessita-se pois de um (conjunto de) amplificador (es).
- c. Você irá dispor de uma **fonte simétrica de $\pm 5 \text{ V}$** para o seu projeto, e poderá montar o seu circuito com transistores **BC547C, TIP122 e TIP127**.

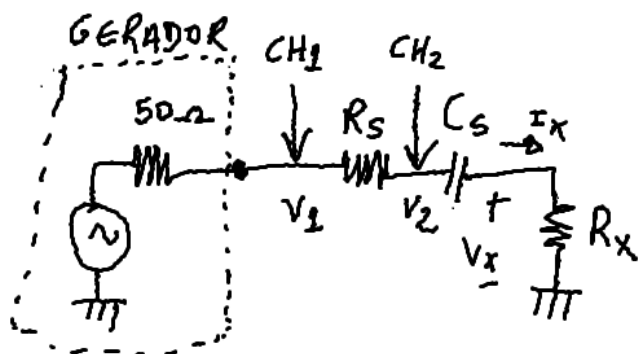
2. Técnica de medição indireta de uma impedância

- a. Uma das características de um amplificador de tensão é sua impedância de entrada:

$$R_{in} = \frac{V_{teste}}{i_{teste}} \Big|_{R_L = \infty}$$



- b. Existem aparelhos específicos para a medição de impedância. No entanto, para exercitar os seus neurônios, no LEAD você irá dispor “apenas” de um gerador de sinais e osciloscópio. E agora, como fazer?
- c. Veja na figura acima que você consegue caracterizar a impedância do dispositivo se aplicar uma tensão (com o gerador de sinais) e medir a (amplitude da) corrente. Para medir a corrente, você precisaria, por exemplo, de uma ponta de corrente (que geralmente faz uso do efeito Hall, e transforma a corrente medida em uma tensão que o osciloscópio mostra). Mas e sem a ponta de corrente, como fazer? (haja exercício pros neurônios...)
- d. Você pode fazer uma medida indireta (ufa!). Tal como você mediu a corrente DC no coletor através da leitura da TENSÃO da resistência RC (lab 03), você usará o mesmo princípio para medir uma impedância. Veja abaixo:



$$R_x = \frac{V_x}{I_x}$$

$$I_x = \frac{V_1 - V_2}{R_S}$$

$$Z_{CS} \approx 0 \Rightarrow V_2 \approx V_x$$

$$R_x \approx \frac{V_2 \cdot R_S}{V_1 - V_2} \approx \frac{R_S}{\frac{V_1}{V_2} - 1}$$

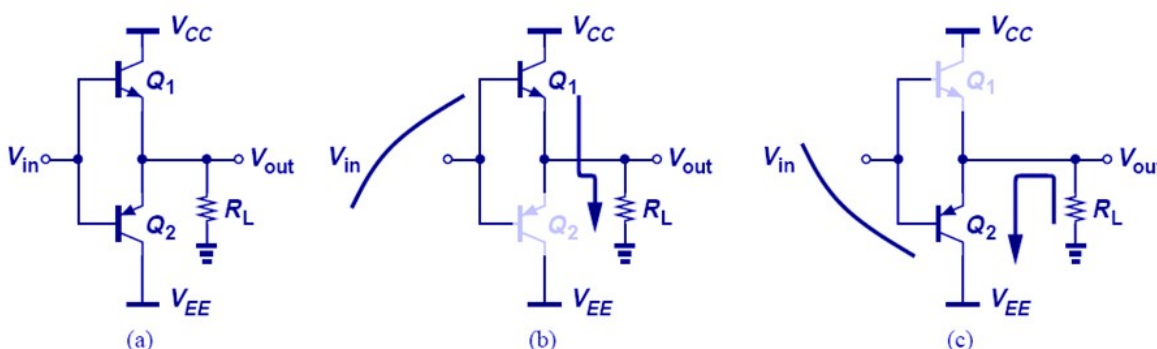
- e. Os geradores de sinais têm geralmente uma impedância interna de 50 Ω . Além disso, o valor que você programa no gerador (por exemplo, 2 V_{pico-a-pico}) pressupõe que é esta amplitude que você deseja **NA SITUAÇÃO EM QUE CONECTA UM RESISTOR DE CARGA DE 50 Ω** , ou seja, se você observar a saída do gerador (programado, por exemplo, com 2 V_{pico-a-pico}) com uma alta impedância (por exemplo, os 10 M Ω da ponta do osciloscópio, apenas) irá observar nesta carga um valor 2 vezes maior que o programado. Lembre-se desta informação, ela será útil sempre que você utilizar o gerador de sinais.
- f. Observe que além da resistência R_S usada para medir a corrente passando por R_x , há um capacitor cuja impedância, na frequência do sinal aplicado, deve ser muito pequena (poucos Ω). Este capacitor é adicionado para que **A SUA INSTRUMENTAÇÃO NÃO INFLUENCIE NA POLARIZAÇÃO DO CIRCUITO QUE VOCÊ ESTÁ MEDINDO**, ou seja, ele isola o nível DC presente na impedância que você deseja medir.
- g. Para a caracterização de R_x , você fará uso de 2 canais do osciloscópio, medido a **RAZÃO DAS AMPLITUDES ENTRE O CANAL 1 E 2** (ver figura e equações).
- h. Façamos um exemplo, pra você fixar os conceitos. Suponha que você quer medir a impedância de uma “caixa preta”, e só o professor sabe que a caixa preta abriga um resistor de 1 k Ω . Você decidiu, **ARBITRARIAMENTE**, colocar uma **resistência de medida indireta (R_S)** de **100 Ω** , programou o gerador de sinais para fornecer um sinal de 1 kHz com amplitude de **2 V_{pico-a-pico}** (que seria o valor na carga do gerador, caso ela fosse 50 Ω), e usou um capacitor de 1000 μ F (**impedância de 0,16 Ω em 1 kHz**). O valor de V_1 será de 4 V_{pico-a-pico} $\cdot (100+1000)/(50+100+1000)=3,826$ V_{pico-a-pico}. O valor de V_2 será de 4 V_{pico-a-pico} $\cdot (1000)/(50+100+1000)=3,478$ V_{pico-a-pico}. Ao aplicar a expressão para cálculo da impedância, você irá obter $R_x=R_S/((V_1/V_2)-1)=100/((3,826/3,478)-1)=999,4\Omega$. Viu?!
- i. Agora você já tem instrumentação pra medir impedâncias. Para caracterizar o ganho, meça diretamente relações de tensão (ex. valores pico-a-pico).

3. Projeto: “quebra” do problema em mais de um estágio de amplificação

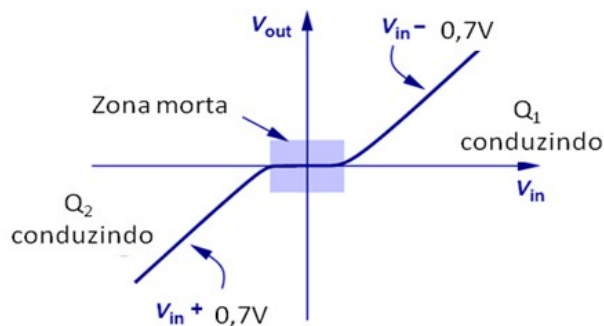
- Voltemos agora ao que você tem que fazer. Seus requisitos de projeto (ganho, impedância de entrada alta, impedância de saída baixa) dificilmente poderiam ser atendidos com um estágio de amplificação apenas. Assim sendo, o problema pode ser resolvido de inúmeras maneiras, mas **tentaremos** conseguir nossos objetivos com **apenas 2 estágios de amplificação**. Partiremos da carga em relação à fonte de sinal:
- O estágio de saída precisa ter uma baixa impedância de saída, para fornecer a corrente necessária ao alto-falante ($1\text{ V}/4\ \Omega = 250\text{ mA}$ de pico). Dentre as 3 configurações analisadas em sala de aula, a configuração coletor comum (seguidor de emissor) é a mais adaptada a uma aplicação que demanda uma baixa impedância (e alta corrente) de saída. Há uma topologia muito utilizada em estágios de saída, composta por 2 transistores em operação simétrica: a configuração push-pull (empurra-puxa, fornece-drena corrente).
- Para o estágio de entrada, usaremos um amplificador em configuração emissor-comum com resistência de degeneração. Este estágio será responsável pelo ganho em tensão do conjunto, já que o estágio de saída em configuração coletor-comum (*push-pull*) não dará ganho de tensão, mas sim de corrente.

4. Simulação e montagem do estágio de saída: configuração *push-pull*

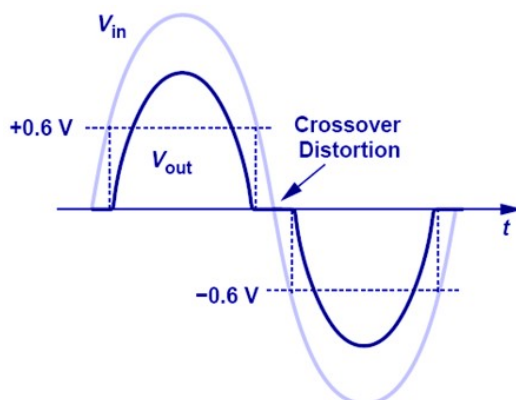
- Este estágio é o estágio de saída que alimenta uma resistência de carga de $4\ \Omega$ (o alto-falante). Veja o circuito abaixo (Razavi, cap.13).



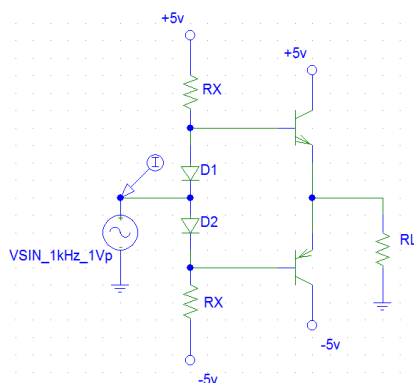
- No circuito da esquerda (a), observe que o sinal é aplicado na base dos transistores e a resistência de carga (R_L) está conectada ao emissor dos transistores. Observe ainda que os coletores estão conectados a uma das tensões de alimentação (suponha que V_{CC} é positivo, por exemplo 5V, e V_{EE} é negativo, por exemplo -5V).
- Quanto V_{in} é maior que a tensão de acionamento de Q_1 ($\approx 0,6$ a $0,7\text{V}$), o transistor Q_1 conduz, e a tensão na resistência de carga R_L é dada por aproximadamente $V_{in} - 0,7\text{V}$, enquanto que o transistor Q_2 está em corte. Da mesma forma, quando V_{in} é menor que a tensão de acionamento de Q_2 ($\approx -0,6$ a $-0,7\text{V}$), o transistor Q_2 conduz, e a tensão na resistência de carga R_L é dada por aproximadamente $V_{in} + 0,7\text{V}$, enquanto que o transistor Q_1 está em corte. Podemos então resumir a relação entrada saída do circuito acima através do gráfico abaixo:



- d. Se um sinal senoidal for aplicado a um circuito com a relação entrada-saída acima, irá gerar uma distorção chamada de “distorção de cruzamento” (crossover distortion), tal como mostrado na figura abaixo (veja que nesta figura o Razavi considera que a saída é igual à entrada menos 0,6V):



- e. Uma forma de atenuar o problema é introduzir uma tensão de aproximadamente 1,4V entre as bases dos transistores. Um circuito que implementa esta tensão é mostrado abaixo, apenas para fins educativos:

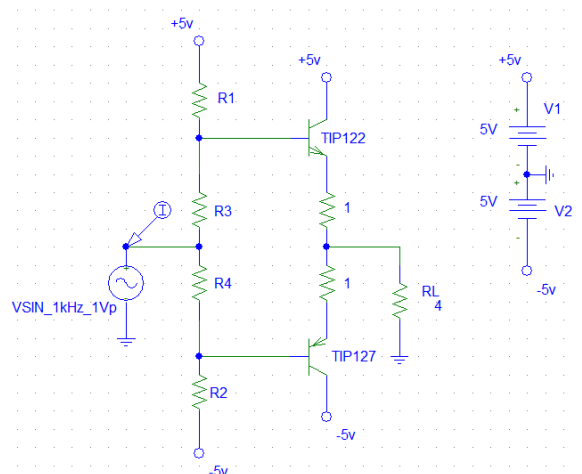


- f. Os resistores RX polarizam os diodos D1 e D2. Desta forma, quando o sinal de entrada for nulo, D1 garante que na base do NPN haverá $\approx 0,6$ a $0,7$ V, e em seu emissor haverá ≈ 0 V, o que copiará a entrada. RX também provê a corrente de base do transistor NPN. O mesmo raciocínio pode ser usado para a compreensão do funcionamento do PNP.
- g. Os transistores de potência usuais têm um β pequeno, o que iria requerer um alto valor de corrente em sua base, diminuindo a impedância de entrada do amplificador (lembre-se que



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

conforme visto no caso da topologia coletor comum, a carga aparece na entrada multiplicada por β . Se $\beta=50$, a impedância de entrada do amplificador pode ser tão baixa quanto $4\ \Omega \cdot \beta = 200\ \Omega$. Visando aumentar esta impedância de entrada, você utilizará transistores de potência DARLINGTON (lembrar que sua tensão de funcionamento é de aproximadamente 1,4 V), conforme esquemático abaixo, que É O CIRCUITO QUE VOCÊ VAI MONTAR:



- h. Os resistores R1, R2, R3 e R4 são escolhidos de modo a atender os seguintes critérios: 1- que a corrente passando por R1 e R2 seja (algumas vezes) maior que a corrente de base requerida pelos transistores; 2- que a tensão total no arranjo série R3-R4 corresponda ao limiar de condução dos 2 transistores DARLINGTON (em geral, $\approx 1,4\text{ V}$ por transistor, em um total de $\approx 2,8\text{ V}$). O resistor R1 provê a corrente de base do transistor NPN DARLINGTON (TIP122) enquanto que o resistor R2 provê a corrente de base do transistor PNP DARLINGTON (TIP127). Observe ainda que quando a tensão de entrada é nula, a tensão na base do transistor NPN DARLINGTON será de aproximadamente 1,4 V e a tensão em seu emissor será de aproximadamente 0V, ou seja, praticamente igual à entrada.
- i. Os resistores de $1\ \Omega$ são introduzidos para atenuar o processo de deriva térmica: imagine que a corrente no resistores R3 e R4 é tal que a tensão em seus terminais (cada resistor) seja de 1,4 V. Se esta tensão faz com que os transistores conduzam, por exemplo, 100 mA **com entrada nula**, a potência dissipada nos transistores será de 500 mW (Se $V_{CC} = -V_{EE} = 5\text{V}$, cada transistor tem $V_{CE} = 5\text{V}$, e portanto a potência dissipada é $V_{CC} \cdot I_{C0} = 500\text{mW}$). Neste caso, o que poderia acontecer é que a tensão nos resistores R3 e R4 polarizaria os transistores com uma determinada **corrente quiescente** (na ausência de sinal na entrada) que aqueceria o transistor, e este portanto conduziria uma corrente ainda maior (lembre-se, se a temperatura aumentar e V_{BE0} for o mesmo, I_{C0} aumentará). Esta corrente ainda maior aqueceria os transistores ainda mais, num processo de realimentação positiva (embalo térmico) até que algum mecanismo externo ou interno limite o valor da corrente, ou ainda que o dispositivo seja destruído. Em circuitos mais elaborados, os resistores R3 e R4 são substituídos por diodos em contato térmico com os transistores, para que também reduzam a tensão em seus terminais em caso de aquecimento.



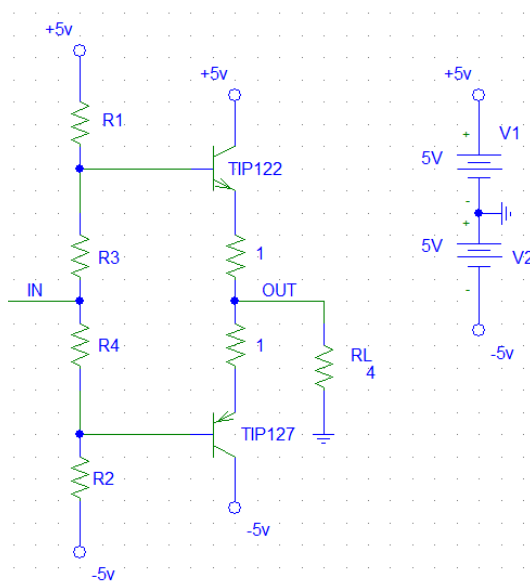
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

- j. Os resistores de $1\ \Omega$ executam exatamente a mesma função dos resistores de degeneração de emissor: um aumento de corrente quiescente no transistor resultaria no aumento da tensão na resistência, que por sua vez diminuiria a tensão na base-emissor já que a tensão total (fixada pelos resistores R3 e R4, em conjunto com R1 e R2) permanece a mesma, tendendo a diminuir o processo que causou o aumento de corrente.
- k. A tensão na resistência de carga (alto-falante) deve ir de 1V a -1V. Quando a tensão no alto falante de $4\ \Omega$ for de 1V, a tensão no resistor de $1\ \Omega$ será de 0,25 V e a tensão na base do transistor TIP122 será de aproximadamente $\approx 1,4 + 1 + 0,25 = 2,65\text{ V}$. A corrente no alto-falante será de $1\text{ V}/4\ \Omega = 250\text{ mA}$. Usaremos este valor como valor MÁXIMO da corrente de emissor dos transistores.
- l. Para este nível de corrente, qual o valor (típico) de β que você achou no datasheet do transistor NPN DARLINGTON TIP122 (na simulação, você vai obter o β do modelo que é próximo do datasheet. Na montagem, você observou que o β era ligeiramente superior)? $\beta_{\text{TIP122}} = \underline{\hspace{2cm}}$
- m. Dado este valor, calcule o valor da corrente de base necessária à corrente de emissor máxima de 250 mA calculada no item k. $I_{\text{BOMAX}} = \underline{\hspace{2cm}}$
- n. Na definição dos resistores R1, R2, R3 e R4 há um compromisso que afeta a impedância de entrada do circuito (haja compromisso): se a corrente passando por eles for muito maior que a corrente de base dos transistores, o que se conseguiria com valores pequenos para estes resistores, a impedância vista na entrada do amplificador seria diminuída, o que poderia reduzir o ganho do primeiro estágio (lembre-se, a impedância vista na entrada do estágio push-pull é a carga do primeiro estágio)
- o. Comece, pois, por considerar uma corrente em passando R1, R2, R3 e R4 **na ausência de sinal** IGUAL a $2 \cdot I_{\text{BOMAX}}$. Como a tensão em R3 deve ser próxima de 1,4 V, seu valor será dado por $R3(=R4) = 1,4\text{ V}/(2 \cdot I_{\text{BOMAX}})$. A tensão no resistor R1 será, na ausência de sinal, $5\text{ V} - 1,4\text{ V} = 3,6\text{ V}$. Assim, seu valor deve ser dado por $R1(=R2) = 3,6\text{ V}/(2 \cdot I_{\text{BOMAX}})$. Simule seu circuito com estes valores. Verifique se há saturação na saída. Verifique a **impedância vista na entrada do circuito com a carga de $4\ \Omega$ conectada**. Verifique a relação entre a tensão na carga e a tensão da fonte. Anote os valores.
- p. Repita o processo, mas desta vez considere uma corrente em passando R1, R2, R3 e R4 **na ausência de sinal** IGUAL a $5 \cdot I_{\text{BOMAX}}$. Refaça as simulações. Anote valores. Compare. Se você definir uma figura de mérito (FOM, *Figure Of Merit*) como a razão entre o ganho de tensão e a impedância vista na entrada com carga conectada ($\text{FOM} = \text{Ganho}/\text{impedância}$), em qual das duas situações o FOM é maior? Utilize esta condição.
- q. Tendo decidido pelo valor dos resistores, utilize apenas os resistores disponíveis no LEAD (ver anexo I), e, para cada um dos resistores R1, R2, R3 e R4, utilize um arranjo de no máximo 2 resistores do LEAD (com efeito, você não necessita de tanta precisão. Se decidir usar apenas um resistor, tudo bem. Só não coloque um arranjo para o qual a diferença de tensão entre as bases seja maior que 2,8 V, o que ocasionaria uma **corrente quiescente** excessiva nos transistores). Denominaremos os valores de R1 ($=R2$), R2, R3 ($=R4$) e R4 com valores do LEAD de $R_{1\text{REAL}}$, $R_{2\text{REAL}}$, $R_{3\text{REAL}}$ e $R_{4\text{REAL}}$.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

- r. Faça uma simulação DC **SEM A FONTE DE SINAL** (retire-a) com os valores R_{1REAL} , R_{2REAL} , R_{3REAL} e R_{4REAL} , para verificar a tensão na entrada e na saída (que devem ser próximas de zero) e a corrente quiescente dos transistores. O setup é mostrado na figura a seguir.



- s. Preencha a tabela abaixo com valores **oriundos da sua simulação**, pois ela deverá ser enviada ao professor antes do início do experimento. A segunda parte da tabela (EXPERIMENTO) servirá para você anotar os valores obtidos no experimento. No experimento, você medirá a corrente quiescente dos transistores **medindo a tensão nos resistores de 1Ω** (neste caso, as correntes serão numericamente iguais à tensão nestes resistores).

Simulação 1: PUSH-PULL – análise DC						Valores esperados no experimento			
R_{1REAL} (= R_{2REAL}) (Ω)	R_{3REAL} (= R_{4REAL}) (Ω)	$V_{IN}(V)$	$V_{OUT}(V)$	$I_{EOTIP122}$ (A)	$I_{EOTIP127}$ (A)	V_{IN} ±0,2V	V_{OUT} ±0,2V	$I_{EOTIP122}$ ±50%	$I_{EOTIP127}$ ±50%
EXPERIMENTO 1: PUSH-PULL – análise DC						Diferença (%) entre simulação e experimento			
$V_{IN}(V)$	$V_{OUT}(V)$	$I_{EOTIP122}$ (A)	$I_{EOTIP127}$ (A)	V_{IN}	V_{OUT}	$I_{EOTIP122}$	$I_{EOTIP127}$		

- t. Faça uma simulação transiente com os valores R_{1REAL} , R_{2REAL} , R_{3REAL} e R_{4REAL} , e use uma fonte de 1 V de amplitude e frequência de 1 kHz na entrada do amplificador. Anote o valor de amplitude de tensão na resistência de carga (4 Ω) e a corrente fornecida pela fonte, desta forma determinando a **impedância vista na entrada do circuito em condição de carga** (razão entre a amplitude de tensão da fonte, 1 V, e a amplitude da corrente fornecida por ela), que chamaremos de $Z_{INCARGA}$.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

- u. Preencha a tabela abaixo com valores **oriundos da sua simulação**, pois ela deverá ser enviada ao professor antes do início do experimento. A segunda parte da tabela (EXPERIMENTO) servirá para você anotar os valores obtidos no experimento. No experimento, você medirá Z_{INCARGA} com a utilização de um **resistor de medida indireta de 1 k Ω** .

Simulação 2: PUSH-PULL – análise transiente				Faixa de valores esperados no experimento	
$R_{1\text{REAL}}$ (= $R_{2\text{REAL}}$) (Ω)	$R_{3\text{REAL}}$ (= $R_{4\text{REAL}}$) (Ω)	$V_{\text{CARGA}}/V_{\text{IN}}$	Z_{INCARGA} (Ω)	$V_{\text{CARGA}}/V_{\text{IN}} \pm 20\%$	$Z_{\text{INCARGA}} \pm 20\%$
EXPERIMENTO 2: PUSH- PULL – análise transiente				Diferença (%) entre simulação e experimento	
$V_{\text{CARGA}}/V_{\text{IN}}$		Z_{INCARGA} (Ω)		$V_{\text{CARGA}}/V_{\text{IN}}$	Z_{INCARGA}

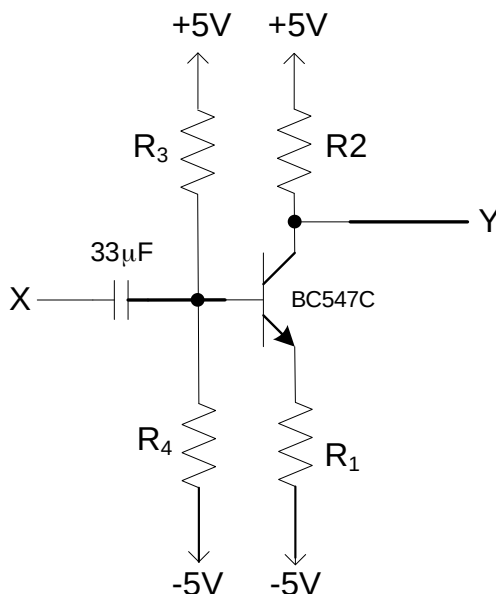
- v. Comente sobre eventuais discrepâncias.

5. Simulação e montagem do estágio de entrada: configuração emissor-comum



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

- a. Sabe-se que uma das características de um amplificador emissor-comum degenerado é que ele apresenta uma resistência de entrada relativamente alta. Se esta resistência for de, por exemplo $5\text{ k}\Omega$, a maior parte do sinal da fonte (100 mV_p) será aplicada ao amplificador. Além disso, o resistor de degeneração pode garantir que apenas uma pequena parte do sinal esteja efetivamente aplicada à junção base-emissor, de forma a evitar distorção não-linear. Observe o circuito abaixo:



- b. Considere inicialmente que $R1 \gg 1/g_m$. Primeiramente mostre que o ganho do amplificador (V_Y/V_X) será dado aproximadamente por $R2/R1$: Mostre seus cálculos abaixo:
- c. A saída deste amplificador (ponto Y) será **conectada diretamente na entrada do push-pull**, e portanto deve ter tensão de polarização NULA (**ponto Y = $V_{CO} = 0\text{ V}$**), para que não haja tensão DC na entrada (e portanto na saída) do *push-pull*, o que poderia ocasionar mal funcionamento do alto-falante.
- d. Para determinar o valor de $R2$, você pode usar inicialmente o seguinte critério: que a corrente DE POLARIZAÇÃO em $R2$ seja 5 vezes maior que a corrente que o estágio deve fornecer ao *push-pull* (rever primeira parte. O valor pode ser obtido por intermédio da impedância vista na entrada do *push-pull*, que já foi simulada). Este valor será denominado I_{R2BIAS} .
- e. Para obter $V_Y = V_{CO} = 0\text{ V}$, é preciso que $V_{R2} = 5\text{ V}$. Assim: $R2 = V_{R2}/I_{R2BIAS} = 5/I_{R2BIAS}$. Após seu cálculo, determine o arranjo de até 2 resistores disponíveis no LEAD que têm equivalente mais próximo deste valor. O valor real de $R2$ será denominado R_{2REAL} .
- f. O ganho COM carga do amplificador *push-pull*, ou seja, a relação entre a saída e a entrada do amplificador levando-se em conta a impedância de entrada do *push-pull* será dada por $(R_{2REAL} // Z_{INpush-pull})/R1$. Determine o valor de $R1$ para que você obtenha na saída um sinal de 1 V de amplitude quando o amplificador for estimulado por uma fonte com amplitude de 100



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

- mV_P (ou seja, ganho com carga de 10 V/V). Com base em um arranjo de até 2 resistores disponíveis no LEAD, determine o valor real que mais se aproxima do valor que você acaba de calcular. Este valor será denominado de R_{1REAL} .
- g. Supondo que o β do transistor BC547C é de 500 e que $R_1 \gg 1/g_m$ (verifique!!), a impedância vista da base do transistor (sem contar com os resistores de polarização de base) é dada por $\beta \cdot R_1$.
- h. Já que estamos supondo $\beta=500$, e a corrente de polarização (coletor) é igual a I_{R2BIAS} , qual o valor de corrente de base (I_{B0})? $I_{B0} = \underline{\hspace{2cm}}$
- i. Supondo $V_{BE0}=0,7V$, qual deve ser o valor de tensão na base (V_{B0}) em relação ao terra? $V_{B0} = \underline{\hspace{2cm}}$
- j. Agora você deve projetar o divisor resistivo composto por R_3 e R_4 para que você tenha na base uma tensão próxima à que você calculou no item anterior. Suponha que a corrente no resistor R_3 deva ser 10 vezes maior que a corrente de base. A tensão neste resistor é $(5-V_{B0})$, e a corrente é $10 \cdot I_{B0}$. Qual o valor de R_3 ? $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$
- k. Considerando um arranjo de até 2 resistores disponíveis no LEAD, determine o valor REAL de R_3 , que chamaremos de R_{3REAL} .
- l. Com base nas leis de Kirchoff, qual o valor de R_4 ? $R_4 = \underline{\hspace{2cm}}$
- m. Considerando um arranjo de até 2 resistores disponíveis no LEAD, determine o valor REAL de R_4 , que chamaremos de R_{4REAL} .
- n. A partir de agora, consideraremos apenas R_{1REAL} , R_{2REAL} , R_{3REAL} e R_{4REAL} .
- o. Qual o valor da resistência equivalente ao paralelo de R_{3REAL} e R_{4REAL} ? $R_{3REAL} // R_{4REAL} = \underline{\hspace{2cm}}$
- p. Qual o valor da impedância de entrada do circuito? Resp: $Z_{in} = \underline{\hspace{2cm}}$
- q. Esta impedância é (muito) maior que a impedância série da fonte de sinal (1 k Ω)?
- r. Se sim, seu projeto do primeiro amplificador terminou. Senão, abra mão do requerimento da corrente no resistor R_3 ser 10 vezes maior que a corrente na base (e assim seu circuito estará menos estável em termos de polarização, mas a engenharia é feita de compromissos). Tente $I_{R3}=5 \cdot I_{B0}$ e refaça seus cálculos. Senão, reduza ainda mais a relação e refaça seus cálculos.
- s. Você deve agora simular o circuito, para comparar os valores calculados com os valores simulados. Inicialmente, faça uma simulação do ponto de polarização, para confirmar que as tensões e correntes estão como você previu pelos cálculos (sobretudo o valor da tensão no **ponto Y**, que não deve passar de poucas dezenas de mV).
- t. Preencha a tabela abaixo com valores **oriundos da sua simulação**, pois ela deverá ser enviada ao professor antes do início do experimento. Todas as tensões devem ser referenciadas ao terra. A segunda parte da tabela (EXPERIMENTO) servirá para você anotar os valores obtidos no experimento.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

R_{1REAL} (Ω)	R_{2REAL} (Ω)	R_{3REAL} (Ω)	R_{4REAL} (Ω)	V_{CO} (V)	V_{BO} (V)	V_{EO} (V)	$V_{CO} \pm 0,2V$	$V_{BO} \pm 0,1V$	$V_{EO} \pm 0,05V$
EXPERIMENTO 3: Emissor-comum – análise DC							Diferença (%) entre simulação e experimento		
V_{CO} (V)		V_{BO} (V)		V_{EO} (V)		V_{CO}	V_{BO}	V_{EO}	

- u. Caso no experimento você observe uma tensão no ponto Y cujo módulo é maior que 100 mV, tente ajustar, na hora do experimento, um dos resistores de polarização de base (R_{3REAL} ou R_{4REAL}), para que a tensão neste ponto seja limitada a 100 mV. Quando estiver preenchendo o Pré-relatório, reflita sobre como você deverá modificar o resistor R_{3REAL} (por exemplo), aumentando-o ou diminuindo-o, para que a tensão no ponto Y aumente ou diminua. Quais os valores finais no experimento dos resistores R_{3REAL} e R_{4REAL} ? Resp: _____
- v. Voltando às simulações, agora conecte o estágio push-pull. Você deve fazer uma simulação no domínio do tempo ("Transient"). Utilize na entrada do estágio emissor-comum uma fonte de tensão senoidal (VSIN), que representa VIN, em série com um resistor de 1 k Ω , com os seguintes parâmetros: VOFF=0 (offset DC de 0V); VAMPL=0.1 (amplitude de 100mV); FREQ=1kHz. Para a configuração da simulação, utilize: Final time=10e-3s; Step Ceiling=1us.
- w. Mostre o seu esquemático aqui (bem grande, pra você usar pra montar o experimento):
- x. Simule e copie a forma de onda nos diversos pontos do circuito, e cole-as abaixo
- y. Os resultados de simulação estão de acordo com o que você esperava?
- z. Preencha a tabela abaixo com valores **oriundos da sua simulação**, pois ela deverá ser enviada ao professor antes do início do experimento. A segunda parte da tabela (EXPERIMENTO) servirá para você anotar os valores obtidos no experimento. No experimento, você medirá Z_{in} com a utilização de um resistor de medida indireta de 1 k Ω .

Simulação 4: Estágio de entrada - Transiente	Faixa de valores esperados no experimento
---	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

$R_{1\text{REAL}}$ (Ω)	$R_{2\text{REAL}}$ (Ω)	$R_{3\text{REAL}}$ (Ω)	$R_{4\text{REAL}}$ (Ω)	$V_{\text{CARGA}}/V_{\text{IN}}$	Z_{IN} (Ω)	$V_{\text{CARGA}}/V_{\text{IN}} \pm 20\%$	$Z_{\text{IN}} \pm 10\%$
EXPERIMENTO 4: Estágio de entrada - Transiente						Diferença (%) entre simulação e experimento	
$V_{\text{CARGA}}/V_{\text{IN}}$				Z_{IN} (Ω)		$V_{\text{CARGA}}/V_{\text{IN}}$	Z_{IN} (Ω)

6. Avaliação do circuito completo

- Na montagem, conecte um fone de ouvido na saída, e observe a forma de onda. Cole a seguir figuras obtidas. Comente sobre o que você aprendeu, e sobre os procedimentos de projeto.

ANEXO I: Lista de componentes disponíveis no LEAD



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Componente	Part N#	Valor	Pot.	Part N#	Valor	Pot.
Resistor	1R	1	1/4W	10K	10k	1/4W
Resistor	1R2	1.2	1/4W	12K	12k	1/4W
Resistor	2R2	2.2	1/4W	15K	15k	1/4W
Resistor	3R3	3.3	1/4W	18K	18k	1/4W
Resistor	4R7	4.7	1/4W	22K	22k	1/4W
Resistor	5R6	5.6	1/4W	27K	27k	1/4W
Resistor	8R2	8.2	1/4W	33K	33k	1/4W
Resistor	10R	10	1/4W	47K	47k	1/4W
Resistor	22R	22	1/4W	56K	56k	1/4W
Resistor	33R	33	1/4W	68K	68k	1/4W
Resistor	47R	47	1/4W	82K	82k	1/4W
Resistor	56R	56	1/4W	100K	100k	1/4W
Resistor	68R	68	1/4W	150K	150k	1/4W
Resistor	82R	82	1/4W	180K	180k	1/4W
Resistor	100R	100	1/4W	220K	220k	1/4W
Resistor	180R	180	1/4W	270K	270k	1/4W
Resistor	220R	220	1/4W	330K	330k	1/4W
Resistor	270R	270	1/4W	470K	470k	1/4W
Resistor	330R	330	1/4W	560K	560k	1/4W
Resistor	470R	470	1/4W	680K	680k	1/4W
Resistor	560R	560	1/4W	820K	820k	1/4W
Resistor	680R	680	1/4W	1M	1M	1/4W
Resistor	820R	820	1/4W			
Resistor	1K	1k	1/4W			
Resistor	1K2	1.2k	1/4W			
Resistor	1K8	1.8k	1/4W			
Resistor	2K7	2.7k	1/4W			
Resistor	3K3	3.3k	1/4W			
Resistor	4K7	4.7k	1/4W			
Resistor	5K6	5.6k	1/4W			
Resistor	6K8	6.8k	1/4W			
Resistor	8K2	8.2k	1/4W			