



**TÉCNICO**  
LISBOA

# Eletrónica I

2º Semestre 2019/2020

## 2º Trabalho de Laboratório Amplificador com Transístores Bipolares

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Área Científica de Eletrónica

Histórico de revisões

Data	Versão	Descrição	Autores
Outubro 2008	1	Versão inicial	Teresa Mendes de Almeida, Fernando Gonçalves
Outubro 2010	2	Primeira revisão	
Outubro 2016	3	Segunda revisão – Alteração da carga e alimentação variável	Pedro Vítor
Outubro 2017	4	Mudança de análise para dimensionamento. Adaptação do texto	Helena Sarmento, Pedro Vítor Helena Sarmento
Outubro 2019	5	Versão 1º e 2º Semestre 2019/2020	Pedro Vítor

# 1. Introdução

Pretende-se com este trabalho de laboratório analisar o funcionamento de um circuito amplificador com transístores bipolares e dimensionar alguns dos seus componentes. O amplificador, realizado de forma discreta, é constituído por dois andares de amplificação, ligados em cascata, que utilizam transístores bipolares NPN BC547B [1].

Serão considerados diversos aspetos deste amplificador, nomeadamente o ponto de funcionamento em repouso, os ganhos de tensão, as resistências de entrada e de saída na banda de passagem e ainda a resposta em frequência.

O trabalho de laboratório é realizado em duas sessões:

- Antes da primeira sessão deve ser realizado o dimensionamento dos componentes indicados e efetuada a simulação elétrica do circuito. O simulador elétrico usado é o programa LTspice [2].
- Na primeira sessão devem ser apresentados ao docente os resultados da análise teórica e do dimensionamento e os resultados da simulação. Caso disponham de tempo livre, podem aproveitar esta sessão para a montagem do circuito e a realização de algumas medidas experimentais.

**Nota:** O circuito deve ser montado numa placa de *breadboard* disponibilizada no laboratório ou trazida pelos alunos. Os componentes necessários serão entregues na primeira sessão do trabalho.

- A segunda sessão de laboratório serve para realizar ou concluir as medições experimentais e terminar o relatório.

# 2. Material de Laboratório e Equipamento

Para a realização do trabalho experimental é necessário o seguinte material e equipamento:

- 2 Transístores bipolares NPN: BC547B.
- Resistências:  $330\Omega$ ,  $1k\Omega$ ,  $12k\Omega$ ,  $39k\Omega$ ,  $68k\Omega$ .
- Condensadores: dois de  $10\mu F$  e um de  $0,1\mu F$ .
- Resistências ( $R_{E2}$ ,  $R_C$  e  $R_{E3}$ ) dependentes do dimensionamento.
- Placa de *breadboard* (propriedade do grupo de alunos) e fios para ligações.
- Multímetro, Osciloscópio e Gerador de sinais.
- Fonte de tensão DC.

### 3. Análise teórica com dimensionamento

Considere o circuito amplificador da Figura 1, que é constituído por dois andares de amplificação, identificados na Figura 2. O primeiro é um amplificador com um transístor em montagem de emissor comum degenerado e o segundo um amplificador seguidor de emissor ou coletor comum.

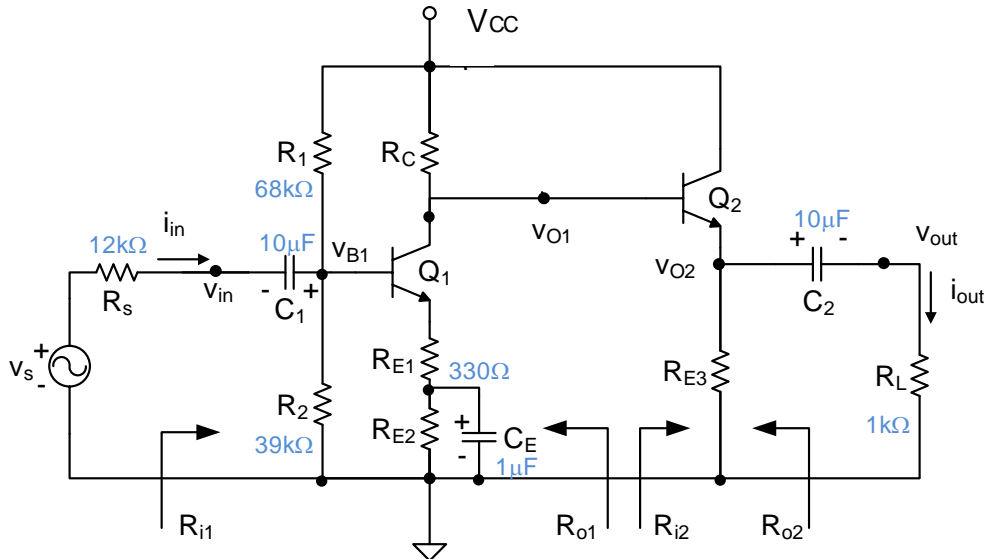


Figura 1 – Amplificador discreto com transístores bipolares.

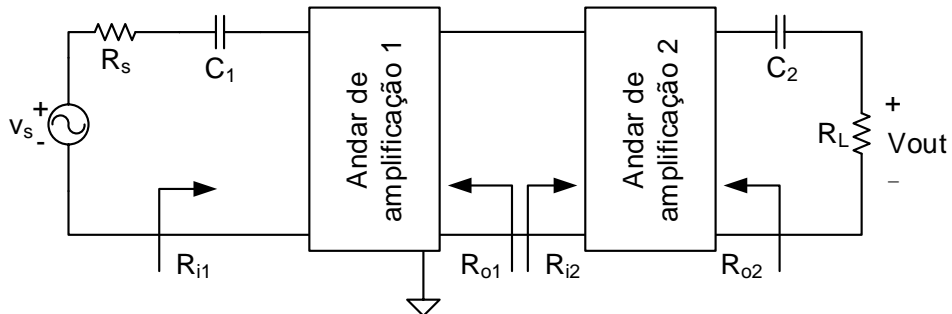


Figura 2 – Andares de amplificação ligados em cascata.

Tabela 1 - Valores de  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{E1}$ ,  $R_L$ ,  $C_E$ ,  $C_1$  e  $C_2$

$R_s$	$R_1$	$R_2$	$R_{E1}$	$R_L$	$C_E$	$C_1$	$C_2$
12k $\Omega$	68k $\Omega$	39k $\Omega$	330 $\Omega$	1k $\Omega$	1 $\mu$ F	10 $\mu$ F	10 $\mu$ F

Tabela 2 - Valores dos parâmetros de  $Q_1$  e  $Q_2$ .

$V_{BEon}$ (V)	$V_{CEsat}$ (V)	$\beta_F = \beta_0$	$V_A$ (V)	$V_T$ (mV)
0,6	0,2	300	$\infty$	26

- 3.1. Dimensione os valores das resistências  $R_C$ ,  $R_{E2}$  e  $R_{E3}$  de modo a obter os valores especificados na Tabela 5 para:
- As correntes  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$  no ponto de funcionamento em repouso.
  - O valor do ganho de tensão do primeiro andar de amplificação  $A_{1L} = v_{o1}/v_{in}$ , na zona das médias frequências ( $C_1$ ,  $C_E$  e  $C_2 \rightarrow \infty$ ).

**Nota:** Admita  $R_{i2} \gg R_C$ . Os valores escolhidos para as resistências devem ser valores normalizados da série E24 e com uma tolerância de 5% [3].

- 3.2. Considerando os valores escolhidos para as resistências  $R_C$ ,  $R_{E2}$  e  $R_{E3}$ , determine o ponto de funcionamento em repouso:  $V_{B1}$ ,  $I_{C1}$ ,  $V_{CE1}$ ,  $I_{C2}$  e  $V_{CE2}$ . Estime o erro de  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$  face aos valores especificados na Tabela 5.
- 3.3. Determine as impedâncias  $R_{i1}$  e  $R_{i2}$ .
- 3.4. Calcule o ganho de tensão do primeiro andar de amplificação  $A_{1L} = v_{o1}/v_{in}$ , considerando o efeito de carga ( $i_{o1} \neq 0$ ). Estime o erro de  $A_{1L}$  relativamente ao valor da Tabela 5.
- 3.5. Calcule o ganho de tensão do segundo andar de amplificação  $A_{2L} = v_{out}/v_{o1}$ , considerando os efeitos de carga ( $i_{out} \neq 0$ ). Com base nos ganhos de tensão  $A_{1L}$  e  $A_{2L}$  determine os ganhos de tensão do amplificador carregado  $A'_v = v_{out}/v_{in}$  e  $A_v = v_{out}/v_s$ .
- 3.6. Qual seria o ganho do primeiro amplificador carregado com  $R_L$ ,  $A_{v1RL} = v_{o1}/v_s$ , se não fosse usado o segundo andar amplificador (ligando  $C_2$  e  $R_L$  diretamente no coletor de  $Q_1$ ). Com base nos valores das resistências e dos ganhos de tensão calculados, explique porque há vantagem em serem usados dois andares amplificadores.
- 3.7. Admitindo que a frequência de corte inferior do amplificador ( $f_L$ ) é unicamente imposta pelo condensador  $C_E$  ( $C_E \ll C_1 = C_2$ ), obtenha uma estimativa do seu valor.
- 3.8. Determine a característica de transferência  $v_o(v_i)$  do circuito. Assinale as diferentes zonas de funcionamento de cada um dos transístores, bem como os valores das tensões  $v_o$  e  $v_i$  nos pontos de transição entre as diferentes zonas de funcionamento.

## 4. Simulação

Simule o circuito, utilizando o LTspice e considerando os transístores BC547B descritos pelo seguinte modelo:

```
.model BC547B NPN (IS=2.39E-14 NF=1.008 ISE=3.545E-15 NE=1.541 BF=294.3  
+ IKF=0.1357 VAF=63.2 NR=1.004 ISC=6.272E-14 NC=1.243 BR=7.946 IKR=0.1144  
+ VAR=25.9 RB=1 IRB=1E-06 RBM=1 RE=0.4683 RC=0.85 XTB=0 EG=1.11 XTI=3  
+ CJE=4.858E-11 VJE=0.65 XTF=120VTF=2.643 ITF=0.7495 PTF=0 CJC=6.928E-12  
+ VJC=0.3997 MJC=0.2955 XCJC=0.6193 TR=1E-32 CJS=0 VJS=0.75 MJS=0.333)
```

### Notas:

Apresente os resultados das simulações através de figuras inseridas no relatório, indicando o que pretende calcular e identificando o ou os valores obtidos.

A fim de facilitar a identificação das formas de onda nos gráficos dos resultados, dê nomes ilustrativos às variáveis ( $v_s$ ,  $v_{in}$ ,  $v_{B1}$ ,  $R_{i1}$ , etc.), selecionando no menu “*Plot Settings*” a opção “*Notes & Annotations*”.

Para usar escalas diferentes, que permitam uma visualização mais legível, pode criar várias janelas de visualização. O comando é “*Add plot pane*” que pode selecionar no menu “*Plot Settings*”.

- 4.1. Faça uma análise do ponto de funcionamento em repouso e determine as seguintes tensões e correntes:  $v_{B1}$ ,  $v_{BE1}$ ,  $v_{CE1}$ ,  $v_{O1}$ ,  $v_{BE2}$ ,  $v_{CE2}$ ,  $I_{C1}$  e  $I_{C2}$ . Apresente estes valores no esquema do circuito.
- 4.2. Faça uma análise AC e obtenha os valores das impedâncias  $R_{i1}$  e  $R_{i2}$ , no centro da banda de passagem ( $f_0$ ), sendo esta frequência obtida no ponto seguinte (4.3), o qual deve ser realizado previamente.
- 4.3. Faça uma análise AC e obtenha os valores dos ganhos  $A_{1L}$ ,  $A_{2L}$ ,  $A'_v$  e  $A_v$ . Obtenha o valor da frequência média da banda de passagem do amplificador a partir da característica de  $A_v$ , obtido através de média geométrica ( $f_0 = \sqrt{f_L f_H}$ ), sendo  $f_L$  e  $f_H$ , respetivamente, as frequências limite inferior e superior.
- 4.4. Faça uma análise no domínio do tempo para um sinal de entrada sinusoidal com 100 mV de amplitude e de frequência  $f_0$ . Obtenha um gráfico com as tensões  $v_s(t)$ ,  $v_{in}(t)$ ,  $v_{O1}(t)$  e  $v_{out}(t)$ .
- 4.5. Aumente a amplitude do sinal de entrada até se verificar distorção forte no sinal de saída (distorção na parte superior e inferior de  $v_{O1}(t)$ ). Visualize as tensões  $v_s(t)$ ,  $v_{O1}(t)$  e  $v_{ce1}(t)$  e sobre a forma de onda de  $v_{O1}(t)$  identifique, justificando, as diferentes zonas de funcionamento do transístor  $Q_1$ .
- 4.6. Faça uma análise no domínio da frequência para determinar a resposta em frequência do amplificador. Visualize  $|v_{out}(\omega)/v_s(\omega)|$  em dB para frequências entre 1 Hz e 100 MHz. Identifique o ganho para as frequências intermédias e determine as frequências de corte a -3 dB,  $f_L$  e  $f_H$ . Calcule a largura de banda do amplificador,  $\Delta f = f_H - f_L$ . Identifique no

modelo do transistor os condensadores responsáveis pela limitação superior da banda.

## 5. Trabalho Experimental

### PRECAUÇÕES:

- **Nunca aplique sinais na entrada no circuito sem ter a certeza de que o circuito já está alimentado, ou seja, que  $V_{CC}$  foi ajustado para o valor indicado par o seu grupo.**
- **Antes de aplicar um sinal na entrada do circuito visualize-o no osciloscópio e verifique se corresponde ao sinal pretendido.**

- 5.1. Identifique na Figura 1 os terminais dos transístores, consultando [3]. Monte o circuito na placa de *breadboard* sem incluir os condensadores  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_E$  e as resistências  $R_S$  e  $R_L$ . Não ligue a fonte de alimentação.

**Notas:** Tente manter a correspondência entre o circuito montado e o esquema do circuito da Figura 1 (bases dos transístores do lado esquerdo, coletores em cima, emissores em baixo,  $V_{CC}$  em cima, GND em baixo, resistências na mesma posição horizontal/vertical, etc.). Use fios curtos nas ligações.

- 5.2. Ajuste a fonte de tensão de alimentação  $V_{CC}$  para o valor indicado na Tabela 5. Só depois de ter verificado que o nível de tensão está correto é que deve proceder à ligação da fonte ao circuito.

Com o voltímetro meça e registre as tensões da alimentação  $V_{CC}$  e dos terminais dos transístores  $V_{B1}$ ,  $V_{C1}$ ,  $V_{E1}$ ,  $V_{C2}$  e  $V_{E2}$ . Determine os valores de  $I_{C1}$  e  $I_{C2}$  a partir da diferença de potencial aos terminais de  $R_C$  e  $R_{E3}$ , respetivamente.

Se os valores das tensões não corresponderem ao esperado, abra a ligação entre os dois andares (ligação do coletor de  $Q_1$  à base de  $Q_2$ ). Verifique primeiro a montagem do primeiro andar amplificador, medindo as tensões pedidas. Verifique depois a montagem do segundo andar e ligue-o ao primeiro, voltando a medir as tensões pedidas.

- 5.3. Inclua no circuito os condensadores e as resistências  $R_S$  e  $R_L$ . Certifique-se que não há engano na montagem, verificando que não há qualquer alteração nas tensões DC medidas anteriormente.
- 5.4. Ligue o gerador de sinais e ajuste-o para obter um sinal sinusoidal de 100 mV de amplitude e de frequência  $f_0$  (valor obtido no ponto 4.3). Aplique o sinal do gerador na entrada do circuito. Colocando todos os canais do osciloscópio em modo de acoplamento AC, observe e registre os sinais  $V_s$ ,  $V_{in}$ ,  $V_{o1}$  e  $V_{out}$ .

**Nota:** Em cada gráfico identifique os sinais presentes e não se esqueça de ajustar convenientemente o posicionamento da tensão de referência (GND) para os vários canais.

- 5.5. Através do osciloscópio meça as amplitudes dos sinais  $v_s$ ,  $v_{in}$ ,  $v_{o1}$  e  $v_{out}$ . Com base nas amplitudes medidas experimentalmente, calcule os ganhos de tensão  $A_{1L}$ ,  $A_{2L}$ ,  $A'_v$  e  $A_v$ .
- 5.6. Aumente a amplitude do sinal de entrada até que se verifique distorção significativa em  $v_{o1}$ . Registe as formas de onda dos sinais de entrada e de saída,  $v_s$  e  $v_{o1}$ . Identifique, justificando, as diferentes zonas de funcionamento do transistor  $Q_1$ .
- 5.7. Reponha a amplitude do sinal de entrada em 100 mV e ligue apenas os canais 1 ( $v_s$ ) e 2 ( $v_{out}$ ) do osciloscópio. Reduza e aumente a frequência do sinal e observe a tensão  $v_{out}$  em modo AC. Registe a frequência de corte inferior,  $f_L$ , e a frequência de corte superior,  $f_H$ , do circuito amplificador, correspondentes aos pontos em que o ganho reduziu 3dB face ao ganho à frequência central ( $\approx 50kHz$ ) ( $-3dB = 20 \times \log_{10}(1/\sqrt{2})$ ). Calcule a largura de banda do amplificador ( $LB = f_H - f_L$ ).

**Nota:** Redução do ganho de 3dB corresponde a multiplicar por um fator de  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ .

## 6. Relatório

O relatório é entregue até 24 horas após a final da aula em que se realiza a segunda sessão de laboratório (por exemplo se a aula terminar às 17:00 horas o relatório terá que ser entregue até às 17:00 horas do dia seguinte).

A entrega do relatório é feita através de *upload* no sistema Fénix (Avaliação → Projetos) de um ficheiro pdf obrigatoriamente com o nome LAB1-gr-n1-n2-n3.pdf, sendo gr o nº do grupo (01, 02, 03, etc.) e n1, n2, n3 os números dos alunos.

### Estrutura

O relatório deve obrigatoriamente respeitar a seguinte estrutura sequencial de secções:

- **Análise teórica** que inclui as respostas às questões 3.1 a 3.8.

#### Notas:

- Não devem ser apresentadas deduções, mas apenas as fórmulas usadas e a respetiva referência ao texto de onde foram obtidas (por exemplo, o livro ou as transparências das aulas teóricas). Caso pretendam incluir deduções, devem colocá-las em anexo.
  - Todas as aproximações feitas nos cálculos devem ser justificadas.
- **Simulação** que inclui as respostas às questões 4.1 a 4.6. Apresente figuras com o resultado das simulações. Sempre que se justifique assinale os valores pedidos sobre os próprios

gráficos.

- **Trabalho experimental** que inclui as respostas referentes às questões 5.2 e 5.4 a 5.7.
- **Análise dos resultados** que compara os valores obtidos e comenta as diferenças encontradas, na qual deverão ser incluídas as duas tabelas seguintes cujo modelo é o ficheiro Excel disponibilizado na página da disciplina e que resume os valores que obteve ao longo do trabalho:
  - Análise relativa à Tabela 3, que compara os valores de  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$  e  $A_{1L}$ , especificados na Tabela 5 (Valores especificados), com os valores teóricos obtidos após dimensionamento das resistências  $R_C$ ,  $R_{E2}$  e  $R_{E3}$ .

Tabela 3 - Comparação de  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$  e  $A_{1L}$

			Teóricos		
			Valores especificados	Valores obtidos	Comparação
PFR dos transístores	$I_{C1}$	(mA)		3.2 e 3.3	
	$I_{C2}$	(mA)			
Ganho	$A_{1L}$				

- Análise relativa à Tabela 4 que compara resultados teóricos, de simulação e experimentais.

Tabela 4 - Comparação resultados teóricos, simulação e experimentais

			Teóricos		Simulação			Experimentais			
			Cap.	Valores	Cap.	Valores	Comparação c/ teóricos	Cap.	Valores	Comparação c/ teóricos	Comparação c/simulação
PFR dos transístores	$V_{B1}$	(V)	3.2		4.1	#DIV/0!	5.2		#DIV/0!		
	$V_{BE1}$					#DIV/0!					
	$V_{CE1}$	(V)				#DIV/0!					
	$V_{C1}$	(V)				#DIV/0!					
	$V_{BE2}$					#DIV/0!					
	$V_{CE2}$					#DIV/0!					
	$I_{C1}$	(mA)				#DIV/0!					
	$I_{C2}$	(mA)				#DIV/0!					
Impedâncias de entrada	$R_{i1}$	( $\Omega$ )	3.3		4.2	#DIV/0!					
	$R_{i2}$	( $\Omega$ )				#DIV/0!					
Ganhos	$A_{1L}$		3.4 e 3.5		4.3	#DIV/0!	5.5		#DIV/0!		
	$A_{2L}$					#DIV/0!					
	$A'_V$					#DIV/0!					
	$A_V$					#DIV/0!					
Resposta em frequência	$f_L$	(Hz)	3.6		4.4	#DIV/0!	5.7		#DIV/0!	#DIV/0!	
	$f_H$	(Hz)								#DIV/0!	
	$\Delta f$	(Hz)								#DIV/0!	



## **Apresentação**

O relatório deve ter em conta o seguinte:

- Há apenas figuras e tabelas (não há gráficos, quadros, etc.) que devem ser centradas horizontalmente na página. Todas as figuras e tabelas devem ser legendadas e referenciadas no texto. A legenda das figuras deve vir depois destas e a das Tabelas antes destas.
- As figuras contendo gráficos devem possuir legendas nos dois eixos, com a entidade representada e respetivas unidades (por exemplo  $V_{in}$  [V]).
- As curvas apresentadas em gráficos devem ser identificadas, as escalas devem ser incluídas e, se for o caso, os pontos notáveis das curvas devem estar claramente identificados.
- As equações não devem ser inseridas no texto, mas sim escritas em linha própria, alinhadas ao centro e numeradas à direita sequencialmente como se exemplifica com (1):

$$V = RI \quad (1)$$

- As equações devem ser referidas no texto apenas pelo seu número.
- Todos os valores apresentados no relatório devem incluir as unidades e devem usar um número de dígitos significativos apropriado à grandeza em causa.

## **Classificação**

O relatório deve ter uma estrutura e apresentação cuidada, que corresponderá a **20%** na avaliação do trabalho. A análise teórica corresponde a **10%**, a simulação **10%**, a apresentação dos resultados experimentais **10%**, a análise de resultados **40%** e as conclusões **10%**.

## **7. Valores especificados para cada grupo**

Os valores de  $V_{CC}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_E$ ,  $R_S$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{E1}$ ,  $R_S$  e  $R_L$  são iguais para todos os grupos e tomam os valores indicados na Tabela 1 e na Figura 1.

Os valores de  $R_C$ ,  $R_{E2}$  e  $R_{E3}$  devem ser dimensionados de modo a obter os valores, que dependem do grupo, indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores especificados para  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$ ,  $A_{1L}$  e  $V_{CC}$ 

Grupo nº	$I_{C1}$ (mA)	$I_{C2}$ (mA)	$A_{1L}$	$V_{CC}$	Grupo nº	$I_{C1}$ (mA)	$I_{C2}$ (mA)	$A_{1L}$	$V_{CC}$
1	0.8	0.8	-6	6	34	1.1	1	-7	5
2	0.9	0.8	-6	6	35	1.2	1	-7	5
3	1	0.8	-6	6	36	0.8	1.1	-7	5
4	1.1	0.8	-6	6	37	0.9	1.1	-7	5
5	1.2	0.8	-6	6	38	1	1.1	-7	5
6	0.8	0.9	-6	6	39	1.1	1.1	-7	5
7	0.9	0.9	-6	6	40	1.2	1.1	-7	5
8	1	0.9	-6	6	41	0.8	1.2	-7	5
9	1.1	0.9	-6	6	42	0.9	1.2	-7	5
10	1.2	0.9	-6	6	43	1	1.2	-7	5
11	0.8	1	-6	6	44	1.1	1.2	-7	5
12	0.9	1	-6	6	45	1.2	1.2	-7	5
13	1	1	-6	6	46	0.8	0.8	-7	5
14	1.1	1	-6	6	47	0.9	0.8	-7	5
15	1.2	1	-6	6	48	1	0.8	-7	5
16	0.8	1.1	-6	6	49	1.1	0.8	-7	5
17	0.9	1.1	-6	6	50	1.2	0.8	-7	5
18	1	1.1	-6	6	51	1	1	-8	6
19	1.1	1.1	-6	6	52	1.1	1	-8	6
20	1.2	1.1	-6	6	53	1.2	1.1	-8	6
21	0.8	0.8	-6	5	54	1.3	1.2	-8	6
22	0.9	0.8	-6	5	55	1.4	0.8	-8	6
23	1	0.8	-6	5	56	1	0.9	-8	6
24	1.1	0.8	-6	5	57	1.1	1	-8	6
25	1.2	0.8	-6	5	58	1.2	1.1	-8	6
26	0.8	0.9	-7	5	59	1.3	1.2	-8	6
27	0.9	0.9	-7	5	60	1.4	0.8	-8	6
28	1	0.9	-7	5	61	1	0.9	-8	6
29	1.1	0.9	-7	5	62	1.1	1	-8	6
30	1.2	0.9	-7	5	63	1.2	1.1	-8	6
31	0.8	1	-7	5	64	1.3	1.2	-8	6
32	0.9	1	-7	5	65	1.4	0.8	-8	6
33	1	1	-7	5	66	1	0.9	-8	6

## Referências

- [1] OnSemiconductor/Fairchild, "[BC546/BC547/BC548/BC549 NPN Epitaxial Silicon Transistor datasheet](#)", 2014.
- [2] Linear Technology, "[LTSpice XVII](#)", 2017.
- [3] [Valores normalizados de R](#) - [http://www.lcardaba.com/articles/R\\_normal/R\\_normal.htm](http://www.lcardaba.com/articles/R_normal/R_normal.htm)