



**TÉCNICO**  
LISBOA

# Eletrónica I

2º Semestre 2019/2020

## LAB3

### 3º Trabalho de Laboratório Par Diferencial

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área Científica de Eletrónica

#### Histórico de revisões

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

# 1. Introdução

Pretende-se com este trabalho de laboratório analisar o funcionamento de um par diferencial com carga resistiva. Nomeadamente, será analisada a característica de transferência, os ganhos de tensão (modo diferencial e modo comum), a resistência de entrada em modo diferencial, a resistência de entrada em modo comum, a relação de rejeição de modo comum e tensão de desvio de entrada.

A realização do par diferencial será baseada no circuito integrado CA3046 [1] que contém 5 transístores bipolares que podem ser acedidos através dos pinos do circuito integrado.

O trabalho de laboratório é realizado em duas sessões:

- Antes da primeira sessão deve ser realizado o dimensionamento dos componentes indicados e preparada a simulação elétrica do circuito. O simulador elétrico usado é o programa LTSpice [2].
- Na primeira sessão devem ser apresentados ao docente os resultados do dimensionamento e da análise teórica, e realizadas e apresentadas as simulações. Podem ainda iniciar a realização experimental, montando o circuito numa placa de *breadboard* e realizando algumas medidas experimentais.

**Nota:** A placa de *breadboard* pode ser trazida pelos alunos, sendo os componentes necessários disponibilizados aos alunos na primeira sessão do trabalho.

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

**Nota:** O relatório é entregue até ao final do dia seguinte ao da segunda sessão de laboratório: *upload* no sistema Fénix (Avaliação → Projetos) de um ficheiro pdf com o nome LAB1-g-n1-n2-n3.pdf, sendo g o nº do grupo (01, 02, 03, etc.) e n1, n2, n3 os números dos alunos.

## 2. Equipamento para ensaio laboratorial

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

- Base de experimentação,
- Osciloscópio,
- Gerador de funções,
- Breadboard,
- Resistências (2 resistências de  $100\Omega$  e 3 resistências dimensionadas de acordo com as especificações da Tabela 2),
- Circuito integrado CA3046 (*array* de transístores bipolares).

### 3. Análise teórica com dimensionamento

Considere o circuito amplificador da Figura 1, sendo os valores dos parâmetros dos transistores para efeitos de cálculos teóricos, apresentados na Tabela 1.

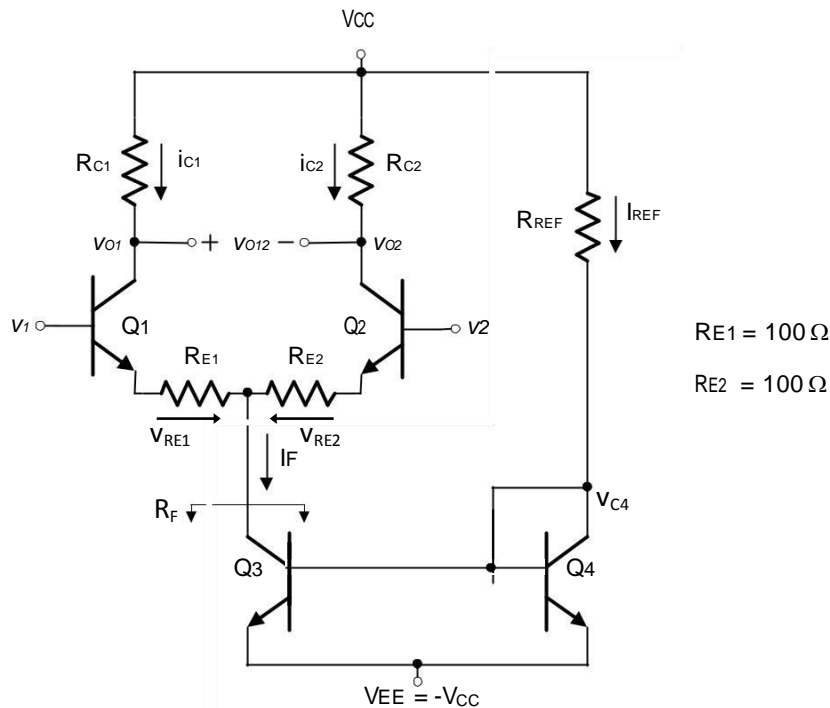


Figura 1: Par diferencial

(Nota: Q1 a Q4 nada têm a ver com as referências do circuito integrado)

Tabela 1 – Valores dos parâmetros dos transistores

$V_{BEon}$ (V)	$\beta_F = \beta_0$	$V_A$ (V)	$V_T$ (mV)
0.7	105	100	25

#### Dimensionamento

3.1 Dimensione os valores das resistências de  $R_{C1}$ ,  $R_{C2}$  e  $R_{REF}$  de modo a obter as correntes  $I_{C1}$  e  $I_{C2}$  em repouso, e o ganho de modo diferencial  $A_d = V_{012}/V_d$  ( $V_d = V_1 - V_2$ ), de acordo com os valores especificados na Tabela 2.

**Nota:** Os valores escolhidos para as resistências devem ser valores normalizados da série E24.

#### Análise teórica

Considere os valores escolhidos para as resistências  $R_{C1}$ ,  $R_{C2}$  e  $R_{REF}$ .

3.2 Determine o valor da resistência dinâmica da fonte,  $R_F$  (assinalada na Figura 1).

3.3 Determine os valores das correntes  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$ ,  $I_F$ ,  $I_{REF}$  e das tensões  $V_{01}$ ,  $V_{02}$  e  $V_{012}$  (correntes e tensões em repouso).

- 3.4 Considerando  $v_d = v_1 - v_2$ , represente graficamente as características de transferência aproximadas  $v_{o1}(v_d)$ ,  $v_{o2}(v_d)$  e  $v_{o12}(v_d)$  para  $|v_d| \leq 1V$ .
- 3.5 Considere o circuito incremental em que se despreza o efeito da resistência  $r_o$  do modelo dos transístores por  $r_o$  ser muito elevado. Determine:
- Os ganhos de tensão de modo diferencial  $A_{d1} = v_{o1}/v_d$ ,  $A_{d2} = v_{o2}/v_d$  e  $A_d = v_{o12}/v_d$ .
  - O valor da resistência de entrada de modo diferencial  $R_{id}$ .
  - Os ganhos de tensão de modo comum  $A_{c1} = v_{o1}/v_c$ ,  $A_{c2} = v_{o2}/v_c$  e  $A_c = v_{o12}/v_c$ , com  $v_c = (v_1 + v_2)/2$ .
  - O valor da resistência de entrada de modo comum  $R_{ic}$ .
- 3.6 Determine o valor da relação de rejeição de modo comum (CMRR - *Common Mode Rejection Ratio*) para a saída diferencial ( $v_{o12}$  - CMRR) e para a saída no coletor de  $Q_1$  ( $v_{o1}$  - CMRR1). Apresente estes valores em dB.
- 3.7 Admita que  $R_{C1}$  e  $R_{C2}$  têm uma variação de 5% (tolerância) face ao seu valor nominal e que  $v_1 = v_2 = 0$ . Qual o valor máximo de  $v_{o12}$ ? Determine um valor aproximado da tensão de desvio na entrada  $V_{OS} = v_1 - v_2$  que anula a tensão  $v_{o12}$ .

## 4. Simulação

Simule com o LTSpice o funcionamento do par diferencial, utilizando o circuito da Figura 2. Considere os transístores CA3046 descritos pelo seguinte modelo:

```
.MODEL CA3046 NPN IS=10E-15 BF=145.76 VAF=100 IKF=46.747E-3 ISE=114.23E-15 NE=1.4830 BR=0.1001
VAR=100 IKR=10.01E-3 ISC=10E-15 RC=10 CJE=1.026E-12 MJE=0.33333 CJC=991.79E-15 MJC=0.33333
TF=277.09E-12 XTF=309.38 VTF=16.364 ITF=1.7597 TR=10E-9
```

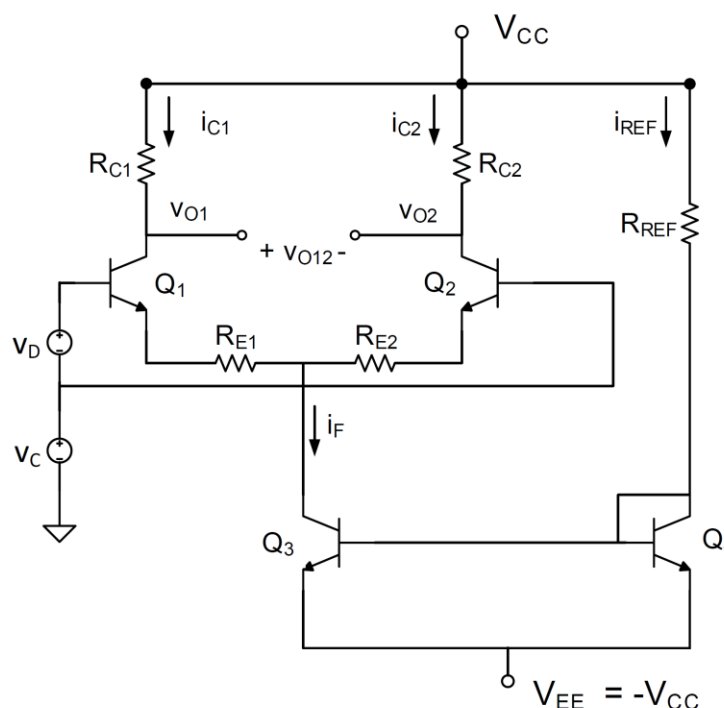


Figura 2: Par diferencial para simulação.

No circuito da Figura 2 faça  $v_c=0$ .

- 4.1 Para  $v_d=0$ , obtenha os valores das correntes  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$ ,  $I_F$  e  $I_{REF}$  e das tensões  $V_{O1}$  e  $V_{O2}$  (correntes e tensões em repouso).
- 4.2 Faça um varrimento da tensão  $v_d$  (DC Sweep) entre -1V e +1V. Obtenha as características de transferência para  $v_{O1}(V_d)$ ,  $v_{O2}(V_d)$  e  $v_{O12}(V_d)$ .
- 4.3 Com uma análise AC (AC Sweep) entre 10 Hz e 100 Hz, obtenha os ganhos de tensão  $A_{d1}$ ,  $A_{d2}$  e  $A_d$ , e a resistência de entrada de modo diferencial  $R_{id}$ .
- 4.4 Aplique em  $v_d$  um sinal sinusoidal com 100mV de amplitude e 500Hz de frequência. Fazendo uma análise no domínio do tempo (Transient) durante 3 períodos, obtenha os gráficos das tensões  $v_d(t)$ ,  $v_{O1}(t)$ ,  $v_{O2}(t)$  e  $v_{O12}(t)$ .

No circuito da Figura 2 faça  $v_d=0$ .

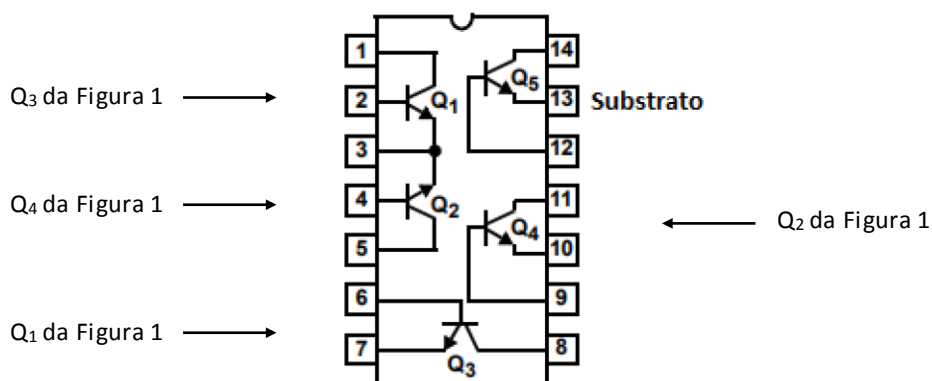
- 4.5 Aplique em  $v_c$  um sinal sinusoidal com 1V de amplitude e 500 Hz de frequência. Fazendo uma análise no domínio do tempo (Transient) durante 3 períodos, obtenha um gráfico com as tensões  $v_c(t)$ ,  $v_{O1}(t)$ ,  $v_{O2}(t)$  e  $v_{O12}(t)$ .
- 4.6 Faça uma análise AC entre 10Hz e 100Hz, obtenha os ganhos de tensão  $A_{c1}$ ,  $A_{c2}$  e  $A_c$ , e a resistência de entrada de modo comum  $R_{ic}$ .
- 4.7 Determine o valor da relação de rejeição de modo comum para a saída diferencial  $v_{O12}$ ,  $CMRR=A_d/A_c$  e para a saída no coletor de  $Q_1$ ,  $CMRR1=A_{d1}/A_{c1}$ .
- 4.8 No circuito da Figura 2 modifique os valores de  $R_{C1}$  e  $R_{C2}$  em 5% do seu valor nominal, para obter o valor máximo em  $v_{O12}$ . Com  $v_d=v_c=0$  registre o valor de  $v_{O12}$ . Faça um varrimento da tensão  $v_d$  entre -20mV e +20mV e obtenha o gráfico de  $v_{O12}$ . No gráfico assinale o valor correspondente a  $V_{OS}$ .

## 5. Trabalho Experimental

### PRECAUÇÕES / RECOMENDAÇÕES:

- O pino 13 do circuito CA3046 deve estar sempre ligado à tensão de alimentação mais negativa ( $V_{EE}$ ), mesmo quando o transistor  $Q_5$  não está a ser utilizado.
- A montagem dos circuitos deve ser sempre realizada com a fonte de alimentação desligada.
- Antes de aplicar um sinal na entrada do circuito visualize-o no osciloscópio e verifique se corresponde ao sinal pretendido.
- A alimentação dos circuitos é feita diretamente através da base de experimentação, que fornece as tensões DC necessárias ( $V_{CC}$  e  $V_{EE}$ , com  $V_{EE} = -V_{CC}$ ).
- Os sinais de entrada e de saída devem passar pelas fichas BNC da base de experimentação. Caso tenha problemas de estabilidade (o circuito oscilar) ligue resistências de  $1k\Omega$  em série com a entrada do osciloscópio.

Consulte a folha de catálogo do circuito integrado CA3046 para montar o circuito da Figura 1. Utilize a correspondência recomendada entre a numeração dos transístores ( $Q_1$  a  $Q_4$ ) na Figura 1 e a numeração dos transístores na Figura 3. Tenha especial cuidado na ligação do pino 13 (substrato) do circuito integrado à tensão mais negativa ( $V_{EE}$ ).



**Figura 3 – Circuito integrado CA3046 (vista por cima).**

- 5.1. Ligue as entradas  $v_1$  e  $v_2$  à massa. Usando um voltímetro meça e registre os valores de  $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$ ,  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$ ,  $V_{C4}$ ,  $V_{RE1}$  e  $V_{RE2}$ .
- 5.2. Mantenha a entrada  $v_2$  à massa. Aplique na entrada  $v_1$  um sinal sinusoidal de frequência 500Hz e amplitude 1V.
  - i. Observe  $v_1(t)$ ,  $v_{o1}(t)$  e  $v_{o2}(t)$  no osciloscópio em modo DC. Registe as formas de onda observadas. Colocando o osciloscópio em modo X-Y ou através das formas de onda

transferidas para o Excel, registre a característica de transferência  $v_{o1}(v_d)$  e  $v_{o2}(v_d)$ . A partir das características obtidas, determine os ganhos de modo diferencial  $A_{d1}$ ,  $A_{d2}$  e  $A_d$ .

- 5.3. Aplique na entrada  $v_1$  um sinal sinusoidal de frequência 500Hz e amplitude 100mV. Mantenha todos os canais do osciloscópio em modo AC. Observe e registre as formas de onda de  $v_1(t)$ ,  $v_{o1}(t)$ ,  $v_{o2}(t)$  e  $v_{o12}(t)$  (neste último caso utilizando a função diferença do osciloscópio ou os dados do Excel). Com base nesses valores determine os ganhos de tensão  $A_{d1}$ ,  $A_{d2}$  e  $A_d$ .

## 6. Relatório

O relatório é entregue até ao final do dia seguinte ao da segunda sessão de laboratório. Deve portanto ser parcialmente realizado antes da segunda aula de laboratório, para que durante a aula apenas seja necessário completar os aspetos referentes aos resultados experimentais.

### Estrutura

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

- **Análise teórica** que inclui as respostas às questões da secção 3 (3.1 a 3.7).
- **Simulação** que inclui as respostas às questões da secção 4 (4.1 a 4.8). 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 da secção 5 (5.1 a 5.3). Apresente no relatório as imagens obtidas no osciloscópio (inclua resultados de medições).
- **Análise dos resultados** que inclui:
  - Incluir o ficheiro Excel, disponibilizado na página da disciplina, o qual deve ser devidamente preenchido.
  - A comparação entre valores e grandezas obtidas na análise teórica, na simulação e na realização experimental: tensões e correntes em repouso, características de transferência, ganhos de modo diferencial, resistência de entrada diferencial, ganhos de modo comum, CMRR, tensão de desvio de saída e tensão de desvio de entrada.
  - Justificação da diferença entre  $I_F$  e  $I_{REF}$  da fonte de corrente (simulação).
- **Conclusões** do trabalho com um resumo sintético de todo o trabalho com especial enfoque na análise de resultados.
- **Anexos**, caso pretendam incluir deduções de expressões usadas na análise teórica.

## Apresentação

O relatório deve ter em conta o seguinte:

- Deve fazer referência a apenas figuras e tabelas (não devem haver 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  $V_{im}$  [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 à esquerda, e numeradas à direita sequencialmente como se exemplifica com por exemplo (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

O valor das resistências  $R_{E1}$  e  $R_{E2}$  é de  $100\Omega$ . As resistências  $R_{C1}$ ,  $R_{C2}$  e  $R_{REF}$  devem ser dimensionadas e dependem dos valores especificados para cada grupo conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Valores especificados para  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$ ,  $A_d$  e  $V_{CC}$

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

## Anexos

Anexo 1 – Características do transistor circuito integrado CA3046

Anexo 2 – Ficheiro Excel “*Tabela de comparação de resultados.xlsx*”