

Circuitos Eletrónicos

4º Período 2022/2023

Guia de Laboratório

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área Científica de Eletrónica

Índice

Planeamento	2
L0 – Circuitos com Díodos.....	3
L1 - Amplificador com Transístores Bipolares	4
1. Introdução	4
2. Material de Laboratório e Equipamento	4
3. Análise teórica (Cálculo L1).....	4
4. Simulação (Simul L1)	6
5. Trabalho Experimental (Placa L1)	7
6. Relatório.....	9
L2 - Par Diferencial.....	10
1. Introdução	10
2. Material de Laboratório e Equipamento	10
3. Análise teórica (Cálculo L2).....	11
4. Simulação (Simul L2)	12
5. Trabalho Experimental (Placa L2)	14
6. Relatório.....	15
L3 - Inversor CMOS.....	16
1. Introdução	16
2. Material de Laboratório e Equipamento	16
3. Análise Teórica (Cálculo L3)	17
4. Simulação (Simul L3)	17
5. Trabalho Experimental (Placa L3)	18
6. Relatório.....	20
Anexo A. Simulador LTSPICE	21
Anexo B. Osciloscópio.....	28

Planeamento

Semana		Dia		Teórica	Laboratório	
					Cálculo	Bancada
1	01/mai	01/mai	2ª feira			
		02/mai	3ª feira		C0	
		03/mai	4ª feira	díodos		
		04/mai	5ª feira		C0	L0
		05/mai	6ª feira			L0
2	08/mai	08/mai	2ª feira	díodos		
		09/mai	3ª feira		C1	
		10/mai	4ª feira	CBA		
		11/mai	5ª feira		C1	L1
		12/mai	6ª feira			L1
3	15/mai	15/mai	2ª feira	CBA		
		16/mai	3ª feira		C1	
		17/mai	4ª feira	MAP30		
		18/mai	5ª feira		C1	L1
		19/mai	6ª feira			L1
4	22/mai	22/mai	2ª feira	CBA		
		23/mai	3ª feira			
		24/mai	4ª feira	Fonte Corrente		
		25/mai	5ª feira		C2	L2
		26/mai	6ª feira			L2
5	29/mai	29/mai	2ª feira	Par Diferencial		
		30/mai	3ª feira		C2	
		31/mai	4ª feira	Par Diferencial		
		01/jun	5ª feira		C2	L2
		02/jun	6ª feira			L2
6	05/jun	05/jun	2ª feira	Digital		
		06/jun	3ª feira		C3	
		07/jun	4ª feira	Digital		
		08/jun	5ª feira			
		09/jun	6ª feira			L3
7	12/jun	12/jun	2ª feira	Ampop		
		13/jun	3ª feira			
		14/jun	4ª feira	Circ. c/ AmpOp		
		15/jun	5ª feira		C3	L3
		16/jun	6ª feira			L3
MAP30		17/mai	4ª feira	Díodos		
Exame		30/jun	6ª feira			
Recurso		13/jul	5ª feira			
Especial		26/jul	4ª feira			

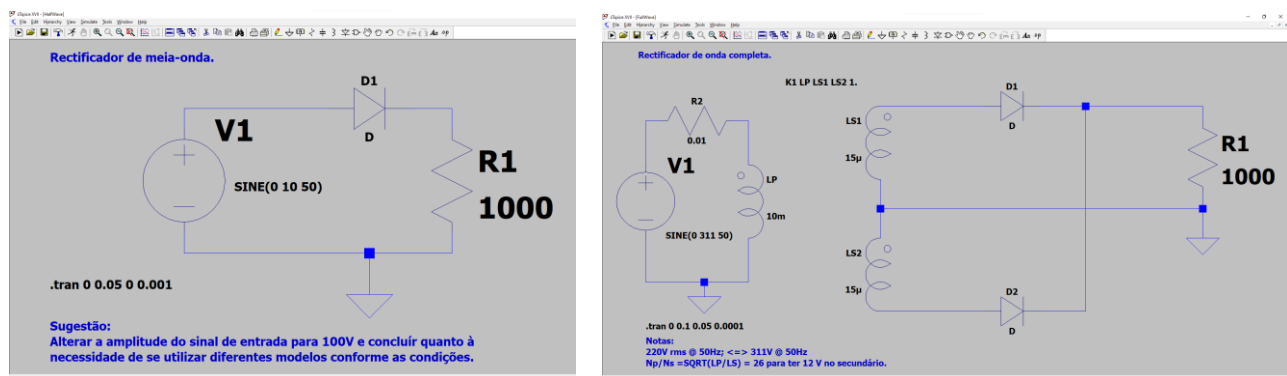
L0 – Circuitos com Díodos

(Semana 1 – Sem relatório)

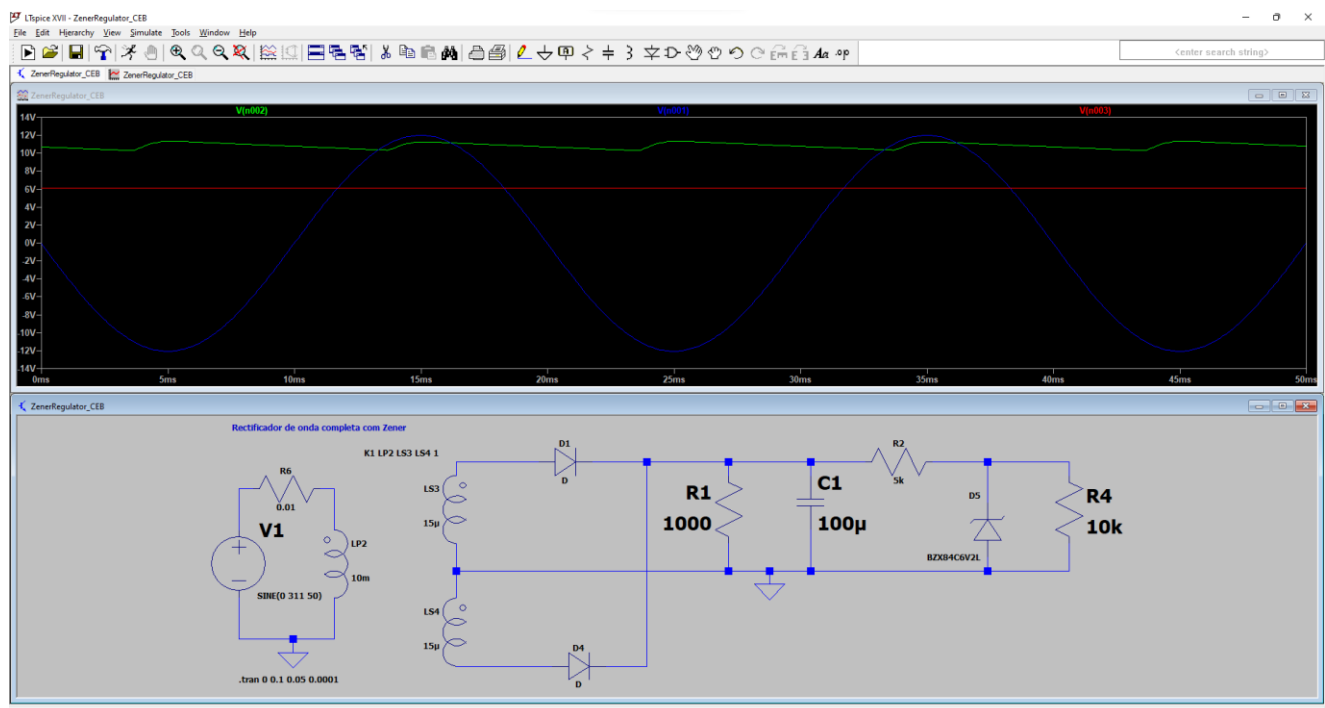
Pretende-se com este trabalho de laboratório familiarizar o aluno com a ferramenta de simulação eléctrica LTspice [1] usando como exemplos circuitos com díodos. No Anexo A é descrita sucintamente a forma de editar um esquema no programa LTspice.

O trabalho de laboratório é realizado no decorrer da primeira semana de aulas.

1. Use os circuitos do rectificador de meia-onda e rectificador de onda-completa disponíveis na página da UC para se familiarizar com a ferramenta LTspice. observe as formas de onda nos diversos nós do circuito.



2. Implemente o regulador de onda completa com diodo zener e observe as formas de onda nos diversos nós do circuito.



L1 - Amplificador com Transístores Bipolares

(Semanas 2 e 3 – Com relatório)

1. Introdução

Pretende-se com este trabalho de laboratório analisar o funcionamento de um circuito amplificador com transístores bipolares. O amplificador, realizado de forma discreta, é constituído por dois andares de amplificação, ligados em cascata, que utilizam transístores bipolares NPN BC547B [2].

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 no decorrer das semanas 2 e 3 e compreende a (1) análise, a (2) simulação e a (3) montagem do circuito. O simulador elétrico usado é o programa LTspice [1] e a montagem do circuito deve ser realizada numa placa de *breadboard* disponibilizada no laboratório ou trazida pelos alunos.

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 Ω , 910 Ω , 1k Ω , 2,2k Ω , 2,4k Ω , 12k Ω , 39 k Ω , 68 k Ω .**
- **Condensadores: dois de 10 μ F e um de 0,1 μ F.**
- 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 (Cálculo L1)

Considere o circuito amplificador da Figura L1.1, que é constituído por dois andares de amplificação, identificados na Figura L1.2. 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.

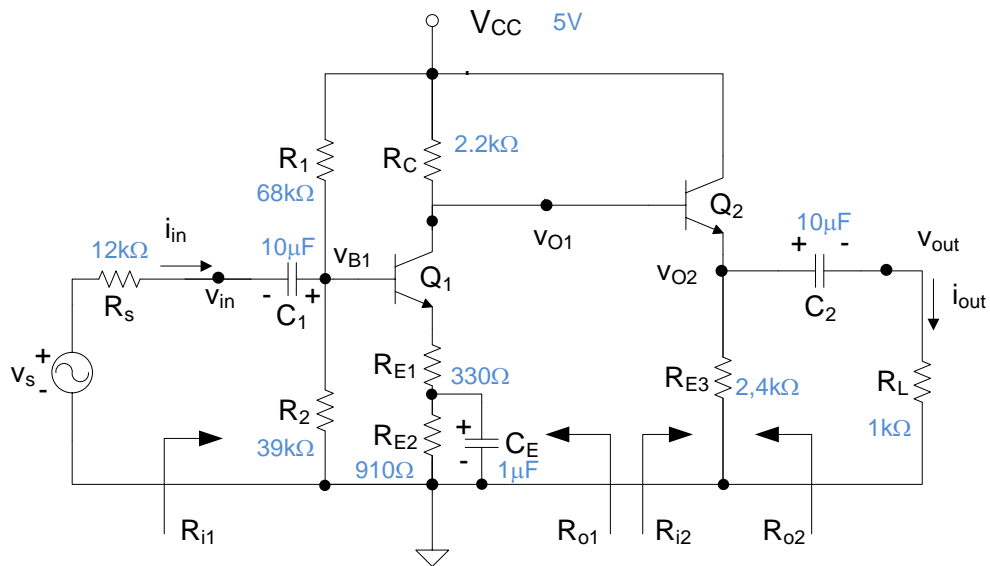


Figura L1.1 – Amplificador discreto com transistores bipolares.

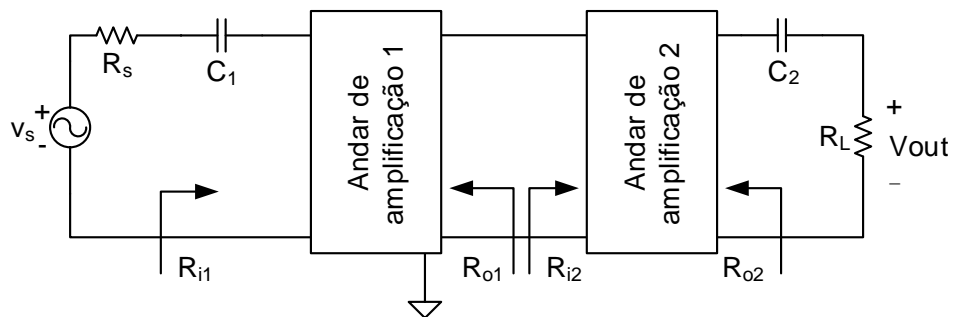


Figura L1.2 – Andares de amplificação ligados em cascata.

Tabela 1 - Valores de R_S , R_1 , R_2 , R_{E1} , R_L , R_C , R_{E2} , R_{E3} , C_E , C_1 e C_2

R_S	R_1	R_2	R_{E1}	R_L	R_C	R_{E2}	R_{E3}	C_E	C_1	C_2
$12\text{k}\Omega$	$68\text{k}\Omega$	$39\text{k}\Omega$	330Ω	$1\text{k}\Omega$	$2.2\text{k}\Omega$	910Ω	$2.4\text{k}\Omega$	$1\mu\text{F}$	$10\mu\text{F}$	$10\mu\text{F}$

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	∞	26

3.1. Calcule:

- 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 $R_{i2} \gg R_C$.

- 3.2. Determine o ponto de funcionamento em repouso: V_{B1} , I_{C1} , V_{CE1} , I_{C2} e V_{CE2} .
- 3.3. Determine as impedâncias R_{i1} e R_{i2} .
- 3.4. Calcule o ganho de tensão do primeiro andar de amplificação $A_{1L} = v_{o1}/v_{i1}$, considerando o efeito de carga ($i_{o1} \neq 0$).
- 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). 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 (Simul L1)

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:

- No Anexo A é descrita sucintamente a forma de editar um diagrama esquemático no programa LTspice e de introduzir os valores das dimensões dos parâmetros dos transístores.
- 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} .
- 4.2. Faça uma análise AC e obtenha os valores das impedâncias R_{i1} e R_{i2} .
- 4.3. Faça uma análise AC e obtenha os valores dos ganhos A_{1L} , A_{2L} , A'_v e A_v .
- 4.4. Faça uma análise no domínio do tempo para um sinal de entrada sinusoidal com 100 mV de amplitude e 2 kHz de frequência. 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 transistor 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 (Placa L1)

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 L1.1 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. Use a fonte de tensão de alimentação $V_{CC} = 5V$. 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 50 kHz de frequência. 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_{iL} , 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 transístor 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 de 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 L1-gr-n1-n2-n3.pdf, sendo gr o nº do grupo (01, 02, 03, etc.) e n1, n2, n3 os números dos alunos.

O relatório deve incluir as respostas através de figuras comentadas referentes às questões:

- 4.1 a 4.6 (2 páginas)
- 5.2, e 5.4 a 5.7 (2 páginas)
- 1 página de Comentários e análise de resultados

O relatório tem o tamanho máximo de 5 páginas

L2 - Par Diferencial

(Semanas 4 e 5 – Com relatório)

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 no decorrer das semanas 4,5 e 6 e compreende a (1) análise, a (2) simulação e a (3) montagem do circuito. O simulador elétrico usado é o programa LTspice [2] e a montagem do circuito deve ser realizada numa placa de breadboard disponibilizada no laboratório ou trazida pelos alunos.

2. Material de Laboratório e Equipamento

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

- **Resistências: 100Ω [x2], $1.6k\Omega$ [x2], $3.6k\Omega$**
- **Circuito integrado CA3046 (array de transístores bipolares)**
- Base de experimentação
- Osciloscópio
- Gerador de funções
- Breadboard

3. Análise teórica (Cálculo L2)

Considere o circuito amplificador da Figura L2.1, sendo os valores dos parâmetros dos transistores para efeitos de cálculos teóricos, apresentados na Tabela 4.

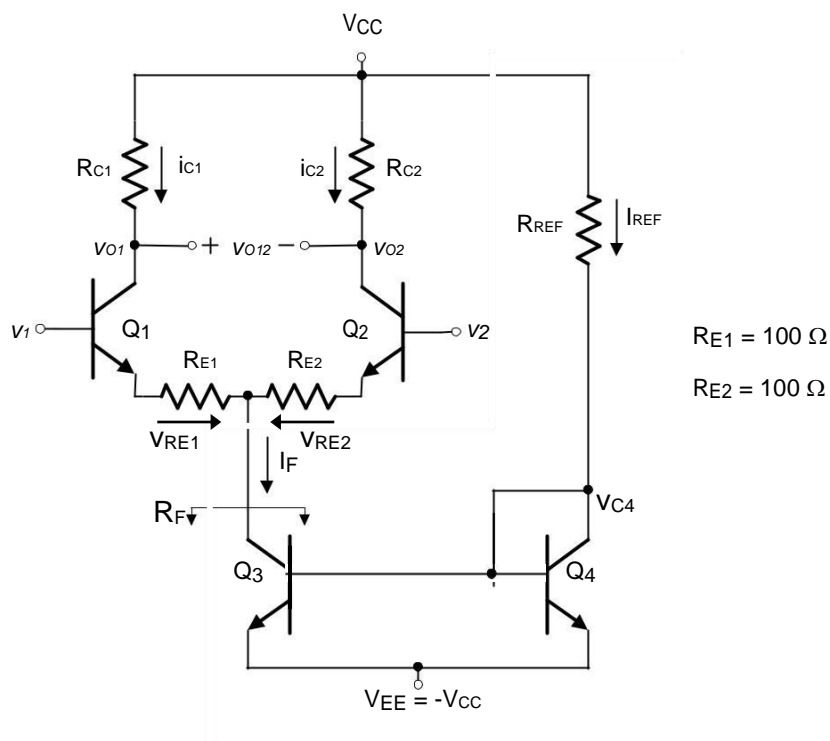


Figura L2.1: Par diferencial

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

Tabela 3 - Valores de R_{ref}, R_{C1}, R_{C2}, R_{E1}, R_{E2}.

R _{ref}	R _{C1}	R _{C2}	R _{E1}	R _{E2}
3,6kΩ	1,6kΩ	1,6kΩ	100Ω	100Ω

Tabela 4 – Valores dos parâmetros dos transistores.

V _{BEon} (V)	β _F = β ₀	V _A (V)	V _T (mV)
0.7	105	100	25

3.1 Calcule:

- os valores das correntes I_{C1}, I_{C2}, I_F, I_{REF} e das tensões V₀₁, V₀₂ e V₀₁₂ (correntes e tensões em repouso).
- 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 3.

3.2 Determine o valor da resistência dinâmica da fonte, R_F (assinalada na Figura L2.1).

- 3.3 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 $|v_d| \leq 1V$.
- 3.4 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} .
- 3.5 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.
- 3.6 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 (Simul L2)

Simule com o LTSpice o funcionamento do par diferencial, utilizando o circuito da Figura L2.2. 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
```

No Anexo A é descrita sucintamente a forma de editar um diagrama esquemático no programa LTSpice e de introduzir os valores das dimensões dos parâmetros dos transístores.

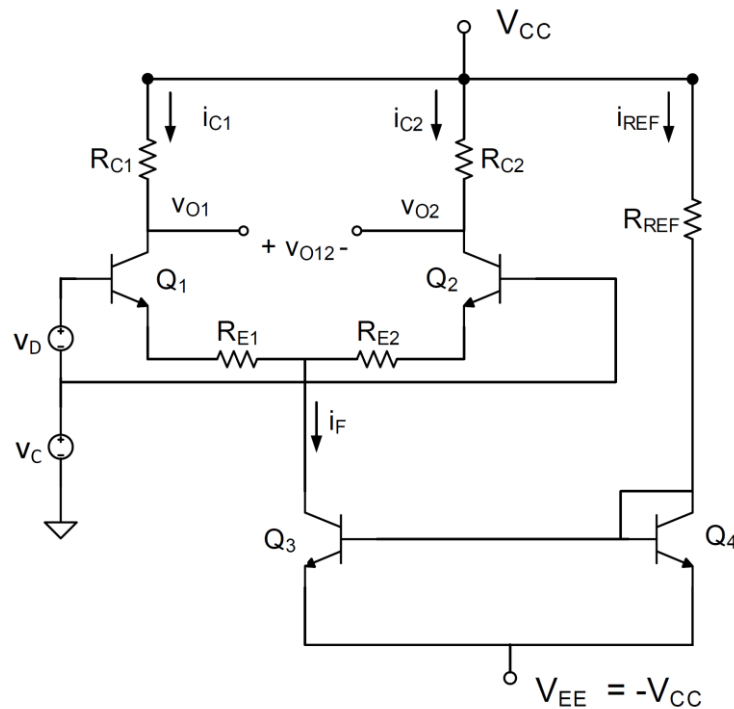


Figura L2.2: Par diferencial para simulação.

No circuito da Figura L2.2 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_{01} e V_{02} (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 $v_{01}(v_d)$, $v_{02}(v_d)$ e $v_{012}(v_d)$.
- 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 $v_d(t)$, $v_{01}(t)$, $v_{02}(t)$ e $v_{012}(t)$.

No circuito da Figura L2.2 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 $v_c(t)$, $v_{01}(t)$, $v_{02}(t)$ e $v_{012}(t)$.
- 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_{012} , $CMRR=A_d/A_c$ e para a saída no coletor de Q_1 , $CMRR1=A_{d1}/A_{c1}$.
- 4.8. No circuito da Figura L2.2 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 $+20\text{mV}$ e obtenha o gráfico de v_{o12} . No gráfico assinale o valor correspondente a V_{OS} .

5. Trabalho Experimental (Placa L2)

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 $1\text{k}\Omega$ em série com a entrada do osciloscópio.

Consulte a folha de catálogo do circuito integrado CA3046 para montar o circuito da Figura L2.1. Utilize a correspondência recomendada entre a numeração dos transístores (Q_1 a Q_4) na Figura L2.1 e a numeração dos transístores na Figura L2.3. Tenha especial cuidado na ligação do pino 13 (substrato) do circuito integrado à tensão mais negativa (V_{EE}).

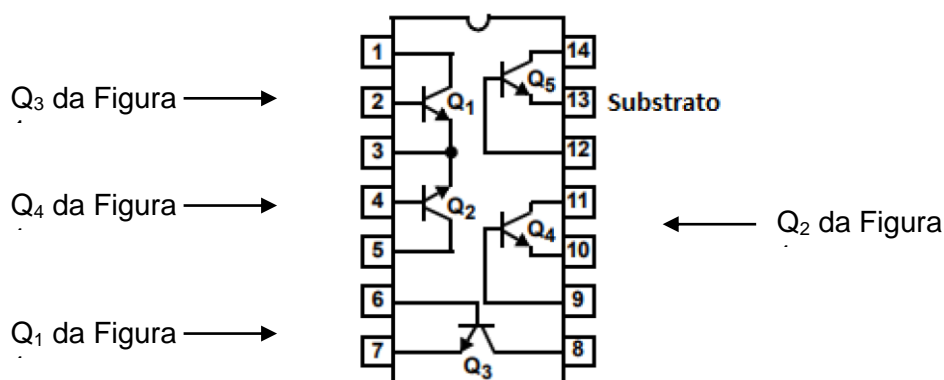


Figura L2.3 – Circuito integrado CA3046 (vista por cima).

- 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, registe 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 registe 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 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 de 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 L2-gr-n1-n2-n3.pdf, sendo gr o nº do grupo (01, 02, 03, etc.) e n1, n2, n3 os números dos alunos.

O relatório deve incluir as respostas através de figuras comentadas referentes às questões:

- 4.1 a 4.8 (2 páginas)
- 5.1 a 5.3 (2 páginas)
- 1 página de Comentários e análise de resultados

O relatório tem o tamanho máximo de 5 páginas

L3 - Inversor CMOS

(Semanas 6 e 7 – Com relatório)

1 Introdução

Pretende-se com este trabalho de laboratório analisar o funcionamento do circuito inversor CMOS apresentado na Figura 1, que é constituído por dois transístores complementares MOS (NMOS - canal N e PMOS - canal P). Serão consideradas diversas características deste circuito inversor, nomeadamente, a sua característica de transferência, as margens de ruído e os tempos de atraso de propagação.

A montagem do circuito inversor baseia-se na utilização do circuito integrado CD4007 [1], que contém seis transístores MOS de reforço, sendo três de canal N e os restantes de canal P.

O trabalho de laboratório é realizado no decorrer das semanas 6 e 7 e compreende a (1) análise, a (2) simulação e a (3) montagem do circuito. O simulador elétrico usado é o programa LTspice [1] e a montagem do circuito deve ser realizada numa placa de *breadboard* disponibilizada no laboratório ou trazida pelos alunos.

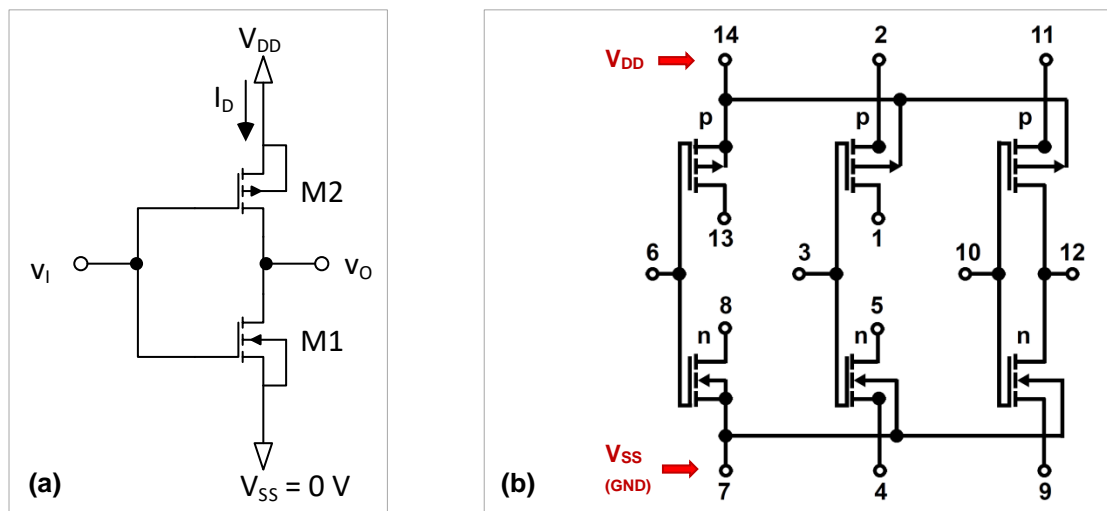


Figura 3.1 –(a) Circuito inversor CMOS e (b) esquema interno do circuito integrado.

2 Material de Laboratório e Equipamento

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

- **Circuito integrado CD4007**
- Base de montagem com fonte de alimentação DC e placa de *breadboard*
- Multímetro, osciloscópio e gerador de sinais

3 Análise Teórica (Cálculo L3)

Considere o circuito inversor CMOS da Figura L1.1 em que os transístores são caracterizados pelos parâmetros indicados na 5, o valor de V_{DD} é 5V e o valor de V_{SS} é 0 V.

Tabela 5 – Características dos transístores MOS

	W	L	λ	k_p	$k = \frac{1}{2} k_p \frac{W}{L}$	V_t
NMOS (M1)	40 μm	5 μm	0	73 $\mu\text{A/V}^2$	292 $\mu\text{A/V}^2$	1.9 V
PMOS (M2)	150 μm	5 μm	0	16 $\mu\text{A/V}^2$	240 $\mu\text{A/V}^2$	-1.7 V

- 3.1. Calcule a tensão de saída v_o e a corrente i_D nos transístores M1 e M2 para $v_i = 0\text{V}$, $v_i = V_{DD}/2$, e $v_i = V_{DD}$. Indique nas três situações qual a região de funcionamento dos transístores.
- 3.2. Determine e represente graficamente a característica de transferência $v_o(v_i)$ do circuito. Assinale as diferentes zonas de funcionamento de cada um dos transístores, bem como as tensões v_i e v_o nos pontos de transição entre as diferentes zonas de funcionamento.
- 3.3. Determine o valor máximo da corrente I_D .
- 3.4. Determine as tensões V_{OL} , V_{OH} , V_{IL} , V_{IH} e calcule as margens de ruído NML e NMH.
- 3.5. Considere ligada na saída uma carga capacitiva $C_L = C_p = 180\text{ pF}$ à massa, que simula a capacidade parasita associada à entrada do osciloscópio e ao respetivo cabo presentes nas medidas experimentais em laboratório. Determine os tempos de atraso de propagação (t_{PHL} , t_{PLH} e t_p).

NOTA:

- Nas equações da corrente dos transístores deve considerar para o transístor PMOS $V_t > 0$, ou seja $V_t = 1,7\text{V}$, uma vez que devido à forma como são definidas as equações:

	nMOS reforço	pMOS reforço
Equações das aulas teóricas	$V_t > 0$ (1.9V)	$V_t > 0$ (1.7V)
Equações do LTspice	$V_t > 0$ (1.9V)	$V_t < 0$ (-1.7V)

4 Simulação (Simul L3)

Para realizar a simulação do funcionamento do inversor CMOS utilize os valores de W e L indicados na Tabela 5 e os parâmetros indicados na 6. No Anexo A é descrita sucintamente a forma de editar um diagrama esquemático no programa LTspice e de introduzir os valores das dimensões dos parâmetros dos transístores.

Tabela 6 – Parâmetros dos transístores a utilizar no LTspice

NMOS	.MODEL N4007 NMOS W=40u L=5u TOX=70n KP=73u VTO=1.9V GAMMA=2.0 CBD=0.2p CBS=0.2p MJ=0.75 LAMBDA=20m
PMOS	.MODEL P4007 PMOS W=150u L=5u TOX=70n KP=16u VTO=-1.7V GAMMA=1.0 CBD=0.2p CBS=0.2p MJ=0.75 LAMBDA=20m

- 4.1. Determine a tensão de saída e a corrente nos transístores, para $v_i = 0V$, $v_i = V_{DD}/2$ e $v_i = V_{DD}$. Para isso faça uma análise do ponto de funcionamento em repouso (“*DC op pnt*”).
- 4.2. Obtenha também o gráfico de $i_D(v_i)$, fazendo uma análise com varrimento do sinal de entrada (“*DC Sweep*”) de $v_i = 0V$ a $v_i = V_{DD}$. Determine o valor máximo da corrente i_D .
- 4.3. Obtenha também a característica de transferência $v_o(v_i)$. A partir desta característica, determine as tensões V_{OL} , V_{OH} , V_{IL} , V_{IH} e calcule as margens de ruído NML e NMH.

Sugestão: obtenha dv_o/dv_i através da função $d()$ do LTspice (ver anexo A).

- 4.4. Aplique na entrada um sinal retangular (utilize um gerador de impulsos PULSE) com níveis de tensão $0V$ e V_{DD} , frequência $200kHz$, e tempo de subida e tempo de descida desprezáveis face a t_P (por exemplo $1ns$). Acrescente na saída uma carga capacitiva $C_L=470pF$. Obtenha um gráfico das tensões de entrada e de saída fazendo uma análise no domínio do tempo (“*Transient*”). A partir dos gráficos obtidos determine os tempos de atraso de propagação (t_{pLH} , t_{pHL} e t_p).

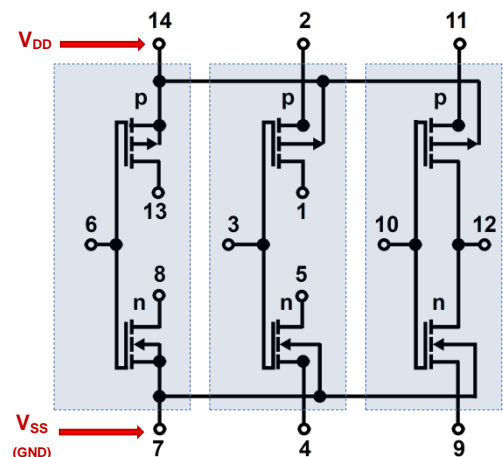
Sugestão: Faça “*zoom*” nas zonas de transição dos sinais e utilize o cursor para obter resultados mais exatos.

5 Trabalho Experimental (Placa L3)

PRECAUÇÕES:

- Nunca aplique sinais na entrada do circuito sem ter a certeza de que o circuito integrado já está devidamente alimentado através dos pinos 7 (GND) e 14 (VDD), que são ligações obrigatórias.
- Deverá utilizar um dos 3 conjuntos do CD4007:

	Esquerda	Centro	Direita
Entrada (v_i)	6	3	10
Saída (v_o)	8-13	1-5	12
VDD	14	2-14	11-14
GND	7	4-7	7-9



- 5.1. Consulte a folha de catálogo com as características do circuito integrado CA4007. Identifique os pinos do circuito integrado correspondentes aos terminais da Figura L1.1. Monte o circuito inversor na placa de *breadboard*. **Não ligue a fonte de alimentação.**
- 5.2. Ajuste a fonte de tensão para obter a tensão V_{DD} . Depois de ter verificado que o nível de tensão está correto ligue V_{DD} e V_{SS} (GND) ao circuito integrado montado na *breadboard*.
- 5.3. Verifique o funcionamento do circuito efetuando os seguintes testes e registrando os valores obtidos:
- I. Aplique na entrada um sinal $v_I = 0\text{ V}$ e meça com o voltímetro a tensão de saída v_O .
 - II. Aplique na entrada um sinal $v_I = V_{DD}$ e meça com o voltímetro a tensão de saída v_O .
 - III. Aplique na entrada um sinal $v_I = V_{DD}/2$ e meça com o voltímetro a tensão de saída v_O .
- Nota:** Para obter $V_{DD}/2$ deve realizar um divisor resistivo ligado a V_{DD} com 2 resistências iguais.
- 5.4. Ligue o gerador de sinais ao canal 1 do osciloscópio e ajuste-o para obter um sinal sinusoidal de 1 kHz sobreposto a uma componente contínua: $v(t) = V_{DD}/2 + V_{DD}/2 \cos(\omega t)$.
- Certifique-se que o circuito está alimentado** e só então aplique este sinal sinusoidal, que varia de 0V a V_{DD} , na entrada do inversor CMOS. Observe no osciloscópio os sinais de entrada (canal 1) e de saída (canal 2) no domínio do tempo. Utilize os canais do osciloscópio sempre em acoplamento CC (ver Anexo B).
- Obtenha a característica de transferência $v_O(v_I)$, através de um gráfico realizado no programa Excel ou colocando o osciloscópio em modo xy. Imprima o gráfico (ver Anexo B).
- Nota:** Para melhorar a resolução da característica de transferência, pode utilizar o osciloscópio em modo de aquisição de alta resolução ou modo de aquisição de médias (ver Anexo B).
- Utilize a funcionalidade do osciloscópio que lhe permitem guardar as formas de onda visualizadas (guardar os pontos através do Excel no PC ou de uma PEN).
- 5.5. Mantendo as condições da alínea anterior, utilize o gráfico obtido para determinar as tensões V_{OL} , V_{OH} , V_{IL} , V_{IH} e calcular as margens de ruído NML e NMH. Poderá obter os valores de V_{IL} e V_{IH} encontrando os pontos de declive -1.
- 5.6. Utilize o gerador de sinais para obter uma onda quadrada de frequência 200kHz e valores extremos de 0V e V_{DD} . **Certifique-se que o circuito está alimentado** e só então aplique a onda quadrada na entrada do inversor CMOS. Observe no osciloscópio os sinais de entrada e de saída. Coloque a escala de tempo do osciloscópio no seu valor mínimo para melhor visualização das transições das formas de onda. Obtenha um gráfico contendo as transições $L \rightarrow H$ e $H \rightarrow L$ (ver Anexo B) nas seguintes situações:

- I. Sem qualquer capacidade na saída do circuito.
- II. Com uma capacidade colocada na saída de 470pF.

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 de 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 L3-gr-n1-n2-n3.pdf, sendo gr o nº do grupo (01, 02, 03, etc.) e n1, n2, n3 os números dos alunos.

O relatório deve incluir as respostas através de figuras comentadas referentes às questões:

- 4.1 a 4.4 (2 páginas)
- 5.3 a 5.5 (2 páginas)
- 1 página de Comentários e análise de resultados

O relatório tem o tamanho máximo de 5 páginas

Referências

- [1] Linear Technology, "[LTSpice XVII](#)", 2017.
- [2] OnSemiconductor/Fairchild BC546, "[BC546/BC547/BC548/BC549 NPN Epitaxial Silicon Transistor datasheet](#)", 2014.
- [3] Intersil CA3046, https://www.mouser.com/catalog/specsheets/intersil_fn341.pdf
- [4] OnSemiconductor/Fairchild 74HCT04, <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mm74hct04-d.pdf>

Anexo A. Simulador LTSPICE

Para utilizar o simulador LTspice pode seguir os tutoriais indicados [3]. Segue-se uma pequena introdução ao simulador utilizando como exemplo o circuito da Figura L1.1.

Criação do diagrama esquemático

No LTspice crie um novo esquema (File → New Schematic). Coloque no esquema os componentes da Figura L1.1: um transístor pmos, um transístor nmos e duas fontes de tensão (voltage). Coloque também o nó de referência GND. Na Figura 4 mostra-se o menu de componentes para edição do esquema, que contém um conjunto de componentes típicos e os comandos principais de edição. A figura representa também uma tabela com as principais teclas rápidas do programa.

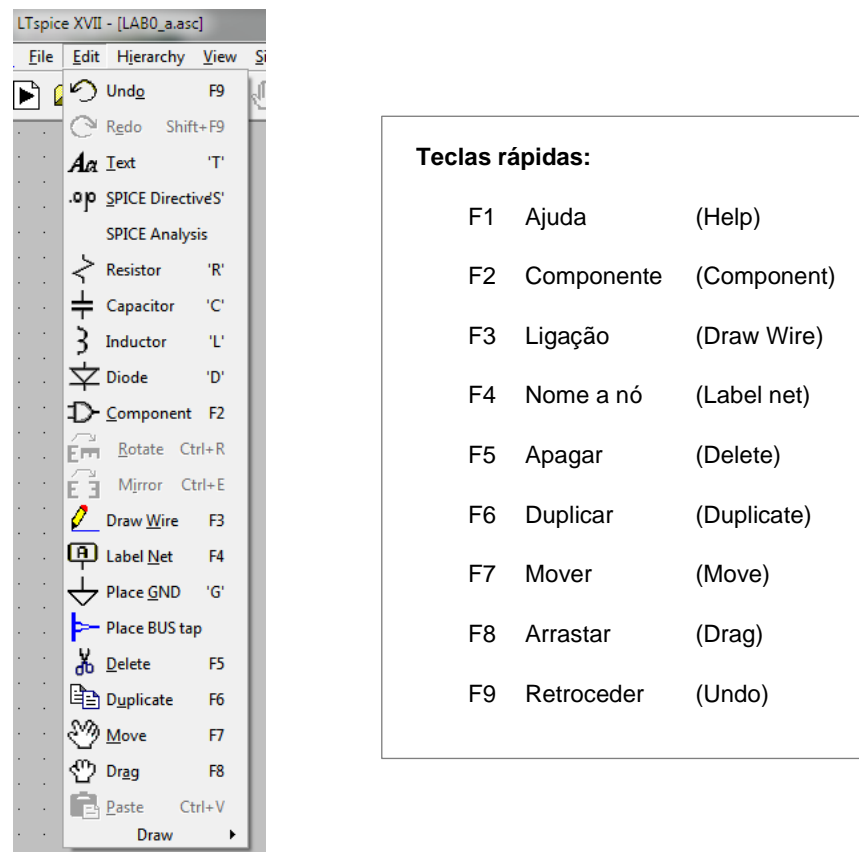




Figura 4 – Menu de componentes do LTspice para edição do esquema e teclas rápidas.



Na Figura 5 apresentam-se os botões para edição do esquema (presentes na parte superior da janela do programa) com os comandos principais de edição.



Figura 5 – Botões para edição do esquema.

Para colocar um componente selecione **Edit → Component** (tecla F2 ou símbolo ) e escolha um dos componentes disponíveis na lista. Pode também usar os botões da interface. A Figura 6 apresenta parte dessa lista podendo também usar os botões referidos acima. A Figura 6 apresenta essa lista onde estão assinalados os três componentes necessários para o esquema da Figura L1.1: fonte de tensão (“*voltage*”), transístor nmos (“*nmos*”) e transístor pmos (“*pmos*”).

A posição de um componente pode ser modificada com o comando **Edit → Move** (ou tecla F7 ou símbolo ) , selecionando o componente a ser deslocado. Através de CNTRL R e CNTRL E o componente pode ser rodado ou espelhado.

Depois de colocados os componentes e o nó de referência (Ground ou símbolo ) , que é obrigatório, complete as ligações com **Edit → Draw wire** (tecla F3 ou símbolo ) . Edite o valor da fonte de tensão ligada ao transístor pmos para atribuir o valor de V_{DD} , premindo a tecla direita do rato sobre o valor atribuído por defeito “V”.

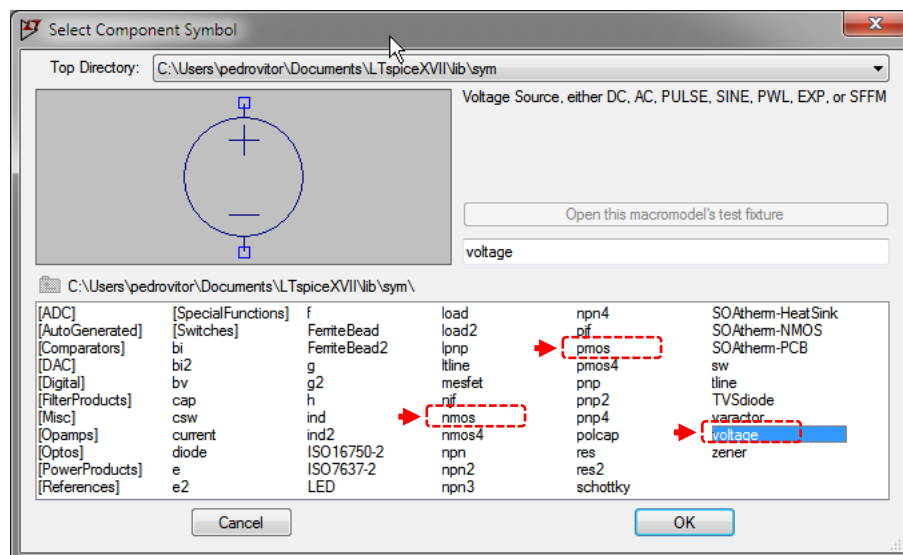


Figura 6 – Componentes da biblioteca do LTspice.

Modelo dos transístores MOS

Crie, a partir dos transístores pmos e nmos, modelos para os dois transístores P4007 e N4007. Premindo a tecla CTRL e o botão direito do rato sobre o transístor altere o campo Value de NMOS para N4007 e de PMOS para P4007, para os transístores nmos e pmos, respetivamente. Na Figura 7 ilustra-se a criação de um modelo para o transístor P4007.

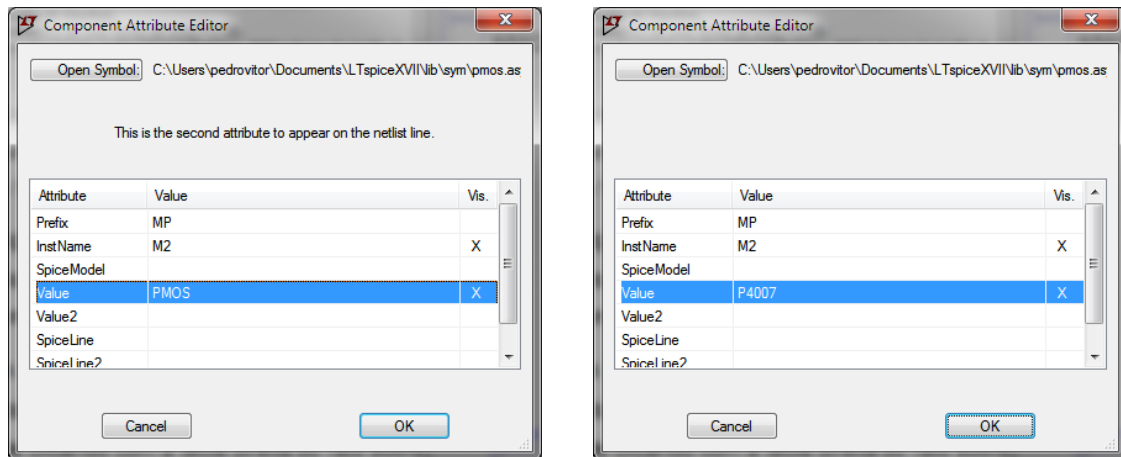


Figura 7 – Identificação de um novo modelo para o transistor pmos.

Associe os modelos da *Tabela* e as dimensões da *Tabela* aos símbolos criados para os modelos dos transistores N7007 e P4007, criando uma diretiva para o SPICE com o comando **Edit → Spice Directive**. A Figura 8 mostra a introdução das dimensões ($W=150\mu$, $L=5\mu$) e dos parâmetros do modelo ($TOX=70n$ $KP=16\mu$ $VTO=-1.7V$ $GAMMA=1.0$ $CBD=0.2p$ $CBS=0.2p$ $MJ=0.75$ $LAMBDA=20m$) e para o transistor P4007 e a Figura 10 o esquema final com modelos assumindo $V_{DD}=6V$.

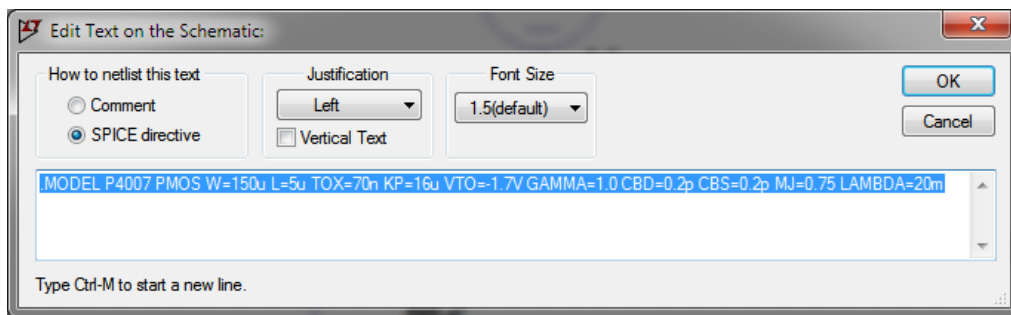


Figura 8 – Associação de um modelo ao símbolo P4007.

A Figura 9 ilustra o resultado final do esquema do inversor CMOS com os modelos dos transistores.

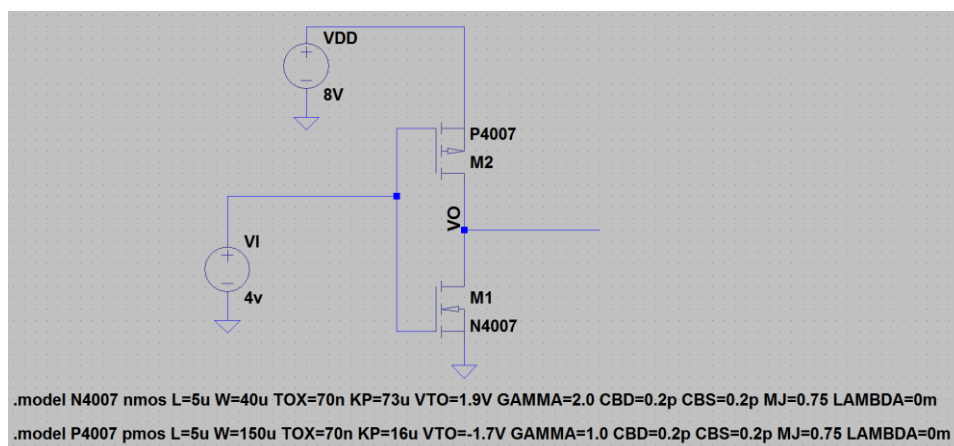


Figura 9 – Esquema final com modelos (com $V_{DD}=8V$ e $v_i=V_{DD}/2$).

Para facilitar a introdução da informação nos modelos dos dois transistores poderá fazer copy e paste

das seguintes linhas:

```
NMOS .MODEL N4007 NMOS W=40u L=5u TOX=70n KP=73u VTO=1.9V GAMMA=2.0 CBD=0.2p CBS=0.2p MJ=0.75 LAMBDA=20m
```

```
PMOS .MODEL P4007 PMOS W=150u L=5u TOX=70n KP=16u VTO=-1.7V GAMMA=1.0 CBD=0.2p CBS=0.2p MJ=0.75 LAMBDA=20m
```

Simulação

Para simular o circuito, defina o tipo de análise a efetuar, utilizando o comando **Edit → Spice analysis**. Na Figura 10 aparecem os tipos de análise possíveis, devendo dar o OK na janela e colocar sobre o esquema o termo correspondente à análise:

- Para calcular os valores no ponto de funcionamento em repouso (tensões e correntes DC), selecione “*DC op pnt*” (Figura 10).
- Para obter gráficos de tensões ou correntes DC para diferentes valores de uma fonte selecione “DC Sweep”, preenchendo os valores tal como se representa na Figura 11, correspondente a variar v_i de forma linear entre 0 e 10V com um passo de 0.01V (ou seja 1000 pontos).
- Para obter gráficos das tensões de entrada e de saída no domínio do tempo selecione “*Transient*”, preenchendo os valores tal com se representa na Figura 12, correspondente a uma análise desde $t=0$ a $t=10\mu s$ e com um passo máximo de 0.1ns.

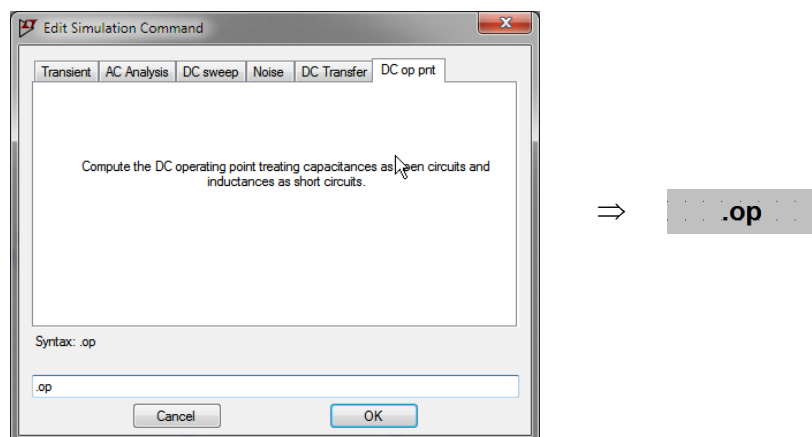
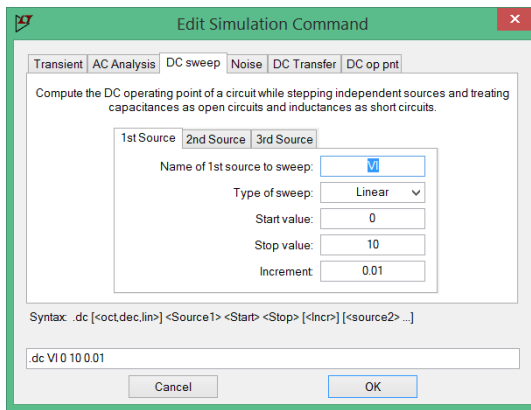
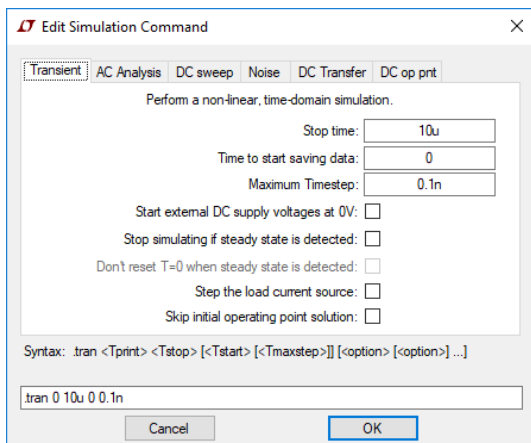


Figura 10 – Definição do tipo de simulação – “*DC op pnt*”.



⇒ `.dc VI 0 10 0.01`

Figura 11 – Definição do tipo de simulação – “DC sweep”.





⇒ `.tran 0 10u 0 0.1n`

Figura 12 – Definição do tipo de simulação – “Transient”.

Para qualquer das simulações tem que se indicar qual o tipo de sinal da fonte de tensão (VI no caso da Figura 9) do circuito:

- Para a análise DC $V_{DD}/2$ DC (ou outro valor)
- Para a análise DC sweep Variando de 0 a V_{CC}
- Para a análise transitória Onda quadrada (“PULSE”) variando de 0 a V_{DD}

A ordem de simulação é dada através do menu **Simulate** → **Run** (ou símbolo ).

Na Figura 13 apresenta-se o resultado da simulação do ponto de funcionamento em repouso para $V_{DD}=8V$ e $v_i=V_{DD}/2$. Os resultados das tensões dos nós e das correntes nos ramos podem ser visualizados sobre o circuito (premindo a tecla direito do rato sobre o nó que se pretende medir e seleccionando “Place .op data label” – ) ou na janela de texto que aparece após a simulação.

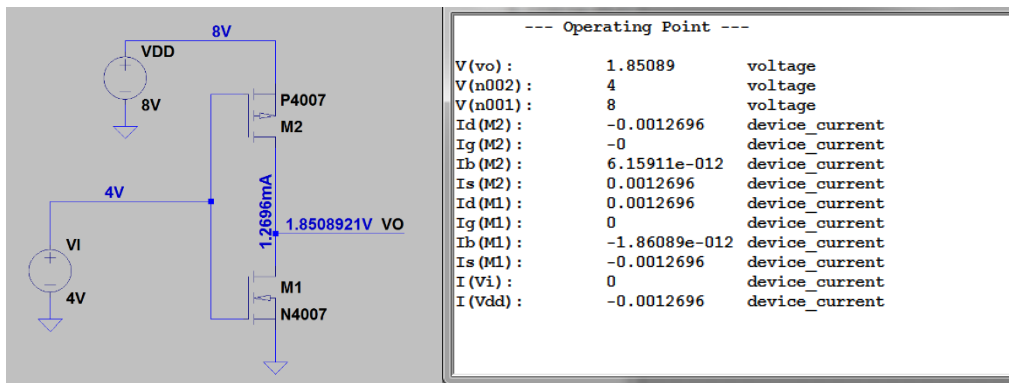


Figura 13 – Simulação do ponto de funcionamento em repouso para $V_I = 4$ V.

A Figura 14 mostra a configuração de uma fonte de tensão (voltage) como gerador de impulsos (“PULSE”). Para obter a janela de configuração, pressione o botão direito do rato sobre a fonte (VI na Figura 13).

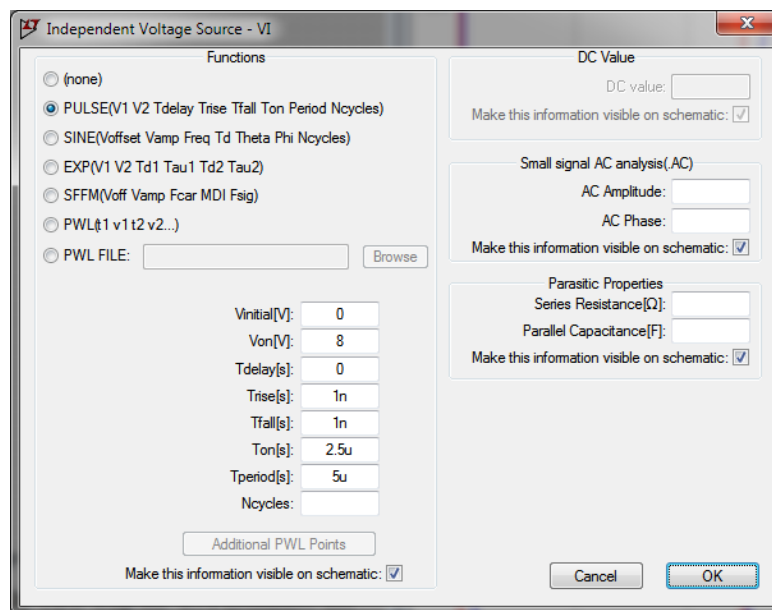


Figura 14 – Gerador de impulsos.

Os parâmetros a preencher para “PULSE” são apresentados na figura Figura 15, sendo que na Figura 14 foi considerada uma fonte com valor mínimo 0V, máximo 8V, sem atraso, com tempos de subida e descida muito baixos (1ns), largura de impulso ($T_{on} = 2.5\mu s$) e período ($T_{period} = 5\mu s$), correspondente a uma onda quadrada de 200kHz com *duty-cycle* de 50%.

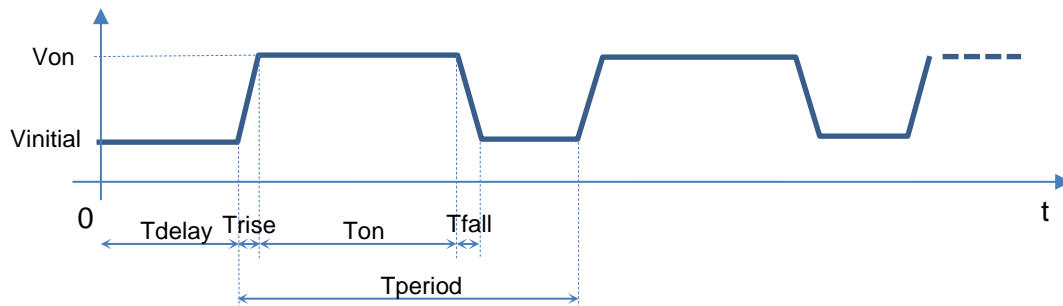


Figura 15 – Parâmetros de uma forma de onda PULSE.

Visualização de formas de onda

Após ser dada a ordem de simulação o utilizador deverá indicar os sinais que pretende obter graficamente. Para tal ou clica sobre os respetivos nós do circuito ou executa os comandos **Plot Settings** → **Visible Traces** e **Plot Settings** → **Add Traces** que permitem especificar as formas de onda a visualizar. Permitem também especificar operações matemáticas que podem ser realizadas sobre os resultados de simulação. A derivada $d(x)$ é um dos exemplos de operação que pode ser efetuada.

A Figura 16 representa um exemplo de simulação do circuito da Figura L1.1 no domínio do tempo (“*Transient*”), considerando uma onda quadrada em V1 (“*PULSE*”).

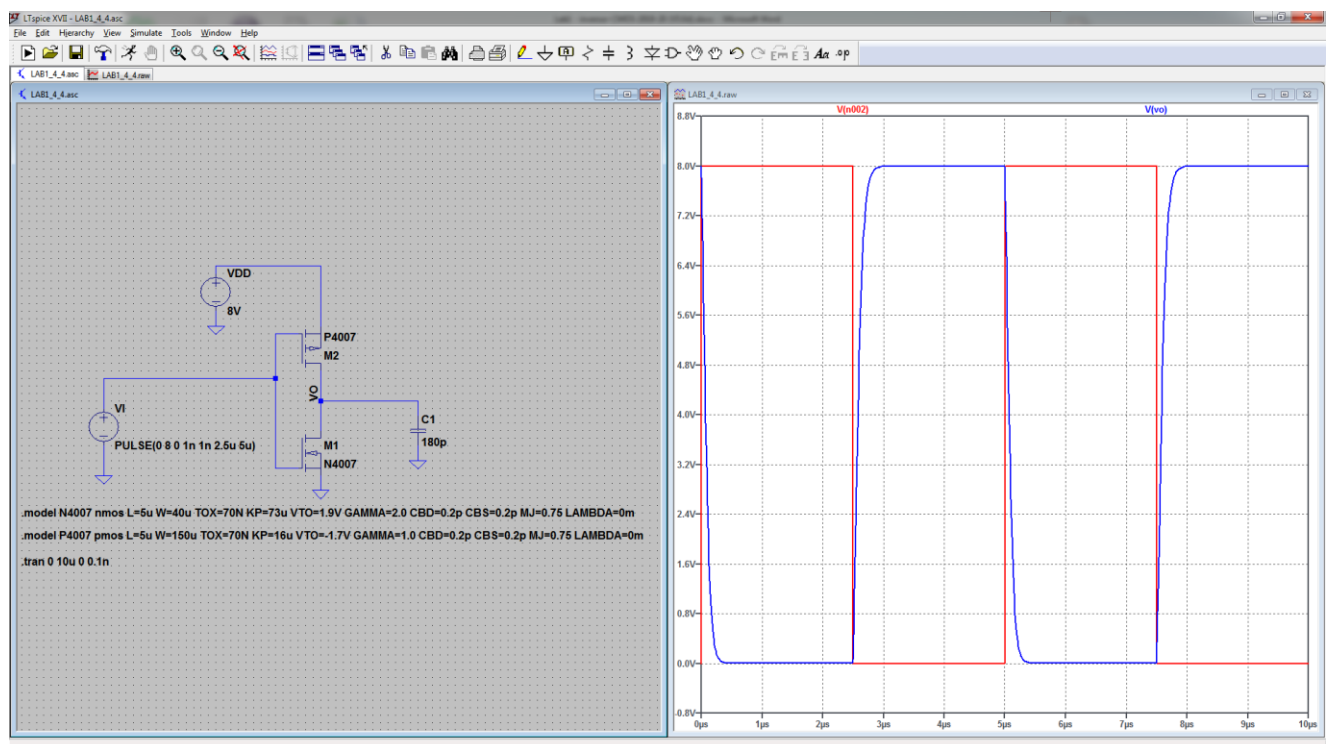


Figura 16 – Simulação do circuito da Figura L1.1 no domínio do tempo com uma onda quadrada em V1.

Anexo B. Osciloscópio

Este anexo contém apenas a descrição dos comandos dos osciloscópios referidos na Secção 5, em particular alguns dos que permitem obter as medidas experimentais. Para utilizar o osciloscópio recomenda-se a consulta dos manuais [4] ou [5], para o osciloscópio configurado em língua portuguesa ou inglesa, respetivamente.

A Figura 17 mostra o painel frontal dos osciloscópios InfiniiVision 2000 X-Series da Keysight Technologies (anteriormente Agilent) com indicação da funcionalidade das várias teclas.

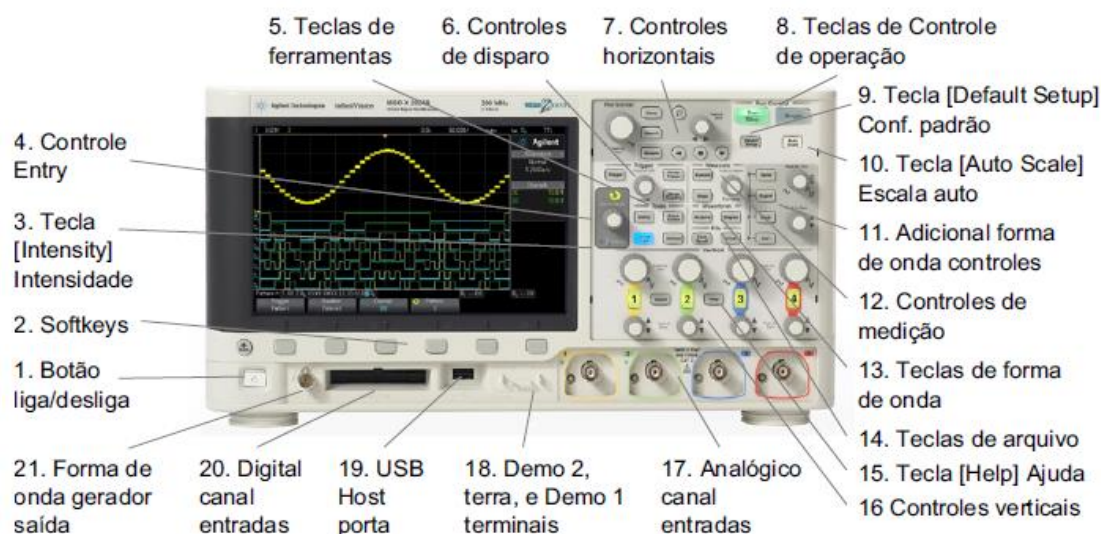


Figura 17 – Painel frontal dos osciloscópios InfiniiVision 2000 X-Series (extraído de [4]).

Acoplamento AC e CC

Primeiro selecione o botão do canal botão (1, 2, 3 ou 4) para o qual pretende definir o tipo de acoplamento. Em seguida escolha o tipo de acoplamento no menu de canal, rodando o botão ENTRY (Controle Entry na Figura 17) ou usando a *softkey* por baixo do respetivo menu. No exemplo da Figura 18 foi selecionado o canal 2, vendo-se no respetivo menu de canal (Menu 2Canal) que o acoplamento é do tipo CC.

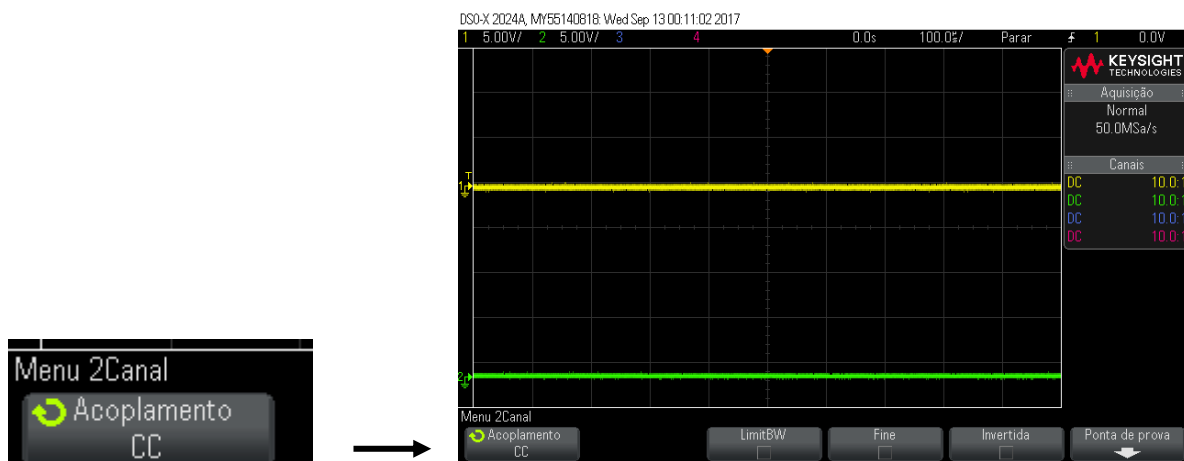


Figura 18 – Acoplamento AC e CC

Modo XY

Pressione a tecla **[Horiz]** do painel frontal. Selecione o modo "XY" no **Menu Horizontal** girando o botão **ENTRY** ou usando a *softkey* por baixo do menu (Menu Horizontal) como se mostra na Figura 19.

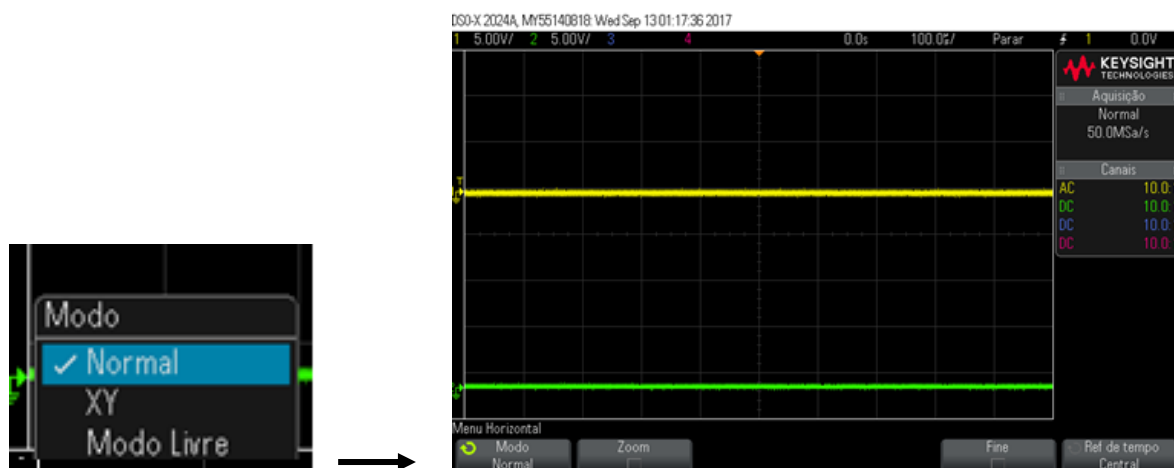


Figura 19 – Menu horizontal.

Centre o sinal no ecrã com os botões de controlo de posição dos canais 1 e 2 (). Use os botões de controlo das escalas (volts/div) dos canais 1 e 2 e as *softkeys* Fine (pressione a tecla **[Horiz]**) para expandir o sinal e tornar a sua visualização adequada.

Medições de tempos de propagação

Para fazer medições automáticas pressione a tecla **[Meas]** do painel frontal. Rode o botão **ENTRY** ou use a *softkey* **Fonte** por baixo do menu Medição, para selecionar o canal de uma das formas de onda. Pressione a *softkey* **Tipo**, e gire o botão **Entry** ou pressione a *softkey* para selecionar o tipo de medição. A Figura 20 mostra o menu com alguns dos tipos de medição que podem ser efetuados

(frequência e amplitude pico-a-pico do canal 1).

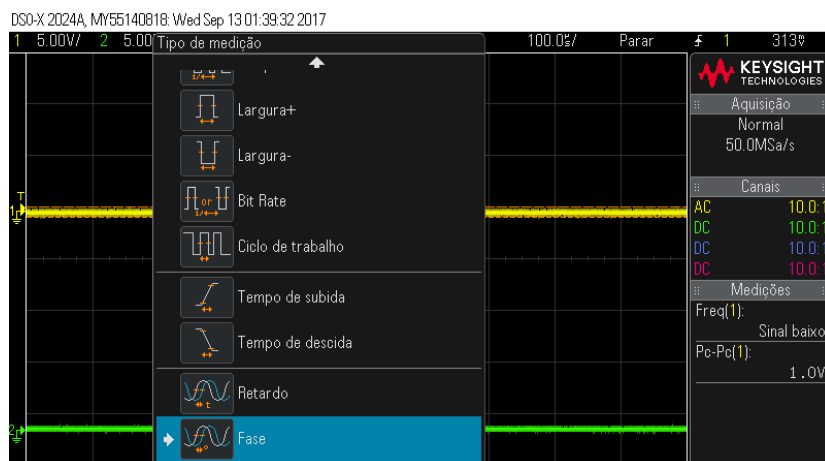


Figura 20 – Medições automáticas

Para medir o atraso entre duas ondas selecione o tipo de medição **Retardo** (*Delay*). O atraso medido é a diferença de tempo entre os pontos médios da transição selecionada para a fonte 1 e a transição selecionada para a fonte 2, mais próximas do ponto de referência do disparo (*trigger*). Na configuração padrão são consideradas as transições ascendentes das duas formas de onda como se vê na Figura 21. Valores de atraso negativo indicam que a transição selecionada para a fonte 1 ocorreu após a transição selecionada da fonte 2.



Figura 21 – Medição do atraso (retardo).

Para definir o atraso entre tipos diferentes de transição, depois de selecionar a fonte, pressione a **softkey Definições** para configurar o tipo de transição (L→H ou H→L) para cada uma das fontes (canais). Na Figura 22 configurou-se as seguintes medições:

- t_{pHL} : Retardo (delay), com o Canal 1 na transição L→H e o Canal 2 na transição H→L
- t_{pLH} : Retardo (delay), com o Canal 1 na transição H→L e o Canal 2 na transição L→H
- t_r : Tempo de subida para o Canal 2
- t_f : Tempo de descida para o Canal 2

Depois de configurar as transições, pressione a tecla **BACK** (⏮) para retornar ao menu **Medição**. Pressione a **softkey Adicionar Medição** para acrescentar a medida no ecrã do osciloscópio.

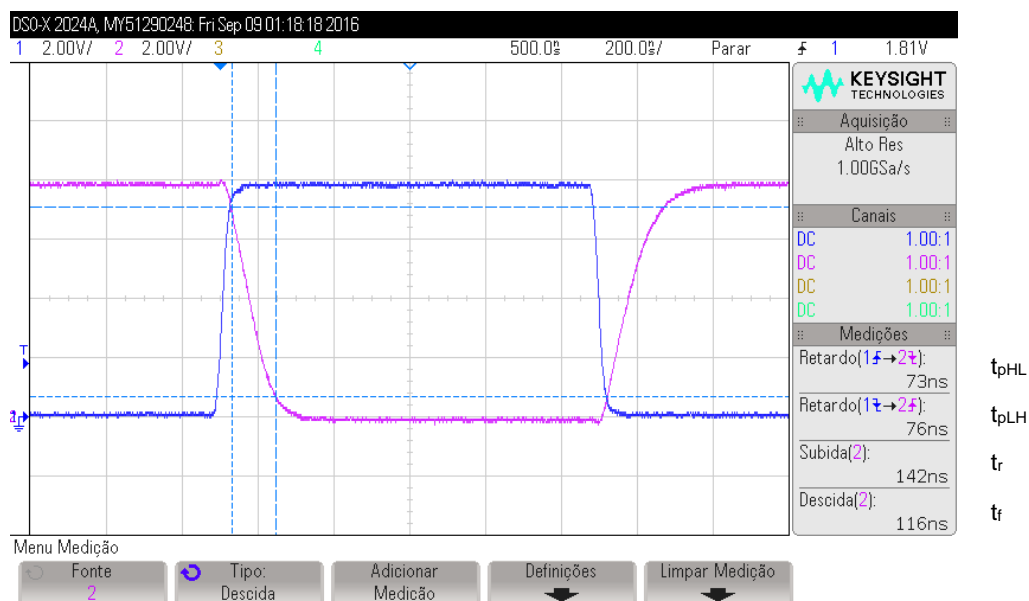


Figura 22 – Medição dos tempos de propagação e de subida/descida.

Modo de Aquisição



Os modos de aquisição de **Alta Resolução** e de **Média** reduzem o ruído aleatório e melhoram a resolução vertical. Para usar estes modos, pressione a tecla **[Acquire]** do painel frontal e gire o botão **Entry** ou pressione a *softkey* para selecionar o modo **Alta Resolução** ou de **Médias** no Menu aquisição. Se o sinal for repetitivo e muito estável o modo de médias resulta muito bem, particularmente melhor que o da alta resolução, em especial para um número de médias elevado de 128 ou superior, devendo ter-se em atenção que para um número de medias muito elevado os osciloscópio demora mais tempo a estabilizar as medições.

Guardar imagens e formas de onda visualizadas

Para guardar as formas de onda visualizadas ou os dados das medições, utilize o osciloscópio em modo de aquisição de médias (**Média**), porque reduz o ruído, ficando o gráfico com melhor definição. As formas de onda visualizadas podem ser armazenados num dispositivo de armazenamento USB ou obtidas no PC da bancada que está ligado ao osciloscópio.

Para transferir a informação de um dispositivo de armazenamento USB, após colocar a PEN USB no osciloscópio prima a tecla **[Save/Recall]**, de seguida deve selecionar o tipo de ficheiro através da *softkey* **Formato** (PNG ou BMP para imagem e CSV para dados, que podem depois ser trabalhados no Excel) e finalmente premir a *softkey* **Salvar** para guardar a informação na PEN.

Para obter as formas de onda no PC:

- Abra o programa Excel e selecione o menu **Add-Ins** (Figura 23), ficando com acesso às opções indicadas na Figura 24.
- Se seleccionar a opção  (*Get Waveform Data*), obtém os valores das formas de onda em colunas do ficheiro em função do tempo e a respetiva representação gráfica como se vê Figura 24 (a).
- Se seleccionar a opção  (*Get Screen Image*), obtém a imagem do osciloscópio como se vê Figura 24 (b). Nesta opção, pode ainda escolher armazenar o ficheiro com a imagem num diretório do PC.

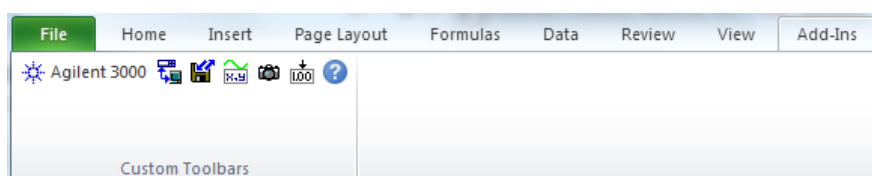


Figura 23 – Opções de aquisição das formas de onda visíveis no osciloscópio.

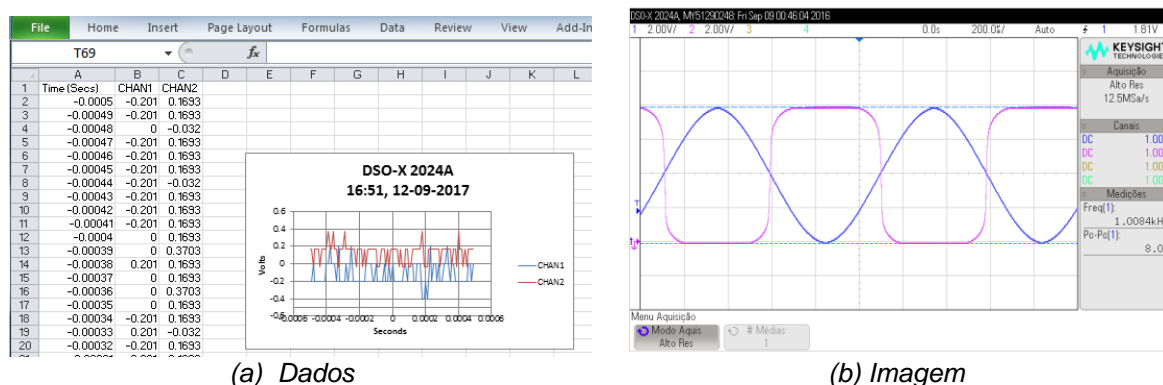
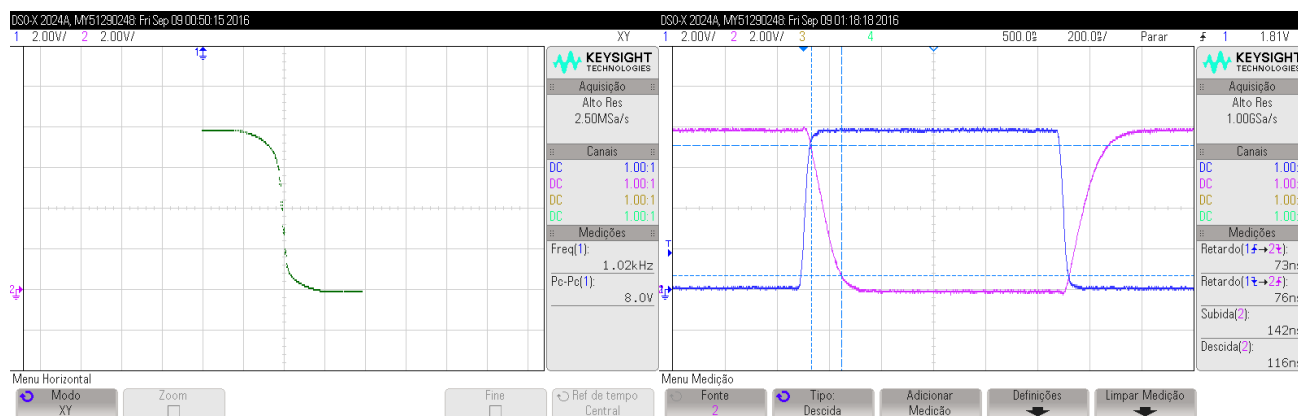


Figura 24 – Formas de onda visíveis no osciloscópio.

Exemplos de imagens obtidas

A Figura 25 mostra dois exemplos de imagens obtidas nos pontos 5.5 (com o osciloscópio em modo xy) e 5.6 (Fonte onda quadrada) deste guia.



(i) Modo xy

(ii) Fonte onda quadrada

Figura 25 – Exemplos de imagens obtidas com o osciloscópio.

Referências

- [1] Texas Instrument, "CMOS Dual Complementary Pair Plus Inverter," 2003.
- [2] Linear Technology, "LTSpice IV," 2017.
- [3] Simonbramble.co.uk, "LTspice Tutorials," [Online]. Available: http://www.simonbramble.co.uk/lt_spice/ltspice_lt_spice.htm. [Acedido em 26 7 2017].
- [4] Agilent, "Guia do usuário Osciloscópios Agilent InfiniiVision 2000 série-X," 2013.
- [5] Keysight Technologies, "InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes, User's Guide," 2013.