



TÉCNICO
LISBOA

Eletrónica I

1º Semestre 2019/2020

LAB1

1º Trabalho de Laboratório Inversor CMOS

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área Científica de Eletrónica

Histórico de revisões

Data	Versão	Descrição	Autores
Setembro 2008	1	Versão inicial	Teresa Mendes de Almeida, Fernando Gonçalves
Setembro 2014	2	Primeira revisão	
Setembro 2016	3	Segunda revisão - Ajuste do modelo do CI	Jorge Fernandes, João Costa Freire, Helena Sarmento, Pedro Vítor
Setembro 2017	4	Anexos A e B; revisão do texto	Helena Sarmento
Setembro 2019	5.0d	Versão 1º Semestre 2019/2020	Pedro Vítor
Março 2020	5.0e	Versão 2º Semestre 2019/2020	Pedro Vítor

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 em duas sessões:

- Antes da primeira sessão deve ser realizada a análise teórica do circuito, conforme a secção 3 deste guia e uma preparação prévia para a simulação elétrica do circuito, particularmente na utilização do simulador utilizado LTspice [2] [3].
- Na primeira sessão devem ser realizadas as simulações elétricas do circuito, conforme secção 4 deste guia e ser apresentados ao docente os resultados da análise teórica e da simulação. Caso disponham de tempo livre, podem aproveitar esta sessão para a montagem do circuito e a realização de algumas medidas experimentais.
- A segunda sessão de laboratório serve para realizar as medições experimentais e terminar o relatório.

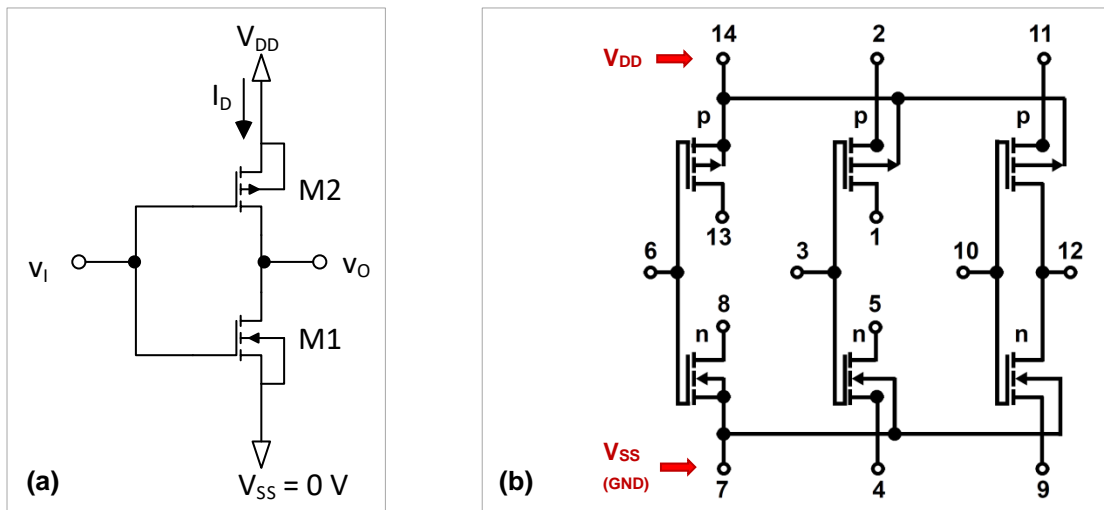


Figura 1 – (a) Circuito inversor CMOS e (b) esquema interno do circuito integrado.

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

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

Tabela 1 – 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 $C_L = C_p = 180$ 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). Determine também os tempos de atraso de propagação quando adiciona ainda uma capacidade C_1 (indicada na Tabela 5), ficando $C_L = C_p + C_1$.

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 enriquecimento	pMOS enriquecimento
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

Para realizar a simulação do funcionamento do inversor CMOS utilize os valores de W e L indicados na *Tabela 1* e os parâmetros indicados na *Tabela 2*. 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 2 – 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

Considere inicialmente no modelo dos transístores $\lambda = 0$ (LAMBDA=0) para comparar os resultados da simulação com os da análise teórica:

- 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.

Nota: Para $\lambda = 0$ a transição da característica de transferência de $v_o(v_i)$ tem um declive extremamente elevado, pelo que deve ser escolhido um número de pontos de varrimento adequado para a representação dessa característica de forma o mais precisa possível.

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 . Obtenha um gráfico das tensões de entrada e de saída fazendo uma análise no domínio do tempo (“*Transient*”) nas seguintes situações:
 - $C_1 = 0$, $C_L = C_p = 180 pF$;
 - $C_L = C_p + C_1$ em que o valor de C_1 é o indicado na *Tabela 5*.

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.

- 4.5. Compare os valores obtidos na simulação com os valores obtidos na análise teórica e comente as diferenças encontradas nos valores máximos da corrente i_D , das tensões e correntes em repouso; das tensões V_{OL} , V_{OH} , V_{IL} , V_{IH} ; das margens de ruído NML e NMH; e dos tempos de atraso de propagação (t_{pLH} , t_{pHL} e t_p).

Considere agora o modelo dos transístores com $\lambda = 20 \text{ mV}^{-1}$:

- 4.6. Obtenha o gráfico de $i_D(v_i)$.
- 4.7. Obtenha 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.
- 4.8. Compare os valores obtidos na simulação com $\lambda = 0$ e $\lambda = 20 \text{ mV}^{-1}$ e comente as diferenças nos valores obtidos para a corrente i_D máxima, para as tensões V_{OL} , V_{OH} , V_{IL} , V_{IH} , e para as margens de ruído NML e NMH.

5. Trabalho Experimental

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

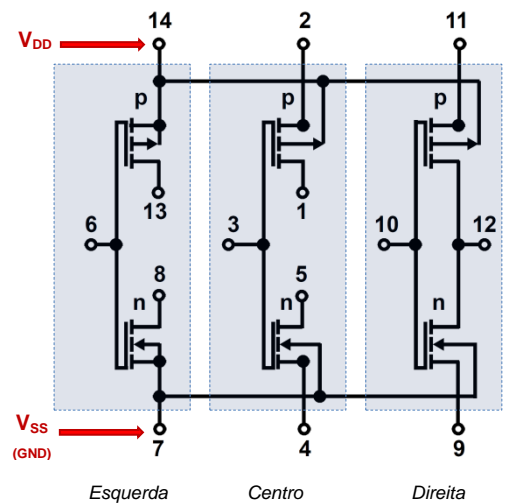


Figura 1 (b)

- 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 1 (b). 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 registando 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 (C_1 conforme *Tabela 5*).

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 3.5.

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 4.8. Sempre que se justifique assinale os valores pedidos sobre os próprios gráficos.
- **Trabalho experimental** que inclui as respostas e gráficos referentes às questões 5.3 a 5.6.
- **Análise dos resultados** que compara os valores obtidos e comenta as diferenças encontradas, devendo incluir as tabelas de comparação de resultados devidamente preenchidas, cujos modelos (Tabela 3 e Tabela 4) são dados através de um ficheiro Excel que deve ser editado e alterado da forma que se considere mais conveniente:
 - Análise comparativa de resultados teóricos, de simulação e experimentais, conforme *Tabela 3* (valores máximos da corrente i_D ; tensões e correntes em repouso; tensões V_{OL} , V_{OH} , V_{IL} , V_{IH} ; margens de ruído NML e NMH; tempos de atraso de propagação t_{PHL} , t_{PLH} e t_P) e das características de transferência.
 - Análise comparativa de resultados de simulação para $\lambda=0$ e $\lambda\neq 0$ relativos à *Tabela 4* (valor máximo da corrente i_D ; tensões V_{OL} , V_{OH} , V_{IL} e V_{IH} ; margens de ruído NML e NMH) e características de transferência.

Tabela 3 - Comparação resultados teóricos, simulação e experimentais

VDD = <colocarVDD>			Teóricos		Simulação			Experimentais		
			Secção	Valores	Secção	Valores	Comparação c/ teóricos	Secção	Valores	Comparação c/ teóricos
Tensões e correntes em repouso	vo(0)	(V)	3.1		4.1		#DIV/0!	5.3		#DIV/0!
	iD(0)	(mA)					#DIV/0!			#DIV/0!
	vo(VDD/2)	(V)					#DIV/0!			#DIV/0!
	iD(VDD/2)	(mA)					#DIV/0!			#DIV/0!
	vo(VDD)	(V)					#DIV/0!			#DIV/0!
	iD(VDD)	(mA)					#DIV/0!			#DIV/0!
Corrente iD máxima	iDmax	(mA)	3.3		4.2		#DIV/0!			#DIV/0!
Tensões limite e margens de ruído	VOL	(V)	3.4		4.3		#DIV/0!	5.5		#DIV/0!
	VOH	(V)					#DIV/0!			#DIV/0!
	VIL	(V)					#DIV/0!			#DIV/0!
	VIH	(V)					#DIV/0!			#DIV/0!
	NML	(V)					#DIV/0!			#DIV/0!
	NMH	(V)					#DIV/0!			#DIV/0!
Tempos de propagação (C ₁ =0)	tpLH	(ns)	3.5		4.4		#DIV/0!	5.6		#DIV/0!
	tpHL	(ns)					#DIV/0!			#DIV/0!
	tp	(ns)					#DIV/0!			#DIV/0!
Tempos de propagação (C ₁ =<colocar valor> pF)	tpLH	(ns)	3.5		4.4		#DIV/0!	5.6		#DIV/0!
	tpHL	(ns)					#DIV/0!			#DIV/0!
	tp	(ns)					#DIV/0!			#DIV/0!

NOTAS:

1. Preencher os valores das células a azul
2. Preencher os valores dos campos assinalados entre "<" e ">" (valores de V_{DD} e C₁)
3. Colocar o número de casas decimais da forma que for mais conveniente

Tabela 4 - Comparação das simulações com $\lambda = 0$ e $\lambda \neq 0$.

VDD = <colocarVDD>			Simulação om $\lambda=0$		Simulação om $\lambda \neq 0$		
			Secção	Valores	Secção	Valores	Comparação c/ $\lambda=0$
Corrente iD máxima	iDmax	(mA)	4.3		4.6		#DIV/0!
Tensões limite e margens de ruído	VOL	(V)	4.4		4.7		#DIV/0!
	VOH	(V)					#DIV/0!
	VIL	(V)					#DIV/0!
	VIH	(V)					#DIV/0!
	NML	(V)					#DIV/0!
	NMH	(V)					#DIV/0!

NOTAS:

1. Preencher os valores das células a azul
2. Preencher os valores dos campos assinalados entre "<" e ">" (valor de V_{DD})
3. Colocar o número de casas decimais da forma que for mais conveniente

Apresentação

O relatório deve ter em conta os seguintes princípios:

- Possui apenas figuras e tabelas (não há gráficos, quadros, etc.) que devem ser centradas horizontalmente na página. Todas as figuras e tabelas devem ser legendadas, referenciadas no texto, ter um tamanho de carácter adequado para fácil leitura e não ultrapassar as margens do relatório. A legenda das figuras deve vir depois destas e a das tabelas antes.

- As figuras contendo gráficos devem possuir legendas nos dois eixos, com a entidade representada e respetivas unidades, como 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 de seguida:

$$i_D = k(v_{GS} - V_t)^2 \quad (1)$$

- As equações devem ser referidas no texto apenas pelo seu número, como por exemplo (1).
- 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 relacionados com o número do grupo

Os valores de V_{DD} e C_1 dependem do número do grupo de acordo com a *Tabela 5*.

Tabela 5 - Valores de V_{DD} e C_1

Grupo nº				V_{DD} (V)
1	2	3	4	6
5	6	7	8	7
9	10	11	12	8
13	14	15	16	9
17	18	19	20	10
21	22	23	24	6
25	26	27	28	7
29	30	31	32	8
33	34	35	36	9
37	38	39	40	10
41	42	43	44	6
45	46	47	48	7
49	50	51	52	8
53	54	55	56	9
57	58	59	60	10
390	470	560	680	C_1 (pF)

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 1.

Criação do diagrama esquemático

No LTSpice crie um novo esquema (File → New Schematic). Coloque no esquema os componentes da Figura 1: um transístor pmos, um transístor nmos e duas fontes de tensão (voltage). Coloque também o nó de referência GND. Na Figura 2 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.

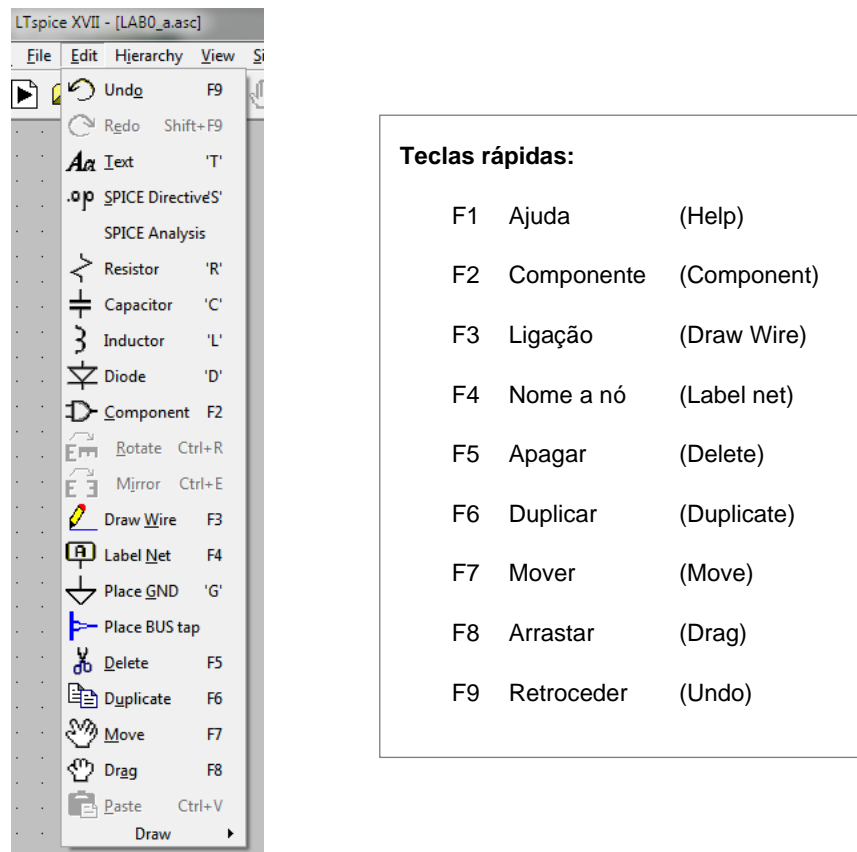




Figura 2 – Menu de componentes do LTSpice para edição do esquema e teclas rápidas.



Na Figura 3 apresentam-se os botões para edição do esquema (presentes na parte superior da janela do programa) com os comandos principais de edição.



Figura 3 – 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 4 apresenta parte dessa lista podendo também usar os botões referidos acima. A Figura 4 apresenta essa lista onde estão assinalados os três componentes necessários para o esquema da Figura 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”.

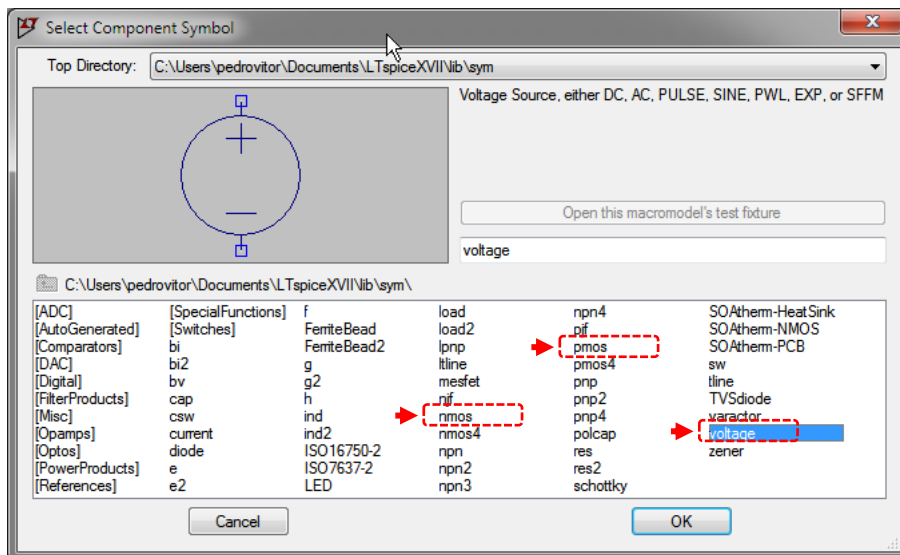


Figura 4 – Componentes da biblioteca do LTspice.

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 5 ilustra-se a criação de um modelo para o transístor P4007.

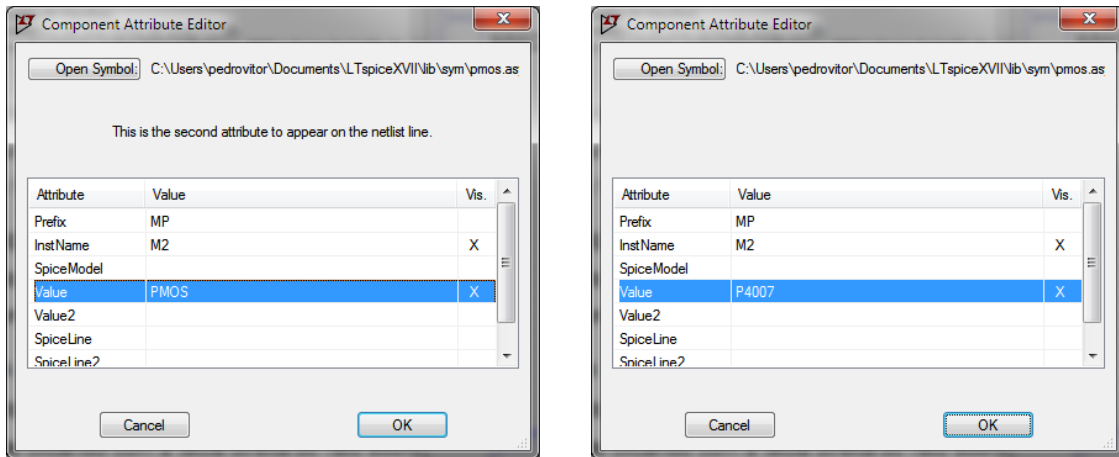


Figura 5 – Identificação de um novo modelo para o transístor pmos.

Associe os modelos da *Tabela 2* e as dimensões da *Tabela 1* aos símbolos criados para os modelos dos transístores N7007 e P4007, criando uma diretiva para o SPICE com o comando **Edit → Spice Directive**. A Figura 6 mostra a introdução das dimensões ($W=150\mu$, $L=5\mu$) e dos parâmetros do modelo ($TOX=70\text{nm}$ $KP=16\mu$ $VTO=-1.7\text{V}$ $GAMMA=1.0$ $CBD=0.2\text{p}$ $CBS=0.2\text{p}$ $MJ=0.75$ $LAMBDA=20\text{m}$) e para o transístor P4007 e a Figura 8 o esquema final com modelos assumindo $V_{DD}=6\text{V}$.

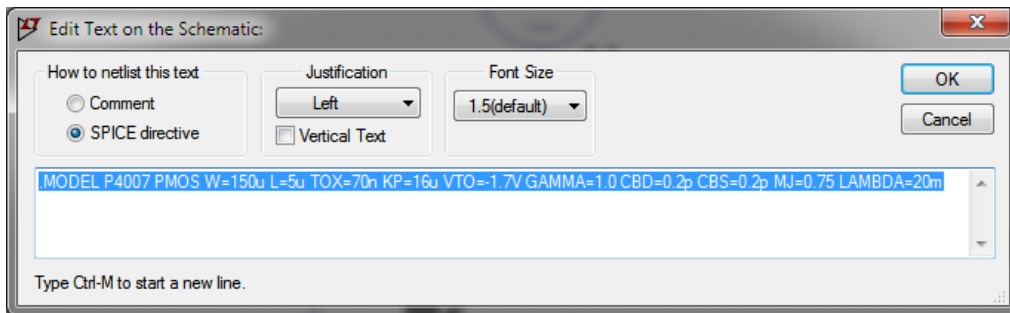


Figura 6 – Associação de um modelo ao símbolo P4007.

A Figura 7 ilustra o resultado final do esquema do inversor CMOS com os modelos dos transístores.

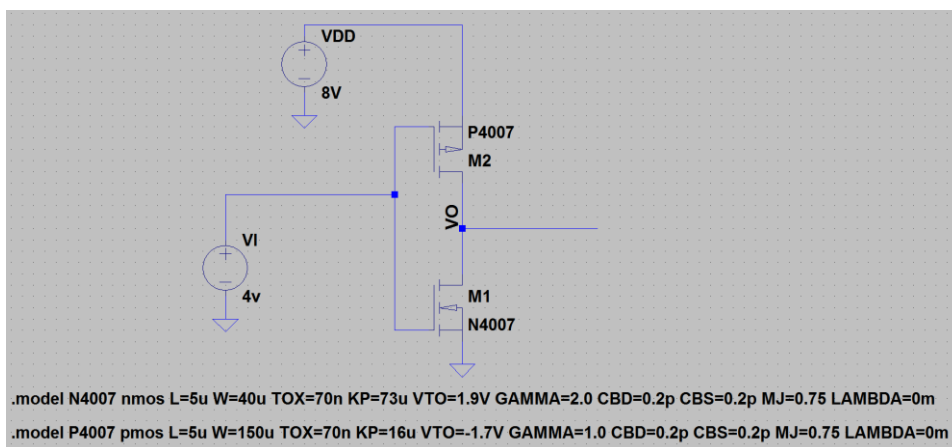


Figura 7 – Esquema final com modelos (com $V_{DD}=8\text{V}$ e $v_i=V_{DD}/2$).

Para facilitar a introdução da informação nos modelos dos dois transístores 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 8 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), seleccione “*DC op pnt*” (Figura 8).
- Para obter gráficos de tensões ou correntes DC para diferentes valores de uma fonte seleccione “DC Sweep”, preenchendo os valores tal como se representa na Figura 9, 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 seleccione “*Transient*”, preenchendo os valores tal como se representa na Figura 10, correspondente a uma análise desde $t=0$ a $t=10\mu s$ e com um passo máximo de 0.1ns.

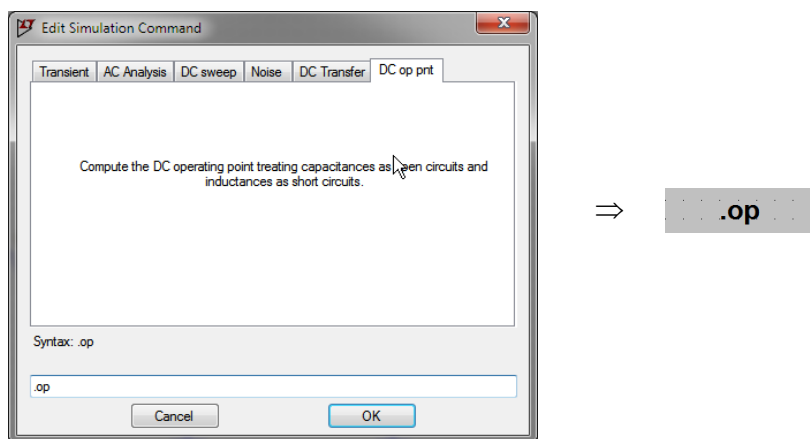
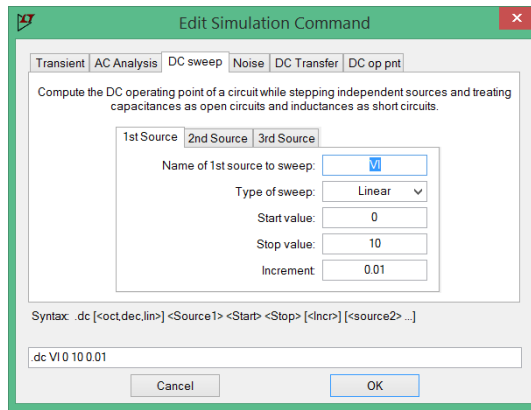
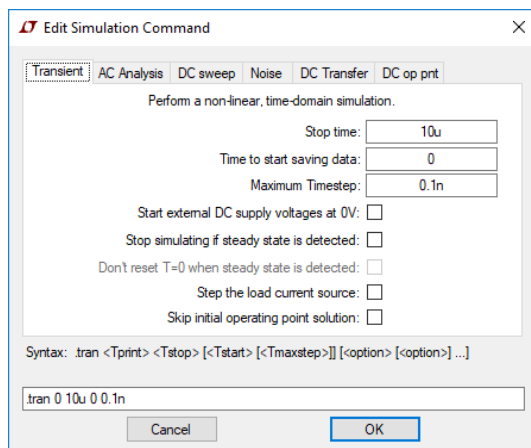


Figura 8 – Definição do tipo de simulação – “*DC op pnt*”.



⇒ `.dc VI 0 10 0.01`

Figura 9 – Definição do tipo de simulação – “DC sweep”.





⇒ `.tran 0 10u 0 0.1n`

Figura 10 – 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 7) 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 VDD

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

Na Figura 11 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 selecionando “Place .op data label” – ) ou na janela de texto que aparece após a simulação.

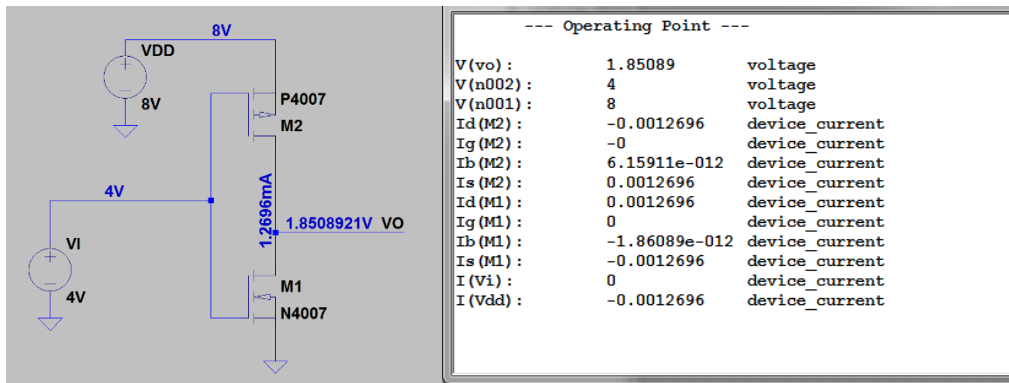


Figura 11 – Simulação do ponto de funcionamento em repouso para $V_I = 4\text{ V}$.

A Figura 12 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 (V_I na Figura 11).

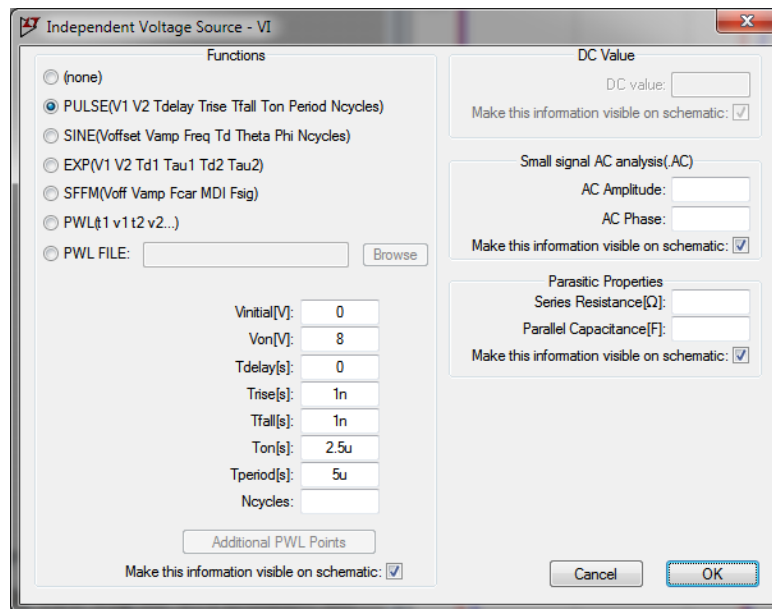


Figura 12 – Gerador de impulsos.

Os parâmetros a preencher para “PULSE” são apresentados na figura Figura 13, sendo que na Figura 12 foi considerada uma fonte com valor mínimo 0V, máximo 8V, sem atraso, com tempos de subida e descida muito baixos (1ns), largura de impulso ($T_{on}=2.5\mu\text{s}$) e período ($T_{period}=5\mu\text{s}$), correspondente a uma onda quadrada de 200kHz com *duty-cycle* de 50%.

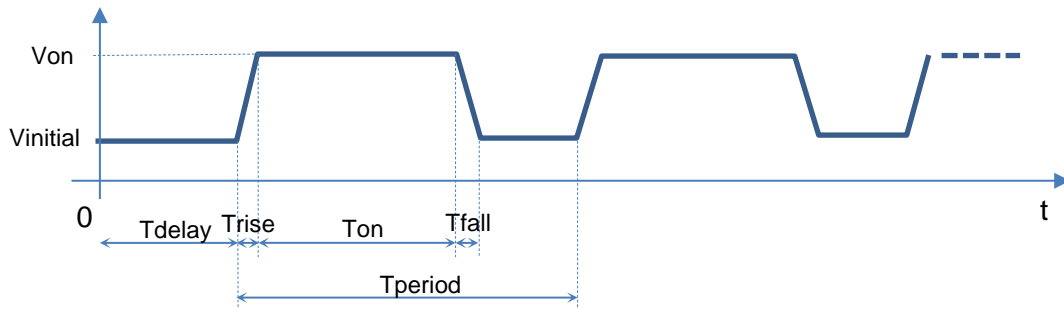


Figura 13 – Parâmetros de uma forma de onda PULSE.

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

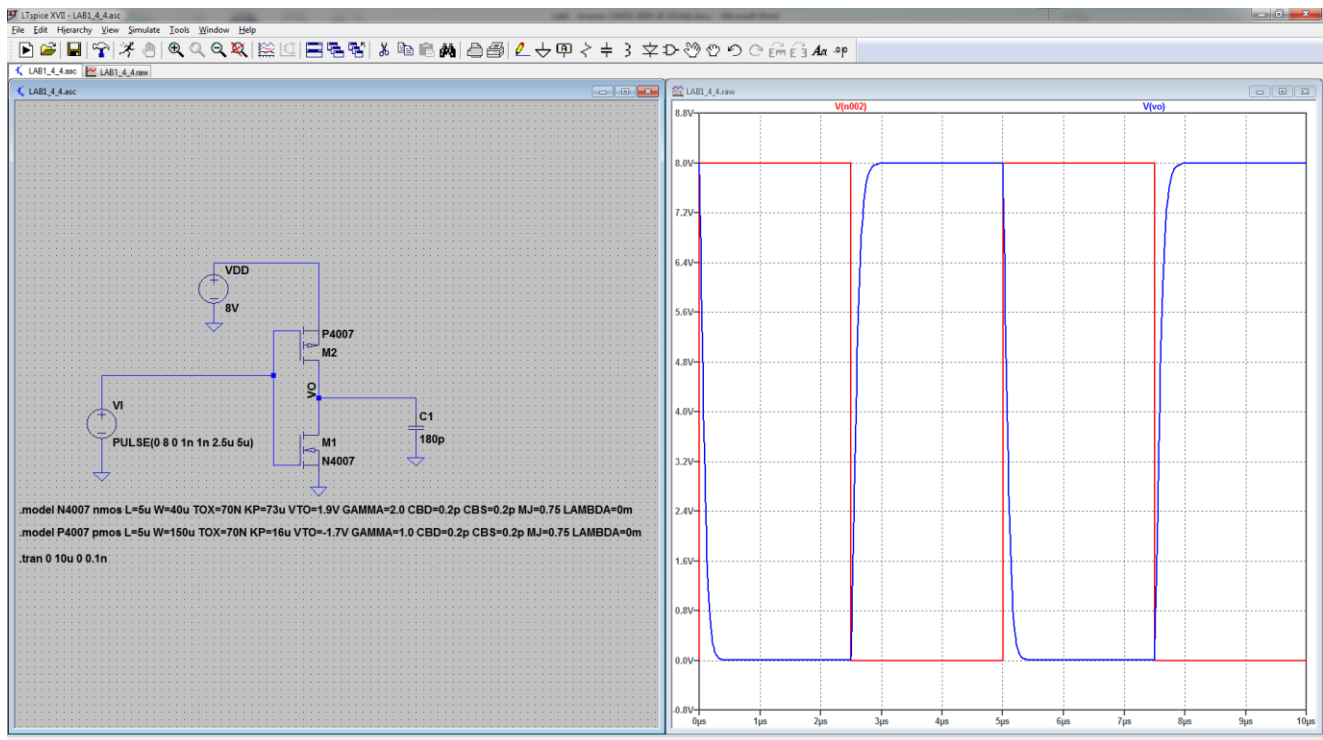


Figura 14 – Simulação do circuito da Figura 1 no domínio do tempo com uma onda quadrada em V1.

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

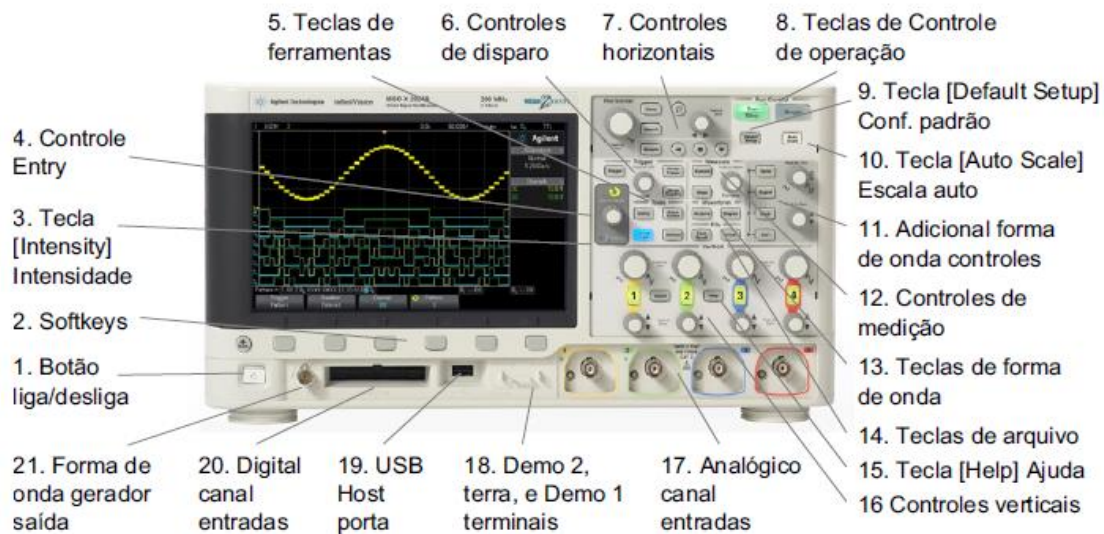


Figura 15 – Painel frontal dos osciloscópios InfiniiVision 2000 X-Series (extraído de [4]).

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 15) ou usando a *softkey* por baixo do respetivo menu. No exemplo da Figura 16 foi selecionado o canal 2, vendo-se no respetivo menu de canal (Menu 2Canal) que o acoplamento é do tipo CC.

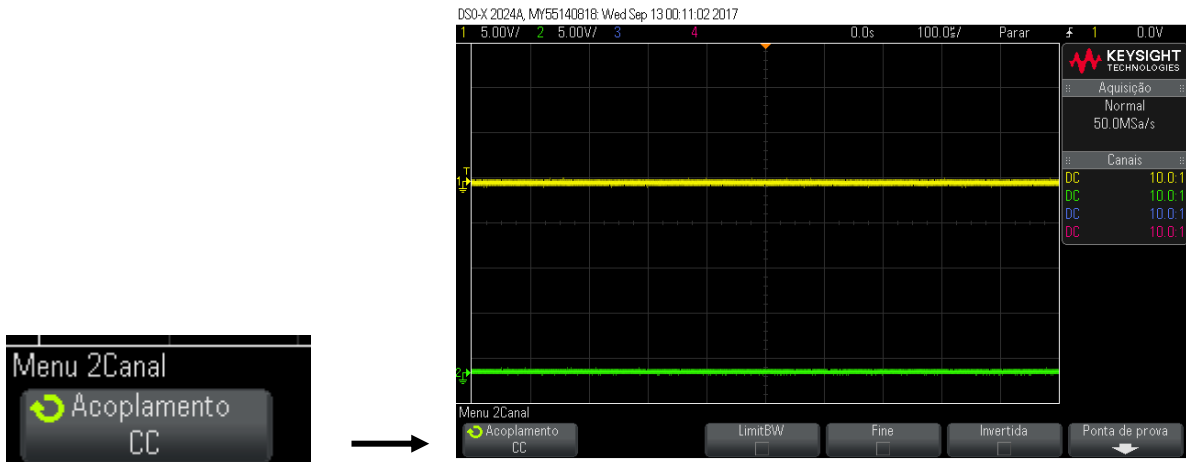


Figura 16 – Acoplamento AC e CC

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 17.

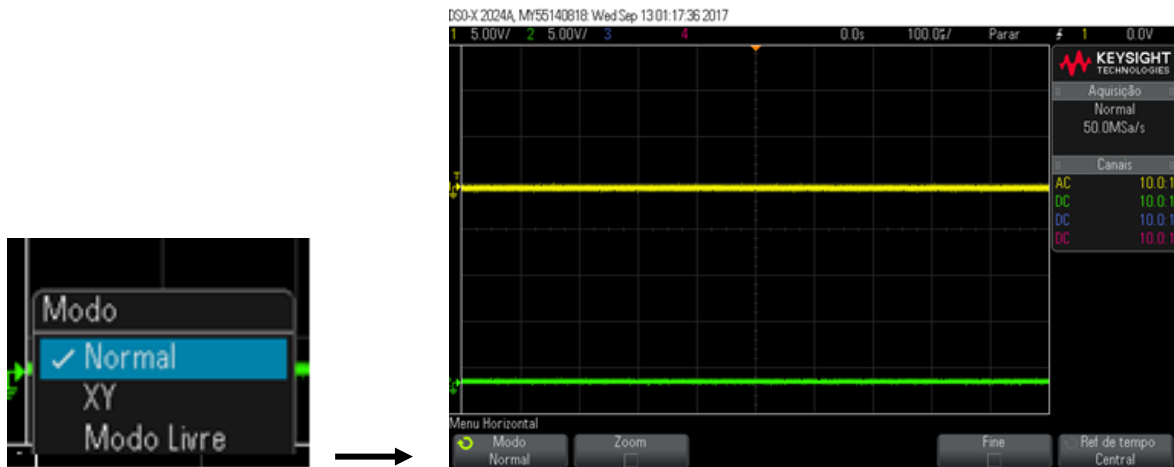


Figura 17 – Menu horizontal.

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 seleccionar o tipo de medição. A Figura 18 mostra o menu com alguns dos tipos de medição que podem ser efetuados (frequência e amplitude pico-a-pico do canal 1).

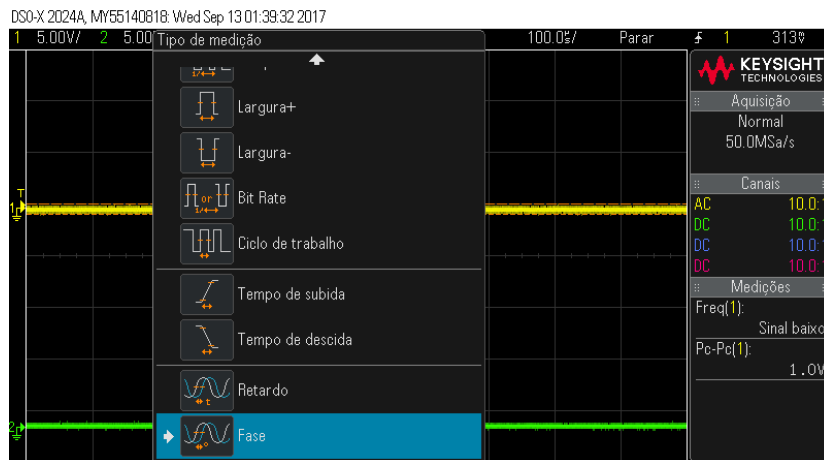


Figura 18 – Medições automáticas

Para medir o atraso entre duas ondas seleccione o tipo de medição **Retardo** (*Delay*). O atraso medido é a diferença de tempo entre os pontos médios da transição seleccionada para a fonte 1 e a transição seleccionada 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 19. Valores de atraso negativo indicam que a transição seleccionada para a fonte 1 ocorreu após a transição seleccionada da fonte 2.



Figura 19 – Medição do atraso (retardo).

Para definir o atraso entre tipos diferentes de transição, depois de seleccionar 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 20 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.

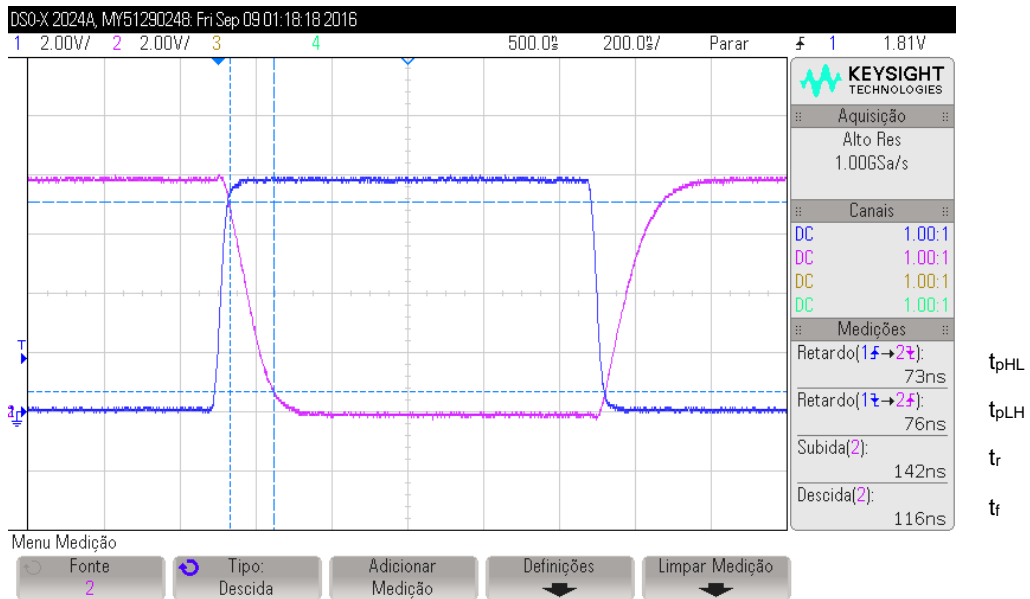


Figura 20 – Medição dos tempos de propagação e de subida/descida.

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 21), ficando com acesso às opções indicadas na Figura 22.
- Se selecionar 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 22 (a).
- Se selecionar a opção  (*Get Screen Image*), obtém a imagem do osciloscópio como se vê Figura 22 (b). Nesta opção, pode ainda escolher armazenar o ficheiro com a imagem num diretório do PC.

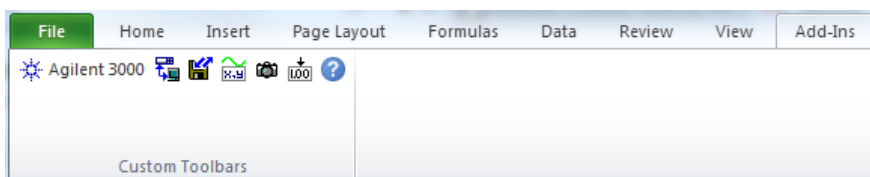
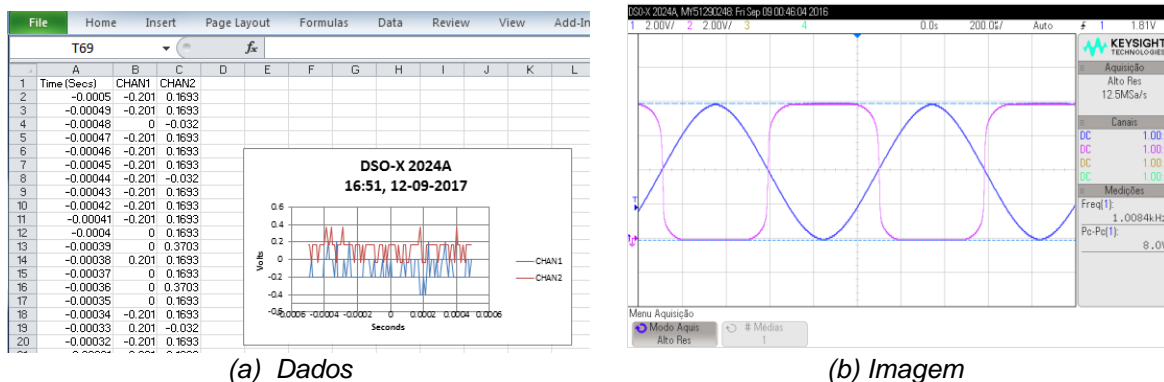


Figura 21 – Opções de aquisição das formas de onda visíveis no osciloscópio.



(a) Dados

(b) Imagem

Figura 22 – Formas de onda visíveis no osciloscópio.

Exemplos de imagens obtidas

A Figura 23 mostra dois exemplos de imagens obtidas nos pontos 5.5 (com o osciloscópio em modo xy) e 5.6 (Fonte onda quadrada) deste guia.

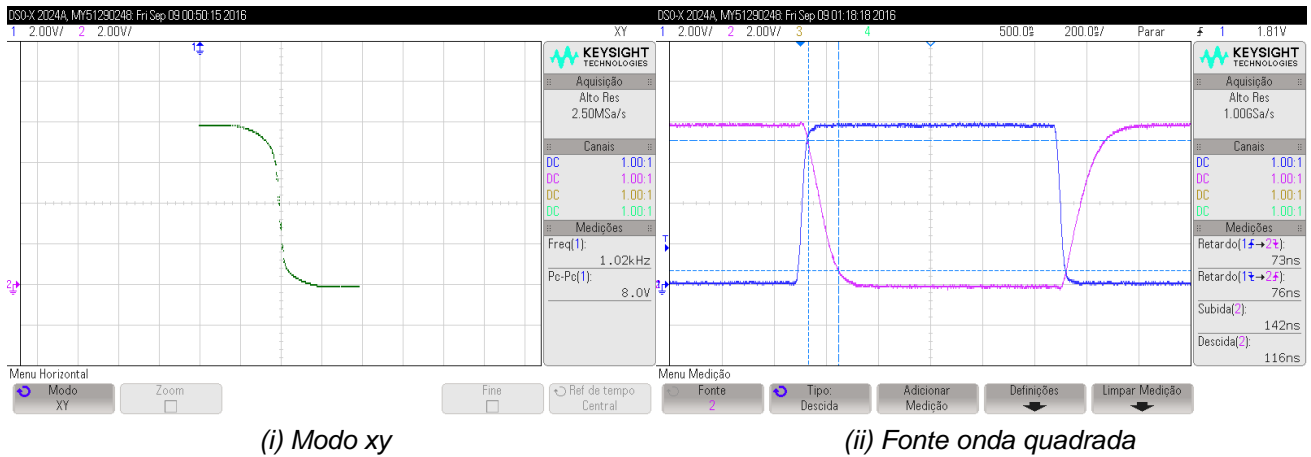


Figura 23 – Exemplos de imagens obtidas com o osciloscópio.

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.