

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos
SEL0621 - Projetos de Circuitos Integrados Digitais I
Prof. Dr. João Pereira do Carmo

Projeto 6

Davi Diório Mendes	7546989
Nivaldo Henrique Bondança	7143909



18 de agosto de 2014

Lista de Figuras

1	Porta lógica <i>CMOS</i> . Implementa a função $\overline{AB+C}$	p. 5
2	Atraso de subida e descida por capacitância de carga obtido pela simulação do <i>viewpoint</i>	p. 10
3	Sinais de entrada e saída utilizados na simulação do <i>viewpoint</i>	p. 11
4	Atraso de subida e descida por capacitância de carga.	p. 13
5	Sinais de entrada e de saída da porta lógica.	p. 13
6	<i>Layout</i> da porta lógica apresentada na figura 1.	p. 14

Lista de Tabelas

- 1 Coeficientes angular e linear para as curvas de atraso de descida e subida por
capacidade de carga. p. 14

Códigos Fontes

1	<i>Netlist</i> gerado a partir do <i>viewpoint</i>	p. 7
2	Comandos utilizados para a medição de atraso de subida e descida por capacidade de carga.	p. 9

Nesta experiência é dada continuidade ao que foi ensinado no semestre anterior. Será visto aqui como se extrai o *netlist* para simulação já a partir do esquemático, permitindo a verificação da sua funcionalidade. Também será visto como fazer a comparação entre *layout* e esquemático. Por fim é introduzida a simulação do tipo Monte Carlo que possibilita analisar o comportamento dos circuitos com as variações dos parâmetros dos transistores.

1. *Considere a porta lógica *CMOS* estática que implementa a função lógica $\overline{AB + C}$. Tendo o transistor *NMOS* de menor dimensão um $W = 2\mu m$ e $L = 0,35\mu m$, determine as dimensões de todos transistores de forma que:

- i (atraso de propagação na descida com $ABC = "110"$) = (atraso de propagação na descida com $ABC = "001"$) = (pior atraso de propagação na subida);
- ii Todos transistores *PMOS* tenham as mesmas dimensões.

(deixe indicado os valores usados)

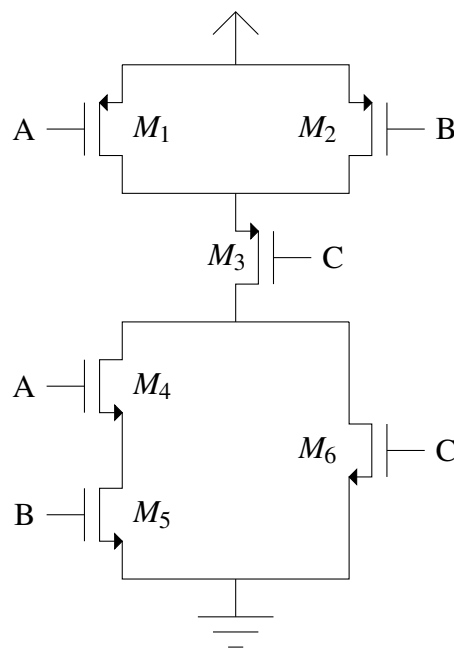


Figura 1: Porta lógica *CMOS*. Implementa a função $\overline{AB + C}$.

Seja o tempo de propagação dado pela seguinte relação:

$$t_p = \frac{1,6 \cdot C_L}{\mu \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot C_{ox} \cdot V_{DD}} \quad (1)$$

No caso 110, teremos os transistores M_4 e M_5 abertos, realizando a descida do sinal. Para o cálculo tempo de propagação na descida, teremos um transistor equivalente com as seguintes

dimensões:

$$W_{eq} = W_{M_4, M_5} \quad (2)$$

$$L_{eq} = 2 \cdot L \quad (3)$$

Por outro lado, no caso 001, somente o transistor M_6 abre. Desta forma as dimensões equivalentes são as mesmas dimensões do transistor M_6 :

$$W_{eq} = W_{M_6} \quad (4)$$

$$L_{eq} = L \quad (5)$$

Desta forma temos:

$$t_{pHL(110)} = \frac{1,6 \cdot C_L}{\mu_N \cdot \left(\frac{W_{M_4, M_5}}{2 \cdot L} \right) \cdot C_{ox} \cdot V_{DD}} \quad (6)$$

$$t_{pHL(001)} = \frac{1,6 \cdot C_L}{\mu_N \cdot \left(\frac{W_{M_6}}{L} \right) \cdot C_{ox} \cdot V_{DD}} \quad (7)$$

e, ao igualarmos (6) e (7), eliminaremos todas as variáveis não abordadas até o momento, obtendo a relação:

$$\frac{W_{M_4, M_5}}{2 \cdot L} = \frac{W_{M_6}}{L} \quad (8)$$

$$\Rightarrow W_{M_4, M_5} = 2 \cdot W_{M_6} \quad (9)$$

Como $W_{M_6} < W_{M_4, M_5} \Rightarrow W_{M_6} = 2\mu m$. Logo:

$$W_{M_4, M_5} = 2 \cdot 2\mu m = 4\mu m \quad (10)$$

$$\Rightarrow W_{M_4} = W_{M_5} = 4\mu m \quad (11)$$

Para o análise dos transistores *PMOS*, tomamos como os piores casos $ABC = 101$ ou $ABC = 011$. Os transistores equivalente — utilizado no cálculo do tempo de propagação — de ambos os casos possuem as mesmas dimensões, mostradas a seguir:

$$W_{eq} = W_P \quad (12)$$

$$L_{eq} = 2 \cdot L \quad (13)$$

Desta forma, podemos modelar o pior atraso de propagação na subida como:

$$t_{pLH(101|011)} = \frac{1,6 \cdot C_L}{\mu_P \cdot \left(\frac{W_P}{2 \cdot L}\right) \cdot C_{ox} \cdot V_{DD}} \quad (14)$$

Igualando as equações (7) e (14), analogamente ao que foi feito para os transistores *NMOS*, podemos calcular W_P :

$$W_P = 2 \cdot \frac{\mu_N}{\mu_P} \cdot W_{M_6} \quad (15)$$

$$\Rightarrow W_P \approx 12,90 \mu m \quad (16)$$

para $\mu_N = 476 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ e $\mu_P = 148 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

2. Faça o circuito esquemático da porta *CMOS* e gere seu símbolo. Faça todas as verificações necessárias no esquemático e no símbolo não deixando nenhum erro ou *warning*. Não esqueça de ligar o *bulk* dos transistores.

3. Crie para o esquemático um *designview point* para poder gerar arquivos para simulação e comparar com *layout*. Para isso execute o comando **Hit-Kit Utilites – Create Viewpoint** na parte superior da janela do *Design Architecture*. No menu que aparece coloque o nome de seu arquivo esquemático no *Design Path*. Deixe a opção *device*.

4. Agora gere um arquivo *netlist* para o *ELDO*. Para isso entre no *Simulation mode* (coluna esquerda da janela do *Design Architecture*, último comando). No menu selecione o *vpt_c35b4_device*, que foi gerado no item anterior, e dê *OK*.

Obs.: A partir da nova janela podemos retornar à anterior executando novamente o último comando da coluna à esquerda.

5. *Gere o *netlist* executando o comando apropriado na coluna à esquerda. Com outro comando nessa coluna, o *ASCII Results*, verifique os resultados na opção *view netlist*. Acrescente o *netlist* ao relatório.

O *netlist* gerado automaticamente a partir do *viewpoint* está descrito no código fonte 1.

Código Fonte 1: *Netlist* gerado a partir do *viewpoint*

```

1 *
2 * .CONNECT statements
3 *
4 .CONNECT GROUND 0
5
6
7 * ELDO netlist generated with ICnet by 'cad' on Wed Aug 13 2014 at 16:18:27
8
9 *
```

```

10 * Globals.
11 *
12 .global VDD VSS
13
14 *
15 * MAIN CELL: Component pathname : $lab6/default.group/logic.views/ex2
16 *
17     M_PMOS_C S C N$209 VDD MODP w=1.290000e-05 l=3.500000e-07 as=1.096500e-11
18 + ad=1.096500e-11 ps=1.460000e-05 pd=1.460000e-05 nrs=3.294574e-02 nrd=3.294574e-02
19     M_PMOS_B N$209 B VDD VDD MODP w=1.290000e-05 l=3.500000e-07 as=1.096500e-11
20 + ad=1.096500e-11 ps=1.460000e-05 pd=1.460000e-05 nrs=3.294574e-02 nrd=3.294574e-02
21     M_PMOS_A N$209 A VDD VDD MODP w=1.290000e-05 l=3.500000e-07 as=1.096500e-11
22 + ad=1.096500e-11 ps=1.460000e-05 pd=1.460000e-05 nrs=3.294574e-02 nrd=3.294574e-02
23     M_NMOS_C S C VSS VSS MODN w=2.000000e-06 l=3.500000e-07 as=1.700000e-12
24 + ad=1.700000e-12 ps=3.700000e-06 pd=3.700000e-06 nrs=2.125000e-01 nrd=2.125000e-01
25     M_NMOS_B N$207 B VSS VSS MODN w=4.000000e-06 l=3.500000e-07 as=3.400000e-12
26 + ad=3.400000e-12 ps=5.700000e-06 pd=5.700000e-06 nrs=1.062500e-01 nrd=1.062500e-01
27     M_NMOS_A S A N$207 VSS MODN w=4.000000e-06 l=3.500000e-07 as=3.400000e-12
28 + ad=3.400000e-12 ps=5.700000e-06 pd=5.700000e-06 nrs=1.062500e-01 nrd=1.062500e-01
29 *
30 .end

```

6. *Como são calculadas as áreas e perímetros de dreno e *source* no circuito extraído pelo esquemático (relação usada)?

Conforme o manual *ELDO equations*, temos que:

$$AS = W \cdot XA \quad (17)$$

$$AD = W \cdot XA \quad (18)$$

$$PS = W + 2 \cdot XA \quad (19)$$

$$PD = W + 2 \cdot XA, \quad (20)$$

onde *AS* é a área de *source*, *AD* é a área de dreno, *PS* é o perímetro de *source*, *PD* é o perímetro de dreno e *XA* é o comprimento da difusão. Neste caso o comprimento da difusão é $XA = 0.85\mu m$.

7. Observe que no *netlist* não aparecem as capacitâncias parasitas que são geradas quando é feita a extração do *layout*. Prepare um arquivo para simulação e, com os parâmetros típicos, $V_{DD} = 3V$, determine o atraso de propagação na subida *versus* capacitância de carga (entrada com onda quadrada com *rise/fall time* pequenos (1% do período, por exemplo)). Escolha os sinais de entrada de forma a obter a pior situação, ao menos cinco valores para a capacitância de carga, e escolha o período dos sinais de forma a obter resultados corretos. Faça o mesmo para o atraso de propagação na descida *versus* capacitância de carga.

8. *Apresente os gráficos da questão anterior e copie os comandos de medida e sinais de

entrada que usou no *ELDO*.

Os atrasos medidos na questão anterior podem ser vistos na imagem . Os comandos utilizados em suas medidas estão disponíveis no Código Fonte 2. As formas de onda dos sinais de entrada *A*, *B* e *C* estão na imagem .

Código Fonte 2: Comandos utilizados para a medição de atraso de subida e descida por capacidade de carga.

```

1  *
2  * .CONNECT statements
3  *
4  .CONNECT GROUND 0
5
6  * ELDO netlist generated with ICnet by 'cad' on Wed Aug 13 2014 at 14:50:34
7
8  *
9  * Globals.
10 *
11 .global VDD VSS
12
13 *
14 * MAIN CELL: Component pathname : $lab6/default.group/logic.views/ex2
15 *
16     M_PMOS_C S C N$209 VDD MODP w=1.290000e-05 l=3.500000e-07 as=1.096500e-11
17 + ad=1.096500e-11 ps=1.460000e-05 pd=1.460000e-05 nrs=3.294574e-02 nrd=3.294574e-02
18     M_PMOS_B N$209 B VDD VDD MODP w=1.290000e-05 l=3.500000e-07 as=1.096500e-11
19 + ad=1.096500e-11 ps=1.460000e-05 pd=1.460000e-05 nrs=3.294574e-02 nrd=3.294574e-02
20     M_PMOS_A N$209 A VDD VDD MODP w=1.290000e-05 l=3.500000e-07 as=1.096500e-11
21 + ad=1.096500e-11 ps=1.460000e-05 pd=1.460000e-05 nrs=3.294574e-02 nrd=3.294574e-02
22     M_NMOS_C S C VSS VSS MODN w=2.000000e-06 l=3.500000e-07 as=1.700000e-12
23 + ad=1.700000e-12 ps=3.700000e-06 pd=3.700000e-06 nrs=2.125000e-01 nrd=2.125000e-01
24     M_NMOS_B N$207 B VSS VSS MODN w=4.000000e-06 l=3.500000e-07 as=3.400000e-12
25 + ad=3.400000e-12 ps=5.700000e-06 pd=5.700000e-06 nrs=1.062500e-01 nrd=1.062500e-01
26     M_NMOS_A S A N$207 VSS MODN w=4.000000e-06 l=3.500000e-07 as=3.400000e-12
27 + ad=3.400000e-12 ps=5.700000e-06 pd=5.700000e-06 nrs=1.062500e-01 nrd=1.062500e-01
28 *
29 .PARAM cload=100f
30 Cl S VSS cload
31
32 *** pulso ***
33 .PARAM tvdd=3V
34 .PARAM frequencia=230MegHz
35 .PARAM periodo='1/frequencia'
36 .PARAM delay=0s
37 .PARAM tSubida='0.01*periodo'
38 .PARAM tDescida='0.01*periodo'
39 .PARAM larguraPulso='0.49*periodo'
40 .PARAM valto='tvdd'
41 .PARAM vbaixo=0V
42
43 *** varredura ***
44 .PARAM vStep=50f

```

```

45 .PARAM vInit=100f
46 .PARAM vEnd=300f
47
48 Vcc VDD VSS tvdd
49 Vgnd VSS 0 0
50
51 Va A VSS tvdd
52 Vb B VSS PULSE (vbaixo valto delay tSubida tDescida larguraPulso periodo)
53 Vc C VSS 0
54
55 .TRAN 1ns '20*periodo' '5*periodo' 0.1ns SWEEP cload INCR vStep vInit vEnd
56 .PROBE TRANS V(A) V(B) V(C) V(S)
57
58 *** Delay ***
59 .MEAS TRAN DEL_H2L TRIG V(B) VAL=1.5V RISE=5 TARG V(S) VAL=1.5 FALL=5
60 .MEAS TRAN DEL_L2H TRIG V(B) VAL=1.5V FALL=5 TARG V(S) VAL=1.5 RISE=5
61
62 .INC '~/para_prova/tipico.mod'
63
64 .end

```

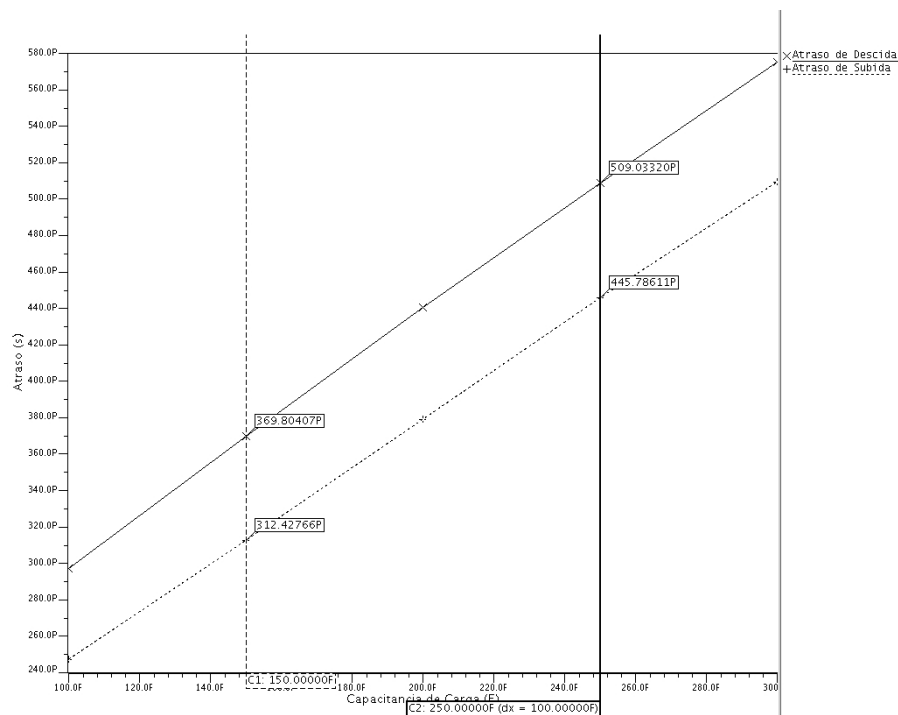


Figura 2: Atraso de subida e descida por capacitância de carga obtido pela simulação do *view-point*.

9. Faça agora o *layout* da porta (utilize o *designview point* gerado para geração). No *layout* deve-se tomar cuidado com:

- área total do circuito;
- o uso correto dos metais e poli como camadas de conexão;

- a posição dos *ports* de entrada e saída.

Faça a verificação com o *DRC (CALIBRE)* e elimine todos os erros.

Obs.: Veja as opções do **Route – ARoute Commands – Setup – Display** para melhor fazer o roteamento manual.

10. Utilize o comando **Connectivity – port – Add to Port** para ampliar as áreas dos *ports*. Para isso selecione o *shape* que deseja acrescentar a um *port* e então execute o comando.

11. *Como se pode acrescentar aos *ports* V_{DD} e V_{SS} as regiões de *source* dos transistores sem transformarmos os transistores em *flatten*?

Para adicionar o *source* ao V_{DD} ou ao V_{SS} deve-se adicionar um novo *shape* de metal 1, sobre o metal do *source*. Este shape pode ser adicionado aos *ports* V_{DD} ou V_{SS} .

12. Uma vez acrescentadas aos *ports* todas as regiões desejadas, faça nova verificação com o *DRC*.

13. Vamos agora fazer a última verificação do circuito: comparação entre o *layout* e o esquemático que o gerou (*Layout vs. Schematic* ou simplesmente *LVS*). Para isso, dentro do *ICStation* feche o circuito lógico associado ao *layout* (**File – Logic – close**, menu superior). Execute então os comandos *IcTrace(M)* e *LVS* (menu à direita). No menu que aparece complete o *source name* (nome do *netlist* para comparar que esta no ... lo-

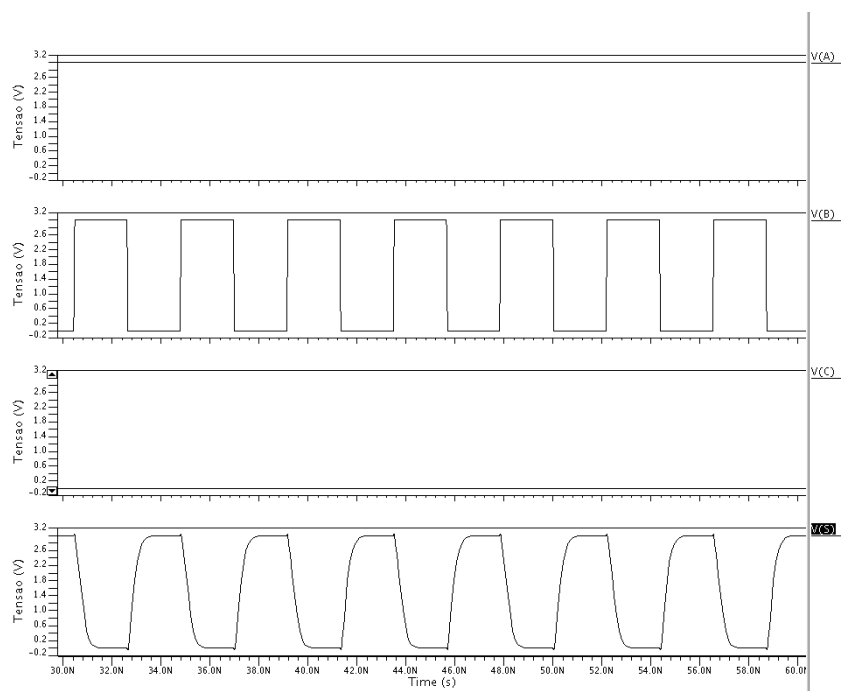


Figura 3: Sinais de entrada e saída utilizados na simulação do *viewpoint*.

gic.view/name/.../vpt_c35b4_device) e na opção *Abort on Supply Error*, deixe *NO*. Verifique a função das outras opções que estão disponíveis.

14. Ao dar o *OK*, é feita a comparação entre os *netlists* extraídos do *layout* e do esquemático. Para ver se há ou não erros execute o comando ***IcTrace(M) – LVS – Report – LVS***. Verifique também as outras opções no menu de *Report*. Caso não houver erros aparecerá a "*carinha feliz*" se houver, serão fornecidas informações sobre os erros.

15. Para determinar onde estão os erros pode ser usado o comando ***IcTrace(M) – discreps***. A opção *first* aí mostra o primeiro erro; a opção *next*, o próximo. Caso tenha tido algum erro tente achá-lo com esses comandos; se não teve erros, modifique o *layout* (apague alguma conexão) para poder praticar (caso não pratique na aula poderá ter surpresas na prova).

Obs.: o comando *discreps* deixa selecionada uma ou mais regiões do circuito. Essas regiões selecionadas são deselecionadas apenas pelo comando ***IcTrace(M) – unshow – all***. Algo similar acontece com o *DRC*. Obs.: O comando ***IcTrace(M) – netlist*** também serve, como o *PEX (CALIBRE)*, para gerar *netlists* para o *ELDO*.

16. *Uma vez feitas as verificações com *DRC* e *LVS*, caso não tenha sido encontrado nenhum erro, o *layout* estará pronto para uso. Agora, extraia o circuito de simulação a partir do *layout* (opção *C+CC*) e repita as simulações feitas no item 7. Apresente os gráficos com resultados (gere uma figura do *layout* e inclua no trabalho).

O gráfico com os atrasos de subida e descida estão na figura e os sinais de entrada e saída estão na figura . O *layout* pode ser visto na figura .

17. *Para as curvas atraso de propagação na subida e descida *versus* carga, geradas a partir do *layout*, calcule as inclinações e o pontos de cruzamento com o eixo Y (eixo de tempo).

A partir dos dados da figura , obtemos:

$$\alpha_D = \frac{\Delta y}{\Delta x} = 1386,8 \quad (21)$$

$$\alpha_S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = 1335,8 \quad (22)$$

onde α_D e α_S são os coeficientes angulares dos atrasos de descida e subida, respectivamente.

Seja a o atraso de descida dado por:

$$y_D = 1386,8 \cdot x_D + y_{0D} \quad (23)$$

Substituindo um ponto na fórmula, podemos obter y_0 :

$$y_{0D} = 497,42 \cdot 10^{-12} - 1386,8 \cdot 250 \cdot 10^{-15} = 0,15 \cdot 10^{-9} \quad (24)$$

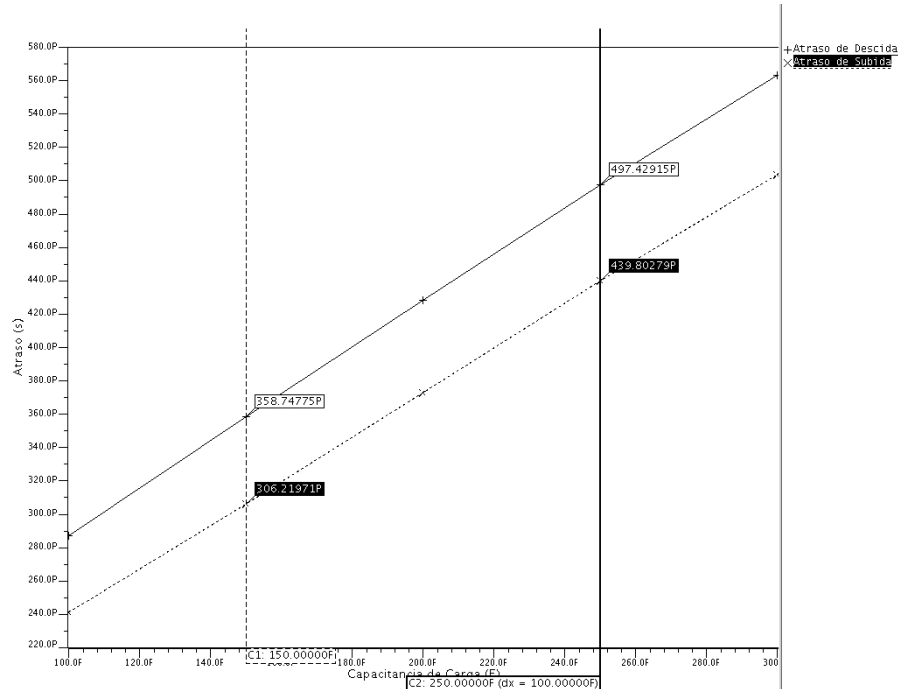


Figura 4: Atraso de subida e descida por capacitância de carga.

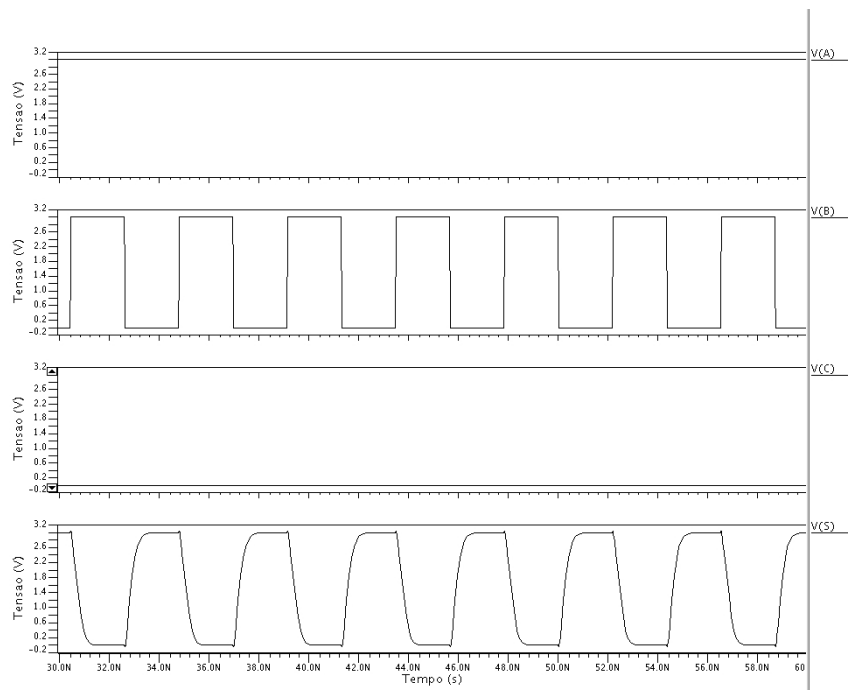


Figura 5: Sinais de entrada e de saída da porta lógica.

Analogamente, calcula-se o y_0 de subida:

$$y_{0S} = 438,8 \cdot 10^{-12} - 1335,8 \cdot 250 \cdot 10^{-15} = 0,10 \cdot 10^{-9} \quad (25)$$

Os resultados destes cálculos estão condensados na tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes angular e linear para as curvas de atraso de descida e subida por capacidade de carga.

	Atraso de Descida	Atraso de Subida
Coeficiente Angular	1386,8	1335,8
Coeficiente Linear	$0,15 \cdot 10^{-9}$	$0,10 \cdot 10^{-9}$

18. *Comente as diferenças entre os resultados encontrados nas questões 8 e 16/17? Dê as razões para elas.

19. *Faça um inversor com $W_N = 2\mu m$ e $L_N = 0,35\mu m$. Faça o esquemático, símbolo e *layout*. Passe as verificações no esquemático e símbolo. O *layout* deve ser feito com cuidado para ter área pequena, utilização correta de metais/poli e *ports* de tamanho conveniente. Passe o

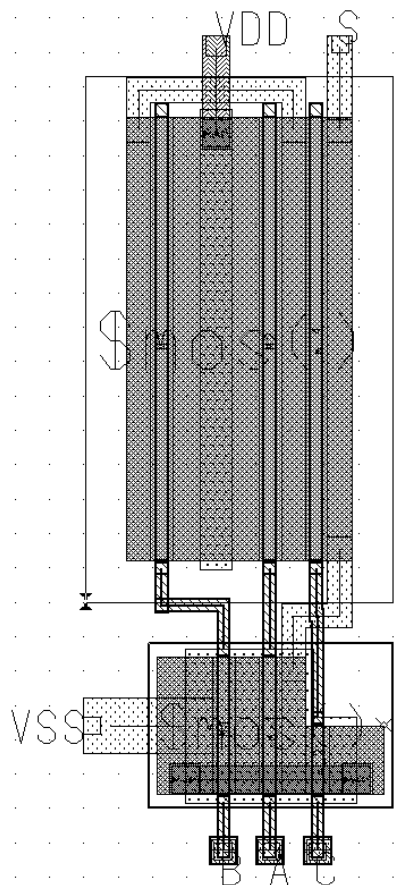


Figura 6: *Layout* da porta lógica apresentada na figura 1.

DRC no *layout* e faça o LVS deixando a célula pronta para uso. Acrescente ao relatório o *layout* feito.

20. A partir das duas células desenhadas, monte o esquemático de uma nova célula que executa a função lógica $(ab + c)$. Gere o seu símbolo e faça todas as verificações necessárias.

Obs.: antes de realizar o item 20, deve-se acrescentar aos símbolos anteriores a propriedade *phy_comp* com a posição do *layout* de cada célula.

21. Gere a partir do esquemático o arquivo para simulação com o *ELDO* (acrescente o *netlist* ao relatório). Simule com os parâmetros típicos, $V_{DD} = 3V$, e determine o atraso de propagação na subida *versus* capacitância de carga (entrada com onda quadrada com *rise/fall time* igual a 1%). Escolha os sinais de entrada de forma a obter a pior situação, ao menos cinco valores para a capacitância de carga e escolha o período dos sinais de forma a obter resultados corretos. Faça o mesmo para o atraso de propagação na descida *versus* capacitância de carga.

22. *Desenhe os gráficos da questão anterior e copie os comandos de medida e sinais de entrada que usou no *ELDO*.

23. Faça o *layout* final da célula. Utilize nas linhas de metal que ligam o V_{DD} e o V_{SS} largura sempre superior ou igual a $1,0\mu m$. Par isso veja e utilize o comando **Route – ARoutre NEt Classe – Edit** que permite especificar as características de conexão de qualquer sinal. Utilize a opção *New/Edit* para fornecer as características desejadas e a opção *Assign* para associá-las a um sinal (e apenas um). Coloque os sinais de V_{DD} e o V_{SS} com metais de $1,0\mu m$.

Obs.: Veja que quando se esta executando o comando **Route – Iroute Commands – Run**, a tecla *w* pode ser utilizada para alterar a largura da linha desenhada.

24. *Termine *layout* da célula, passe o DRC e faça o LVS. Gere uma figura do *layout* mostrando todos os níveis e inclua no trabalho.

25. *Agora extraia o circuito de simulação a partir do *layout* (opção C+CC) e repita as simulações feitas no item 22. Apresente gráficos e tabelas com os resultados.

26. *Para as curvas tempo de propagação na subida e descida geradas a partir do *layout*, calcule as inclinações e os pontos de cruzamento com o eixo Y (eixo de tempo).

27. *Gere novamente os tempos de propagação na subida e descida utilizando agora os comandos (faça os ajustes necessários para seu circuito)

```

1 Va a 0 3V
2 Vb b 0 0
3 Vc c 0 pulse (0 3 0 1p 1p 2n 4n)
4 . tran 1n 40n 0n 1p

```

```

5 .meas tran delayF trig v(c) val=1.5 fall=6 targ v(out) val=1.5 fall=6
6 .meas tran delayR trig v(c) val=1.5 rise=6 targ v(out) val=1.5 rise=6
7 Cl out 0 30fF

```

28. *Vamos realizar agora a *simulação de Monte Carlo*. Nesta simulação são realizadas, na verdade, várias simulações com parâmetros diferentes e podemos conhecer o comportamento do circuito para diversas condições de fabricação. Utilizando os comandos abaixo realize *Monte Carlo* (faça os ajustes necessários para seu circuito, não coloque no arquivo o modelo do transistor). Forneça os gráficos da tensão em *c* e na saída (valor típico e piores casos) e os gráficos do número de saídas *versus delayF* e *delayR*.

```

1 Va a 0 3V
2 Vb b 0 0
3 Vc c 0 pulse (0 3 0 1p 1p 2n 4n)
4 . tran 1n 30n 0n 10p
5 .meas tran delayF trig v(c) val=1.5 fall=5 targ v(out) val=1.5 fall=5
6 .meas tran delayR trig v(c) val=1.5 rise=5 targ v(out) val=1.5 rise=5
7 Cl out 0 30fF
8
9 .option SST_MTHREAD=1
10 * MONTE CARLO
11 .MC 100 NBBINS=20
12 .INCLUDE /local/tools/dkit/ams_3.70_mgc/eldo/c35/profile.opt
13 .LIB /local/tools/dkit/ams_3.70_mgc/eldo/c35/wc53.lib mc

```

29. *Utilize o comando **Report – Windows** do *ICStation* para determinar o tamanho da célula (coloque o tamanho de sua célula no relatório).

manual do Mentor-ELDO: /local/tools/mentor/shared/pdffdocs/eldo_ur.pdf

modelos dos transistores: /local/tools/dkit/ams_3.70_mgc/eldo/c35.