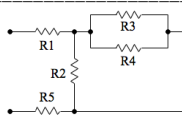


1. No circuito à direita:

- (a) R1 está em série com R2      (b) R1 está em série com R3  
(c) R1 está em série com R4      (d) R1 está em série com R5



**Resposta:** R1 está em série com R5, porque a corrente que as atravessa é a mesma

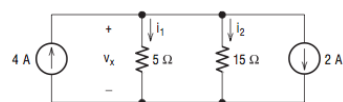
2. Aplicando sobreposição,  $i_2$  é dada pela soma:

Pelo divisor de corrente:

$$i_{2a} = 4 \times 5 / (5+15) = 1,0A$$

$$i_{2b} = -2 \times 5 / (5+15) = -0,5A$$

**Resposta:** 1,0 - 0,5 = 0,5A



3. Para  $t < 0s$  o comutador está na posição 1.

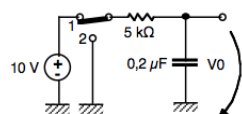
Em  $t = 0s$ , o comutador muda para a posição 2, ligando a resistência à massa. Ao fim de 500µs, calcule  $V_0$ .

$t < 0s$  : C carregou completamente através de 5kΩ até aos 10V, pelo que  $V_0 = 10V$ .

$t > 0s$  : C vai descarregar desde 10V até zero com uma constante de tempo:

$$\tau = RC = 5 \times 10^3 \times 0,2 \times 10^{-6} = 1ms. \quad V_0(500\mu s) = V_0(0) \times e^{-t/\tau} = 10 e^{-0,5} = 6,1V$$

**Resposta:**  $5V < V_0 < 7V$



4. Considere uma onda triangular de 500Hz, que varia entre -4V e +6V. Calcule o seu valor médio.

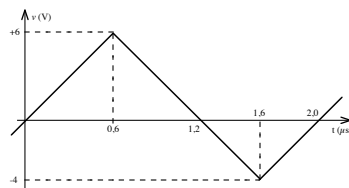
$$T = 1/f = 2ms$$

$$\text{área do triângulo positivo} = 1,2 \times 6/2 = 3,6 \text{ V.ms}$$

$$\text{área do triângulo negativo} = -0,8 \times 4/2 = -1,6 \text{ V.ms}$$

$$\text{Valor médio} = (3,6 - 1,6) / T = 2V.ms/2ms$$

**Resposta:** 1 V



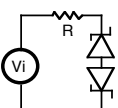
5. No circuito considere  $V_\gamma = 0,6V$  e  $V_z = 4,7V$ . O valor máximo da corrente é de 7,5 mA quando o sinal de entrada é uma senoide de 500Hz com 8Vrms.

Determine, com uma precisão melhor que  $\pm 2\%$ , o valor de R:

$$V_{ip} = V_{ieff} \times \sqrt{2} = 8 \times \sqrt{2} = 11,3V$$

$$\text{Kirchhoff da malha: } V_{ip} - V_z - V_\gamma = R \times I \rightarrow R = (11,3 - 4,7 - 0,6) / 7,5mA =$$

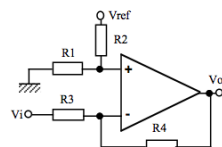
**Resposta:**  $R = 800 \Omega$



6. Atente nas entradas do OpAmp à direita.

Relacionando  $V_o$  com  $V_i$ , o circuito é um:

**Resposta:** Amplificador Inversor porque o sinal  $V_i$  é aplicado, através de  $R_3$ , à entrada Inversora e porque há realimentação negativa, dado que  $R_4$  liga a saída à entrada Inversora.



7. No circuito atente na definição de  $v_O$  ( $v_O = v_{OB} - v_{OC}$ ).

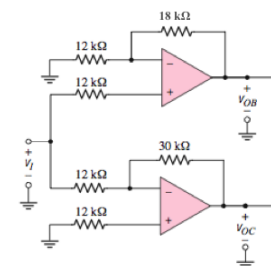
O ganho  $v_O / v_I$  é dado por:

$$v_{OB} = [1 + (18k/12k)] v_I = 2,5 v_I$$

$$v_{OC} = - (30k/12k) v_I = -2,5 v_I$$

$$v_O = v_{OB} - v_{OC} = 2,5 v_I - (-2,5 v_I) = 5 v_I$$

**Resposta:**  $v_O / v_I = 5$



8. Considere uma ADC de *tracking* de 6 bits e com um valor de fim de escala de 6,3V.

Quando a saída varia de 000100 para 000001, isso corresponde, aproximadamente, a uma variação na entrada de:

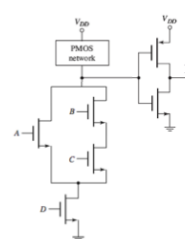
$$v_{a \max} = (2^{n-1} + 2^{n-2} + \dots + 2^1 + 2^0) \delta v$$

$$= (2^n - 1) \delta v$$

$$\delta v = v_{a \max} / 63 = 0,1V$$

$$000100 - 000001 = -3 \rightarrow \text{variação de } v_a = -3 \times \delta v = -0,3V$$

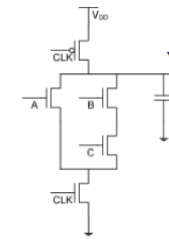
9. Qual a função lógica do circuito abaixo?



**Série = AND    Paralelo = OR**

9.  $[A \parallel (B \text{ em série com } C)] \text{ em série com } D$ .

Como há um Inversor à saída, é esta a função implementada: **(c)  $Y = (A + B \cdot C) D$**



10. Com  $CLK=0$  determine Y:

10. Como  $CLK = 0$ , o transistor PMOS está "ON" ligando  $V_{DD}$  a Y, pelo que  $Y = 1$ .

11. Considere:  $R_1=15k\Omega$ ;  $R_2=3k\Omega$ ;  $R_D=2k\Omega$ ;  $R_L=6k\Omega$ ;

e que  $V_{to}=1V$ ;  $K=1 \text{ mA/V}^2$ .

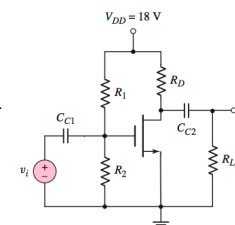
Considere que os condensadores se comportam como curto-circuitos para pequeno sinal e circuito-abertos para dc.

Calcule a tensão  $V_{DS}$  de polarização:

$$V_{GS} = V_G = V_{DD} \times R_2 \times (R_1 + R_2) = 18 \times 3k \times (15k + 3k) = 3V$$

$$I_D = K (V_{GS} - V_{to})^2 = 10^{-3} (3-1)^2 = 4mA$$

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D = 18 - (2 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-3}) \quad \text{Resposta: } V_{DS} = 10V$$



12. Para o circuito anterior, calcule  $v_O/v_i$  :

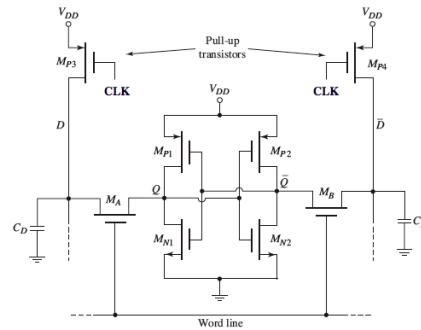
$$g_m = 2K (V_{GS} - V_{to}) = 4\text{mA/V}$$

Com base no modelo equivalente para pequenos sinais temos:

$$v_o = -g_m (R_D // R_L) v_i = -4 \times 10^{-3} \times 1,5 \times 10^3 \times v_i = -6 v_i$$

**Resposta:**  $v_O/v_i = -6$

13. O circuito representa uma célula RAM. Os estados 1 a 5 estabelecem-se sequencialmente. Complete a tabela abaixo com o valor lógico de D,  $\sim D$ , Q e com o estado (On ou Off) dos transistores.



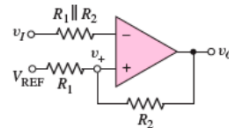
Estado	CLK	WL	D	$\sim D$	Q	MN2	MP1	MP3
1 Read	1	1	1	0	1	On	On	Off
2	0	0	1	1	1	On	On	On
3 Write	1	1	0	1	0	Off	Off	Off
4	0	0	—	—	—	—	—	—
5	1	0	—	1	0	Off	Off	Off

14. Considere o comparador à direita, com  $R_1=5\text{k}\Omega$ ,  $R_2=15\text{k}\Omega$  e  $V_{REF} = -2\text{V}$ . O OpAmp satura a  $\pm 10\text{V}$ .

Justificando todos os passos:

(a) calcule as tensões de comparação inferior ( $V_{TL}$ ) e superior ( $V_{TH}$ ) e desenhe o gráfico de  $v_O$  em função de  $v_I$ , indicando todos os valores relevantes, quer no eixo  $v_I$ , quer no eixo  $v_O$ ;

(b) se  $v_I$  for uma onda triangular de 2kHz, entre  $\pm 5\text{V}$ , calcule o valor médio e o *duty-cycle* de  $v_O$ .



a) O comparador é inversor porque  $v_I$  está ligada à entrada inversora do OpAmp e tem histerese porque existe realimentação positiva, através de  $R_2$ , da saída para a entrada não-inversora. A resistência  $R_1/R_2$  não influencia o comparador porque não provoca qualquer queda de tensão (a corrente na entrada inversora é nula), ou seja,  $v_I = v_+$ .

Usando, por exemplo, sobreposição, calcula-se a tensão na entrada não-inversora ( $v_+$ ):

$$v_+ = [V_{REF} R_2 / (R_1 + R_2)] + [v_O R_1 / (R_1 + R_2)] = -2 \times 0,75 + 0,25 v_O = -1,5 + 0,25 v_O$$

Como a realimentação é positiva não há curto-circuito virtual entre as entradas do OpAmp. Mas, o comparador compara quando essas entradas se igualam, ou seja, quando  $v_I = v_+$ , donde, a tensão à qual é feita a comparação obtém-se quando:

$$v_I = v_+ = -1,5 + 0,25 v_O$$

Como  $v_O = \pm 10\text{V}$ , ocorrem 2 situações ( $v_O = V_H = +10\text{V}$  e  $v_O = V_L = -10\text{V}$ ):

$$V_{TH} = -1,5 + 0,25 \times 10 = +1\text{V} \quad \text{e} \quad V_{TL} = -1,5 - 0,25 \times 10 = -4\text{V}$$

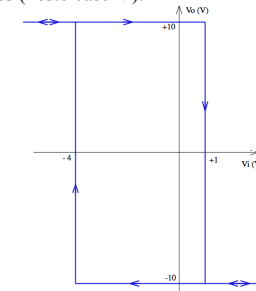
Notas:

-  $V_H$  e  $V_L$  são medidas ao nível da saída, enquanto que  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  são medidas ao nível da entrada.

- Como o comparador é inversor:

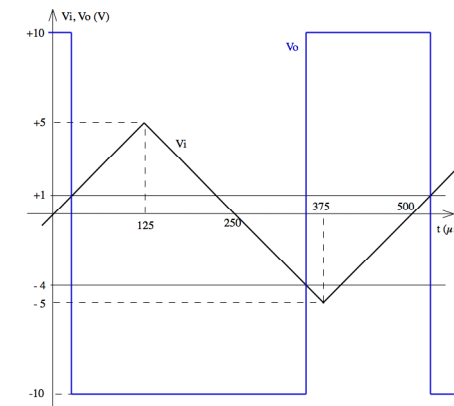
$$\text{quando } v_I < -4\text{V}, v_O = V_H = +10\text{V} \quad \text{e} \quad \text{quando } v_I > +1\text{V}, v_O = V_L = -10\text{V}$$

O gráfico seguinte responde ao resto da alínea, com o cuidado de usar os valores numéricos calculados e explicitar as unidades (neste caso V).



$$b) T = 1/f = 1/2000 = 500\text{ }\mu\text{s}$$

O comportamento do comparador ao longo do tempo é explicitado pela figura seguinte:



Por mera inspeção da figura retira-se:

-  $v_I$  desce de  $+5\text{V}$  para  $-5\text{V}$  (total de  $10\text{V}$ ) em  $T/2$  ( $250\text{ }\mu\text{s}$ ). Sendo uma triangular, conclui-se que a taxa de variação de  $v_I$  é de  $\pm 10\text{V} / 250\text{ }\mu\text{s} = \pm 1\text{V} / 25\text{ }\mu\text{s} \Rightarrow$  Chamemos  $K = \pm 25\text{ }\mu\text{s} / \text{V}$

- durante o tempo ON ( $v_O = +10\text{V}$ ), a entrada  $v_I$  desce, primeiro, de  $-4\text{V}$  para  $-5\text{V}$  e, depois, cresce de  $-5\text{V}$  até  $+1\text{V}$ , ou seja, sofre uma variação total (em valor absoluto) de  $1+6 = 7\text{V} = \Delta V$ .

$$t_{ON} = \Delta V \times K = 7 \times 25 = 175 \mu s \quad \text{e} \quad t_{OFF} = T - t_{ON} = 500 - 175 = 325 \mu s$$

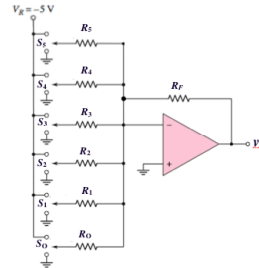
$$\text{O duty-cycle será, então} \quad \delta = t_{ON} / T = 175 / 500 = 0,35 = 35\%$$

$$\text{O valor médio de } v_O: V_{med} = \delta V_H + (1-\delta) V_L = 0,35 \times 10 + 0,65 \times (-10) = -3 \text{ V}$$

15. Pretende-se construir uma DAC de 6 bits, com um valor de fim de escala de 10V, sendo  $R_4=10\text{k}\Omega$  e  $V_R=-5\text{V}$ .

Justificando todos os passos, calcule:

- o valor analógico do LSB;
- o valor de  $R_5$  e de  $R_0$  a  $R_3$ ;
- o valor de  $R_F$  (em  $\Omega$ );
- o valor da corrente em  $R_F$  e da tensão  $v_a$ , quando a palavra de entrada é 010101.



a)

$$v_{a \max} = (2^{n-1} + 2^{n-2} + \dots + 2^1 + 2^0) \delta v$$

$$= (2^n - 1) \delta v$$

LSB (000001) corresponde ao valor analógico  $\delta v$ .

$$\delta v = v_{a \max} / 63 = 10\text{V} / 63 = 0,159 \text{ V} \approx 0,16 \text{ V (precisão de 0,5 LSB)}$$

b) Raciocinando apenas em valores absolutos, sabe-se que o bit menos significativo ( $b_0$ ), associado a  $R_0$ , deve provocar a menor corrente, porque a saída deve provocar a menor tensão que é  $\delta v$ . Pela lei de Ohm, rapidamente se conclui que  $R_0$  será a maior das resistências de entrada. Por outro lado, é sabido que cada bit tem o dobro do peso do anterior. Assim,

$$R_0 = 2 R_1 = 4 R_2 = 8 R_3 = 16 R_4 = 32 R_5, \text{ pelo que}$$

$$R_0 = 16 R_4 = 16 \times 10\text{k}\Omega = 160 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 8 R_4 = 80 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 4 R_4 = 40 \text{ k}\Omega \quad R_3 = 2 R_4 = 20 \text{ k}\Omega \quad \text{e} \quad R_5 = R_4 / 2 = 5 \text{ k}\Omega$$

c) Para o LSB (000001) só existe corrente em  $R_0$  e o valor analógico na saída é  $\delta v = 0,159 \text{ V}$ .

Como o amplificador é inversor  $v_a = - V_R R_F / R_x = - V_R R_F / R_0 = + 5\text{V} R_F / 160\text{k}\Omega = 0,159$   
 Donde  $R_F = 5088 \Omega$

d) Convertendo  $W = 010101$  para decimal obtém-se  $16+4+1 = 21 = W_{(10)}$

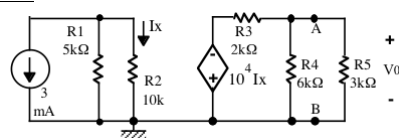
Da expressão usada na alínea a) retiramos que  $v_a = \delta v \times W_{(10)} = 0,159 \times 21 = 3,34 \text{ V}$ .

Considerando que o sentido da corrente  $I_{RF}$  é da direita para a esquerda, vem que

$$I_{RF} = v_a / R_F = 3,34\text{V} / 5088\Omega = 656 \mu\text{A}$$

16. Para o circuito à direita, justificando todos os passos:

- calcule o valor de  $I_x$  e de  $V_0$ ;
- obtenha o equivalente de Norton para todo o circuito à esquerda dos pontos AB e desenhe esse equivalente.



a) Como  $I_i$  e  $I_x$  graficamente têm sentidos contrários, e usando o divisor de corrente, obtém-se:

$$I_x = - I_i R_1 / (R_1 + R_2) = - (3\text{mA}) \times 5\text{k}\Omega / 15\text{k}\Omega = -1 \text{ mA}.$$

A fonte de tensão controlada é  $10^4 I_x = -10\text{V}$ . Ou seja, a fonte é +10V ficando o + ligado a  $R_3$ .

Designando por  $R_{45} = R_4 / R_5 = 2 \text{ k}\Omega$ , pelo divisor de tensão temos:

$$V_0 = +10\text{V} \times R_{45} / (R_3 + R_{45}) = +5 \text{ V}$$

b) Como a malha de entrada não se altera,  $I_x = -1 \text{ mA}$ . Também a fonte dependente continua a ser +10V ficando o + ligado a  $R_3$ .

Para obter  $I_N$ , curto-circuita-se A e B, pelo que toda a corrente em  $R_3$  passa pelo curto-circuito.

Então:  $I_N = I_{AB} = I_{R3} = +10\text{V} / R_3 = 5 \text{ mA}$ .

Para determinar  $R_N$ , há que identificar que  $10^4 I_x$  é uma fonte de tensão dependente. Para evitar raciocínios mais elaborados, pode-se, simplesmente, determinar  $V_{AB}$  (Thévenin) em circuito aberto, já que é conhecido que  $R_N = V_{AB} / I_N$ .

Como a malha de entrada não se altera  $I_x = -1 \text{ mA}$  e a fonte dependente continua a ser +10V ficando o + ligado a  $R_3$ .

Mas, agora,  $R_5$  não existe (circuito aberto), pelo que

$$V_{AB} = +10\text{V} \times R_4 / (R_3 + R_4) = +7.5 \text{ V}$$

$$R_N = V_{AB} / I_N = 7.5\text{V} / 5\text{mA} = 1,5 \text{ k}\Omega$$

Desenhando o modelo, tendo em atenção o sentido representado da corrente  $I_N$ :

