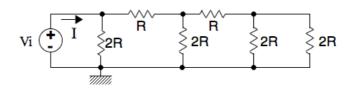


### 1. Com Vi=10V e R=5k $\Omega$ , calcule I e a potência dissipada por todas as resistências:

Verifica-se que o circuito é do tipo das DAC R-2R; para quem estudou DACs é imediato saber que a resistência vista por Vi é R.



Ou, pode-se, simplesmente, calcular a Req à direita de Vi:

Req = 
$$\{2R/[R+2R/(R+(2R/2R))]\}$$
 = R =  $5k\Omega$ .

Então, 
$$I = Vi / R = 10V / 5k\Omega = 2mA$$
.

A potência fornecida por Vi é igual à potência consumida por todo o resto do circuito (conservação da energia), ou seja, P = Vi x I = 10V x 2mA = 20mW.

Resposta: 2 mA / 20 mW

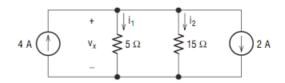
#### 2. Aplicando sobreposição, i<sub>1</sub> é dada pela soma:

Pelo divisor de corrente:

$$i_{1a} = 4 \times 15 / (5+15) = 3A$$

$$i_{1b} = -2 \times 15 / (5+15) = -1.5A$$

Resposta: 3.0 - 1.5 = 1.5A



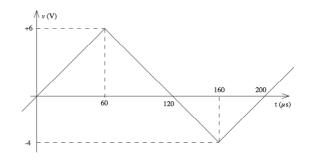
3. Considere uma onda triangular de 5kHz, que varia entre -4V e +6V. Calcule o seu valor médio.

$$T = 1/f = 200\mu s$$
. Desenhando a onda ...

área do triângulo positivo = 
$$120 \times 6/2 = 360 \text{ V.} \mu \text{s}$$
  
área do triângulo negativo =  $-80 \times 4/2 = -160 \text{ V.} \mu \text{s}$ 

Valor médio = 
$$(360 - 160) / T = 200V.\mu s/200\mu s$$

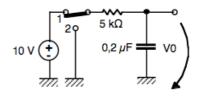
Resposta: 1 V



4. 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 V0.

t < 0s: C carregou completamente através de  $5k\Omega$  até aos 10V, pelo que V0 = 10V.



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

$$\tau = RC = 5x10^3 \times 0.2x10^{-6} = 1ms$$

$$\tau = RC = 5x10^3 \times 0.2x10^{-6} = 1 \text{ms}$$
  $V0(500\mu\text{s}) = V0(0) \times e^{-t/\tau} = 10 \text{ e}^{-0.5} = 6.1 \text{ V}$ 

Resposta: 5V < V0 < 7V

5. No circuito considere  $V\gamma = 0.6V$  e Vz = 4.7V. O valor máximo da corrente é de 7,5 mA quando o sinal de entrada é uma sinusoide de 500Hz com 8Vrms. Determine, com uma precisão melhor que ±2%, o valor de R:



$$V_{ip} = V_{ieff} \times \sqrt{2} = 8 \times \sqrt{2} = 11.3 \text{ V}$$

Kirchhoff da malha: Vip - 
$$V\gamma$$
 -  $Vz = R \times I \rightarrow R = (11,3 - 0,6 - 4,7) / 7,5mA = 0,8 k\Omega$ 

Resposta:  $R = 800 \Omega$ 

6. 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:

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

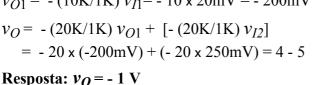
$$\partial v = v \frac{\partial v}{\partial x} = 0.1 \text{ V}$$

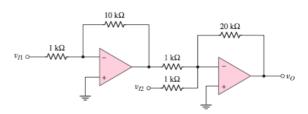
Resposta: - 0,3 V

7. No circuito à direita, calcule  $v_O$  quando  $v_{I1}$ =20mV e  $v_{I2}$ =250mV:

$$v_{O1} = -(10\text{K}/1\text{K}) v_{I1} = -10 \times 20\text{mV} = -200\text{mV}$$
  
 $v_{O} = -(20\text{K}/1\text{K}) v_{O1} + [-(20\text{K}/1\text{K}) v_{I2}]$ 

 $= -20 \times (-200 \text{mV}) + (-20 \times 250 \text{mV}) = 4 - 5$ 

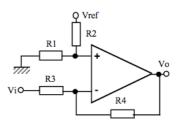




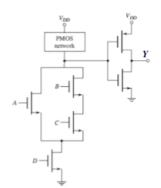
8. Atente nas entradas do OpAmp à direita.

Relacionando Vo com Vi, o circuito é um:

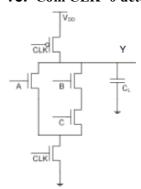
(X) Amplificador Inversor porque o sinal Vi é aplicado, através de R3, à entrada Inversora e porque há realimentação negativa, dado que R4 liga a saída à entrada Inversora.



9. Qual a função lógica do circuito abaixo?



**10.** Com CLK=0 determine Y:



Série = ANDParalelo = OR

**9.** [A // (B em série com C)] em série com D.

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

**10.** Como CLK = 0, o transistor PMOs está "ON" ligando VDD a Y, pelo que Y = 1.

## 11. Considere: $R_1=15k\Omega$ ; $R_2=3k\Omega$ ; $R_3=2k\Omega$ ; $R_4=6k\Omega$ ;

e que 
$$Vto=1V$$
; K=1 mA/V<sup>2</sup>;  $gm=4$ mA/V.

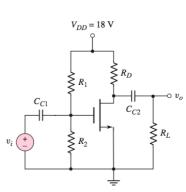
Considere que os condensadores se comportam como curtocircuitos para pequeno sinal e circuito-abertos para dc.

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

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

ID = 
$$K (VGS - Vto)^2 = 10^{-3} (3-1)^2 = 4mA$$

$$V_{\rm DS} = V_{\rm DD} - R_{\rm D} I_{\rm D} = 18 - (2x_{\rm 10}^3 x_{\rm 4}x_{\rm 10}^{-3})$$
 Resposta:  $V_{\rm DS} = 10 \text{ V}$ 



#### 12. Para o circuito anterior, calcule $v_0/v_i$ :

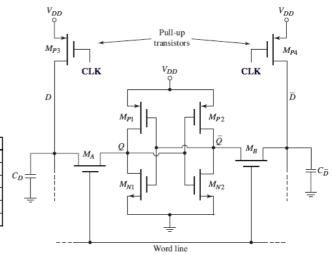
Com base no modelo equivalente para pequenos sinais obtém-se:

$$v_0 = -gm (RD //RL) v_i = -4x10^{-3} x 1,5x10^3 x v_i = -6 v_i$$

Resposta:  $v_0/v_i = -6$ 

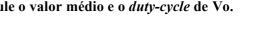
**13.**[2] O circuito representa uma célula RAM. Os estados 1 a 6 estabelecem-se sequencialmente. Complete a tabela abaixo com o valor lógico de D, ~D, Q e ~Q, e com o estado (On ou Off) dos transistores.

| [ | Estado  | CLK | WL | D | ~ <i>D</i> | Q | ~ <i>Q</i> | MNI | MN2 | MP1 | MB  | MP4 |
|---|---------|-----|----|---|------------|---|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|   | 1       | 0   | 0  | 1 | 1          | 0 | 1          | On  | Off | Off | Off | On  |
|   | 2       | 1   | 0  |   |            | 0 | 1          | On  | Off | Off | Off | Off |
|   | 3 Read  | 1   | 1  | 0 | 1          | 0 | 1          | On  | Off | Off | On  | Off |
|   | 4       | 0   | 0  | 1 | 1          | 0 | 1          | On  | Off | Off | Off | On  |
|   | 5 Write | 1   | 1  | 1 | 0          | 1 | 0          | Off | On  | On  | On  | Off |
|   | 6       | 0   | 0  | 1 | 1          | 1 | 0          | Off | On  | On  | Off | On  |



# 14.[2] Considere o comparador à direita, com R1=5k $\Omega$ , R2=15k $\Omega$ e Vref = -2V. O OpAmp satura a ±10V. Justificando todos os passos:

- (a) calcule as tensões de comparação inferior (VTL) e superior (VTH) e desenhe o gráfico de Vo em função de Vi, indicando todos os valores relevantes, quer no eixo Vi, quer no eixo Vo;
- (b) se Vi for uma onda triangular de 2kHz, entre ±5V, calcule o valor médio e o duty-cycle de Vo.



a) O comparador é inversor porque Vi está ligada à entrada inversora do OpAmp e tem histerese porque existe realimentação positiva, através de R2, da saída para a entrada não-inversora.

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

$$V + = [Vref R2 / (R1 + R2)] + [Vo R1 / (R1 + R2)] = -2 \times 0.75 + 0.25 Vo = -1.5 + 0.25 Vo$$

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 Vi = V+, donde, a tensão à qual é feita a comparação obtém-se quando:

$$Vi = V+ = -1.5 + 0.25 \text{ Vo}$$

Como Vo = 
$$\pm 10$$
 V, ocorrem 2 situações (Vo = VH =  $+ 10$  V e Vo = VL =  $- 10$  V):

$$V_{TH} = -1.5 + 0.25 \times 10 = +1 \text{ V}$$
 e  $V_{TL} = -1.5 - 0.25 \times 10 = -4 \text{ V}$ 

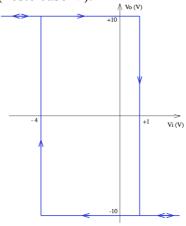
Vo

#### Notas:

- VH e VL são medidas ao nível da saída, enquanto que VTH e VTL são medidas ao nível da entrada.
- Como o comparador é inversor:

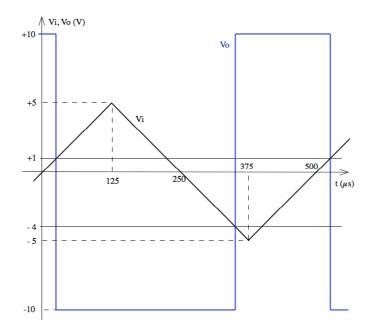
quando 
$$Vi < -4 V$$
,  $Vo = VH = +10 V$  e quando  $Vi > +1 V$ ,  $Vo = VL = -10 V$ 

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) 
$$T = 1/f = 1/2000 = 500 \mu s$$

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



Por mera inspeção da figura retira-se:

- Vi desce de +5V para -5V (total de 10V) em T/2 (250 $\mu$ s). Sendo uma triangular, conclui-se que a taxa de variação de Vi é de  $\pm$  10V / 250 $\mu$ s =  $\pm$  1V / 25 $\mu$ s =  $\Delta$ t
- durante o tempo ON (Vo = +10V), a entrada Vi desce, primeiro, de -4V para -5V e, depois, cresce de -5V até +1V, ou seja, sofre uma variação total (em valor absoluto) de  $1+6=7V=\Delta V$ .

$$ton = \Delta V \times \Delta t = 7 \times 25 = 175 \,\mu s$$
 e

e 
$$t_{OFF} = T - t_{ON} = 500 - 175 = 325 \mu s$$

O duty-cycle será, então

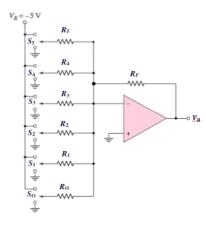
$$\partial = \text{ton} / T = 175 / 500 = 0.35 = 35\%$$

O valor médio de Vo: Vomed = 
$$\partial$$
 VH + (1- $\partial$ ) VL = 0,35 x 10 + 0,65 x (-10) = - 3 V

15.[2] Pretende-se construir uma DAC de 6 bits, com um valor de fim de escala de 10V, sendo  $R4=10k\Omega$  e VR=-5V.

Justificando todos os passos, calcule:

- (a) o valor analógico do LSB;
- (b) o valor de R5 e de R0 a R3;
- (c) o valor de RF (em  $\Omega$ );
- (d) o valor da corrente em RF e da tensão  $\mathcal{V}$ 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  $\partial v$ .

$$\partial v = v_{\text{amax}}/63 = 10\text{V}/63 = 0.159 \text{ V} \approx 0.16 \text{ V} \text{ (precisão de 0.5 LSB)}$$

b) Raciocinando apenas em valores absolutos, sabe-se que que o bit menos significativo (b0), associado a Ro, deve provocar a menor corrente, porque à saída deve provocar a menor tensão que é  $\partial v$ . Pela lei de Ohm, rapidamente se conclui que Ro será a maior das resistências de entrada. Por outro lado, é sabido que cada bit tem o dobro do peso do anterior. Assim,

$$Ro = 2 R1 = 4 R2 = 8 R3 = 16 R4 = 32 R5$$
, pelo que

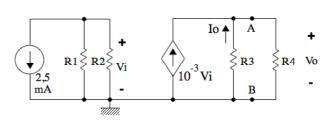
$$R0 = 16 R4 = 16 \times 10 \text{k}\Omega = 160 K\Omega$$

$$R1 = 8 R4 = 80 k\Omega$$
  $R2 = 4 R4 = 40 k\Omega$ 

$$R3 = 2 R4 = 20 k\Omega$$

e 
$$R5 = R4 / 2 = 5 k\Omega$$

- c) Para o LSB (000001) só existe corrente em Ro e o valor analógico na saída é  $\partial v = 0,159$  V. Como o amplificador é inversor  $\nu_a$  = VR RF / Rx = = VR RF / Ro = + 5V RF / 160k $\Omega$  = 0,159 Donde RF = 5088  $\Omega$
- d) Convertendo W = 010101 para decimal obtém-se  $16+4+1=21=W_{(10)}$ Da expressão usada na alínea a) retiramos que  $v_a$  =  $\partial v \times W_{(10)} = 0,159 \times 21 = 3,34 \text{ V}$ . Considerando que o sentido da corrente IRF 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.[2] Considere o circuito à direita com R1=5k $\Omega$ ; R2=20k $\Omega$ ; R3=500 $\Omega$  e R4=2k $\Omega$ . Justificando todos os passos:
  - (a) calcule o valor de I<sub>0</sub>, V<sub>0</sub> e potência em R4;
  - (b) obtenha o equivalente de Norton para todo o circuito à esquerda dos pontos AB.



a) R1//R2 e em paralelo com Vi. R12 = R1//R2 = 5//20 = 4 k $\Omega$  então, dado que o sentido da corrente de entrada e o de Vi são opostos, vem que

$$Vi = -2.5 \text{mA} \times R_{12} = -2.5 \text{mA} \times 4 \text{k}\Omega = -10 \text{ V}$$

$$Ix = 10^{-3} Vi = 10^{-3} x (-10) = -10 mA$$

Como Io e Ix graficamente têm sentidos contrários, e usando o divisor de corrente, obtém-se:

$$Io = -Ix R4/(R3+R4) = -(-10mA) \times 2k\Omega/2,5k\Omega = 8 mA.$$

$$Vo = -Io R3 = -8mA \times 0.5k\Omega = -4 V$$

$$P_{R4} = V_0^2 / R_4 = (-4)^2 / 2k\Omega = 16 / 2000 = 8 \text{ mW}.$$

b) Como a malha de entrada não se altera Ix = -10 mA.

Para obter IN, curto-circuita-se A e B, pelo que toda a corrente Ix passa pelo curto-circuito. Então  $I_N = I_{AB} = I_X = -10 \text{ mA}$ .

Para determinar RN, há que identificar que Ix é uma fonte 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 Ix = - 10 mA. Mas, agora, R4 não existe, pelo que

$$V_{AB} = I_X R3 = -10 \text{mA} \times 0.5 \text{k}\Omega = -5 \text{ V}$$

$$R_N = V_{AB} / I_N = -5V / (-10mA) = 500 \Omega$$

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

