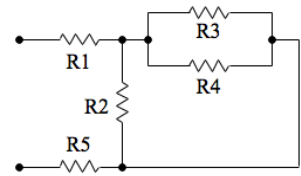


1. No circuito à direita:

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

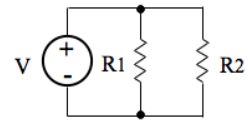
**Resposta:** R2 está em paralelo com R3.



2. A potência dissipada em R1 é o dobro da dissipada em R2.

Então verifica-se que:  $V^2 / R1 = 2 V^2 / R2 \Rightarrow R2 = 2 R1$

**Resposta:**  $R1 = R2 / 2$



3. Vi é uma onda quadrada com  $\pm 15V$  e 5kHz. Considere  $V_\gamma = 1V$ . Calcule o valor médio de Vo:

$$V_i = 15V \Rightarrow V_o = V_Z = 10V$$

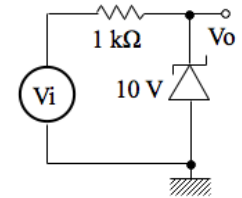
$$V_i = -15V \Rightarrow V_o = V_\gamma = -1V$$

O valor médio é a área do sinal ao longo de um período (T) a dividir por T.

$$V_{med} = (-1V \times t_{off} + 10V \times t_{on}) / T = 9 / 2 = 4,5V$$

Já que  $t_{on} = t_{off}$

**Resposta:**  $V_{med} = 4,5V$



4. No circuito considere  $V_\gamma = 0,68V$ ,  $V_i = 10V$ ,  $R1 = R2 = 680\Omega$ .

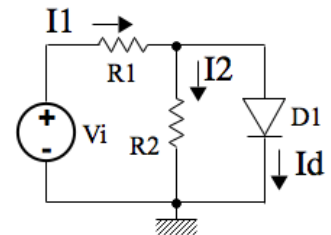
Calcule, aproximadamente, o valor de Id.

$$I1 = I2 + Id \quad e \quad Id \geq 0 \quad (V_i \gg V_\gamma)$$

$$I2 = V_\gamma / R2 = 0,68/680 = 1mA$$

$$I1 = (V_i - V_\gamma) / R1 = (10 - 0,68) / 680 = 13,7mA$$

$$Id = I1 - I2 = 13,7 - 1 = 12,7mA \quad \textbf{Resposta: } Id = 12,7 \text{ mA}$$



5. Considere um circuito rectificador de onda completa em ponte e que  $V_\gamma = 0,8V$ . A filtragem subsequente garante uma tensão de ripple de 2V. A tensão à entrada do rectificador é de 50Hz e valor eficaz 7,5V. Calcule o valor mínimo da saída filtrada.

$$V_{ip} = V_{ieff} \times \sqrt{2} = 7,5 \times \sqrt{2} = 10,6V$$

Como o rectificador é completo em ponte, há a considerar a queda de 2 diodos, pelo que  $V_{om\acute{a}x} = V_{ip} - 2 V_\gamma = 10,6 - 1,6 = 9V$  e

$$V_{om\acute{in}} = V_{om\acute{a}x} - V_{ripple} = 9 - 2 = 7V$$

**Resposta:** 7 V

6. Considere uma ADC de contagem com 5 bits, com um valor de fim de escala de 3,10V e um clock de 1 MHz. Determine o valor da saída quando à entrada coloca uma tensão de 2,45V.

$\partial v = v_{amax} / 31 = 0,1V$ . Ou seja, desde zero, por cada clock, o contador incrementa uma unidade e a DAC, correspondentemente, acrescenta 0,1V a  $v_O$ .

Ao fim de 24 contagens a saída digital é 11000 e  $v_O = 2,40V$ . Como o comparador é não inversor e  $v_A$  ainda é maior que  $v_O$ , o comparador força mais um clock ao contador, o qual, por isso, dará como saída final 11001.

**Resposta:** 11001

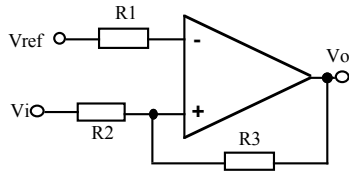
7. Uma DAC de 8 bits apresenta à saída uma tensão de 40mV quando à entrada é aplicado o byte 00000100. Qual a tensão de saída para uma entrada 00100000?

$$00 \ 000 \ 100 = 4_{(10)} \Rightarrow \partial v = 40mV / 4 = 10mV$$

$$00 \ 100 \ 000 = 32_{(10)} \Rightarrow V_o = 32 \partial v = 320mV$$

**Resposta:** 320mV

8. Atente nas entradas do OpAmp. Relacionando  $V_o$  com  $V_i$ , o circuito é um:



### Comparador com histerese

porque existe realimentação (positiva), via R3, da saída para a entrada não-inversora.

9. Atente nas entradas do OpAmp à direita.  $R_1=R_2=10\text{k}\Omega$ ,  $V_{\text{ref}} = +1\text{V}$ .  $V_i$  é uma senoide com  $4\text{Vpp}$  (pico a pico).

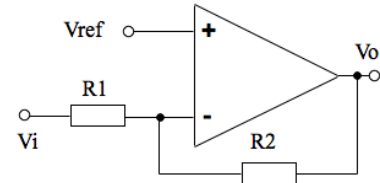
Calcule o valor máximo de  $V_o$ :

Para  $V_i$  o amplificador é inversor, sendo  $V_{\text{imin}} = -2\text{V}$

$V_+ = V_{\text{ref}}$ , sendo o amplificador não inversor em relação a  $V_{\text{ref}}$ .

Aplicando sobreposição, temos:  $V_{\text{omáx}} = V_{\text{ref}} [1 + (R_2/R_1)] - V_{\text{imin}} R_2/R_1 = 1 \times 2 + 2 \times 1 = 4\text{V}$

**Resposta: 4 V**



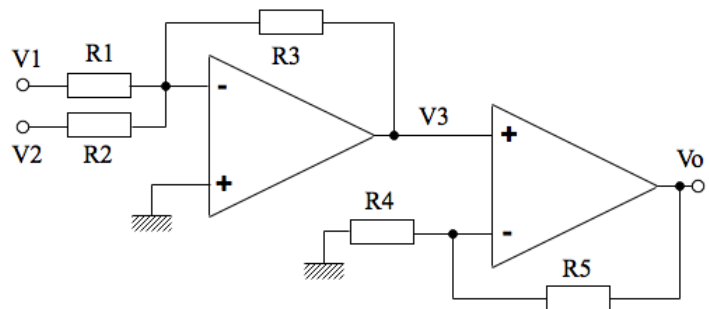
10. Atente nas entradas dos OpAmps.

$R_1=10\text{k}\Omega$  |  $R_2=5\text{k}\Omega$  |  $R_3=20\text{k}\Omega$

$R_4=10\text{k}\Omega$  |  $R_5=30\text{k}\Omega$

$V_1 = -1\text{V}$  |  $V_2 = +1\text{V}$

Calcule  $V_o$ :



$$V_3 = -V_1 (R_3/R_1) - V_2 (R_3/R_2) =$$

$$V_3 = -(-1 \times 2) - 1 \times 4 = -2\text{V}$$

$$V_o = V_3 [1 + (R_5/R_4)] = -2 \times 4 = -8\text{V} \quad \text{Resposta: } V_o = -8\text{V}$$

11. Considere:  $R_1=12\text{k}\Omega$  ;  $R_2 = ?\text{k}\Omega$  ;  $R_D=1,5\text{k}\Omega$  ;  $R_L=3\text{k}\Omega$  ;

e que  $V_{to}=3\text{V}$  ;  $K=0,5\text{mA/V}^2$ .

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

Para obter  $I_D = 4,5\text{mA}$ , o valor de  $R_2$  é:

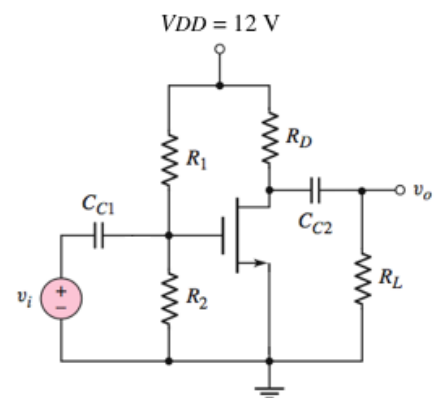
$$I_D = K (V_{GS} - V_{to})^2 = 0,5 \times 10^{-3} (V_{GS} - 3)^2 = 4,5\text{mA}$$

Donde  $V_{GS} = 6\text{V}$

Como  $I_G = 0$ ,  $V_{R2} = V_G = V_{GS} = V_{DD} R_2 / (R_1 + R_2) = 6\text{V}$

donde,  $6 = 12 R_2 / (12\text{k} + R_2) \Rightarrow R_2 = 12\text{k}\Omega$

**Resposta: 12 kΩ**



12. No circuito anterior, considerando  $g_m=3\text{mA/V}$  e que  $v_i$  é um sinal sinusoidal com  $200\text{mV}$ , determine a amplitude de  $v_o$  e a fase deste em relação a  $v_i$ :

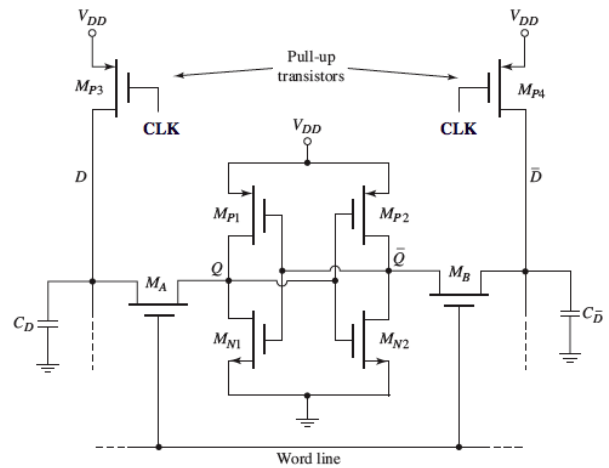
Com base no modelo equivalente para pequenos sinais obtém-se:

$$v_o = -g_m (R_D // R_L) v_i = -3 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 \times 0,2 = -0,6\text{V} \quad \text{Polaridades simétricas} \Rightarrow \text{fase} = \pm 180^\circ$$

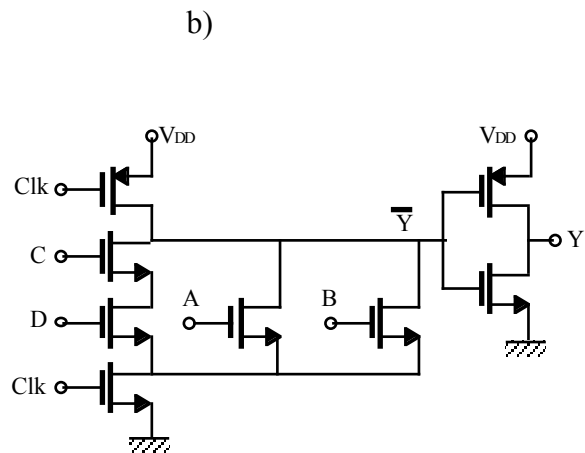
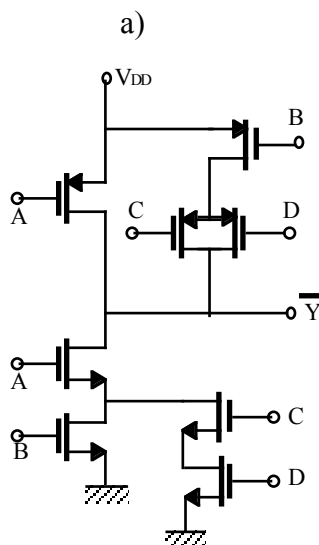
**Resposta: 0,6V / -180°**

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

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



14. Desenhe (incluindo todos os transistores NMOS e PMOS) e explique o funcionamento de:
- um circuito **estático** CMOS que implemente a **negação** da função  $Y = A(B + CD)$ ;
  - um circuito **dinâmico** CMOS que implemente a função  $Y = A + B + CD$ .



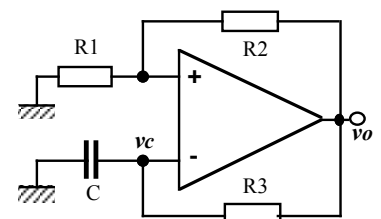
15. O circuito à direita, em que o OpAmp satura a  $\pm 10V$ , é um oscilador baseado num comparador com histerese.

Repare que  $V_c$  se comporta como a entrada (INVERSORA) do comparador e que C carrega e descarrega do mesmo modo que num circuito RC passa-baixo, ou seja,  $v_c(t) = V_{final} - (V_{final} - V_{inicial})e^{-t/RC}$

$$R1 = 10k\Omega \mid R2 = 90k\Omega \mid R3 = 10k\Omega \mid C = 1\mu F$$

Justificando todos os passos:

- calcule  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  e desenhe  $v_o$  e  $v_c$ , em função do tempo (num mesmo gráfico e incluindo os valores das tensões relevantes);
- calcule a frequência de oscilação e o *duty-cycle* de  $v_o$ .

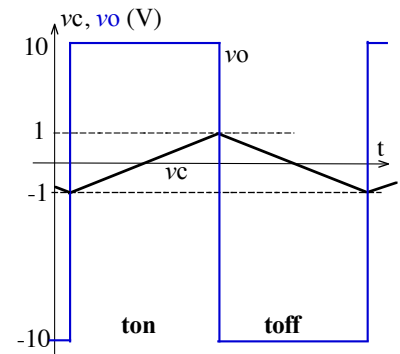


$$v_c = V^+ = v_o R1 / (R1 + R2) = 0,1 v_o$$

$$v_o = 10V \Rightarrow v_c = V_{TH} = 1V$$

$$v_o = -10V \Rightarrow v_c = V_{TL} = -1V$$

$v_o = 10V \Rightarrow \text{ton}$  : através de R3, C carrega exponencialmente;  
 quando  $v_c$  atinge  $V_{TH}$ , o OpAmp comuta para  $v_o = -10V$ .  
 $v_o = -10V \Rightarrow \text{toff}$  : através de R3, C descarrega exponencialmente;  
 quando  $v_c$  atinge  $V_{TL}$ , o comparador comuta para  $v_o = 10V$ .



$$\tau = RC = 10^4 \times 10^{-6} = 10^{-2} \text{ s}$$

$$v_c(t) = V_{\text{final}} - (V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}) e^{-t/RC}$$

$v_o = 10V \Rightarrow \text{ton}$  : a carga de C começa em  $V_{TL}$  ( $V_{\text{inicial}} = -1V$ ) e tende exponencialmente para  $v_o = 10V$  ( $V_{\text{final}} = 10V$ ), mas é interrompida quando  $v_c$  atinge  $V_{TH} = 1V$ :

$$v_c(\text{ton}) = 1V = 10 - [10 - (-1)] e^{-\text{ton}/RC} \Rightarrow e^{-\text{ton}/RC} = 9/11 \Rightarrow -\text{ton} / 10^{-2} = \ln(9/11) \Rightarrow \text{ton} = 2 \text{ ms}$$

$v_o = -10V \Rightarrow \text{toff}$  : a descarga de C começa em  $V_{TH}$  ( $V_{\text{inicial}} = 1V$ ) e tende para  $v_o = -10V$  ( $V_{\text{final}} = -10V$ ), mas é interrompida quando  $v_c$  atinge  $V_{TL} = -1V$ :

$$v_c(\text{toff}) = -1V = -10 - (-10 - 1) e^{-\text{toff}/RC} \Rightarrow e^{-\text{toff}/RC} = 9/11 \Rightarrow -\text{toff} / 10^{-2} = \ln(9/11) \Rightarrow \text{toff} = 2 \text{ ms}$$

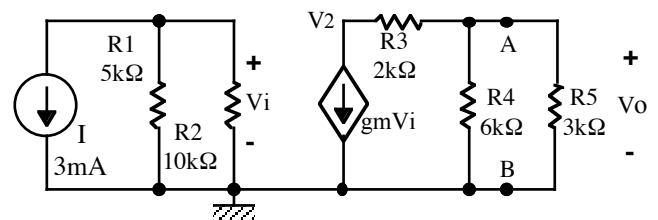
$$T = \text{ton} + \text{toff} = 2 + 2 = 4 \text{ ms} \Rightarrow f = 1/T = 1/4\text{ms} = 250 \text{ Hz}$$

$$\text{ton} = \text{toff} \Rightarrow \delta = 50\%$$

**16.** Para o circuito à direita, com  $g_m = 250 \mu A/V$ , justificando todos os passos:

(a) calcule o valor de  $V_i$  e de  $V_o$ ;

(b) obtenha o equivalente de Norton para todo o circuito à esquerda dos pontos AB e desenhe esse equivalente.



$V_i$  está em paralelo com R1 e R2.

$$R_{12} = R1 // R2 = 3,33k\Omega$$

$$V_i = -I \times R_{12} = -3 \times 3,33 = -10V$$

$$g_m V_i = 250 \times 10^{-6} \times (-10) = -2,5 \text{ mA}$$

$$V_o = R5 \times I_{R5}$$

$$\text{Pelo divisor de corrente: } I_{R5} = -g_m V_i R4 / (R4 + R5) = -(-2,5\text{mA}) \times 6/9 = 1,667 \text{ mA}$$

$$V_o = 3k\Omega \times 1,667\text{mA} = 5 \text{ V}$$

Corrente de Norton: Curto-circuitando os pontos A e B,  $I_N = I_{AB} = I_{sc}$

Como nada se alterou na entrada,  $I_{AB} = -g_m V_i = 2,5 \text{ mA}$ , pelo que  $I_N = I_{AB} = I_{sc} = 2,5 \text{ mA}$

Resistência de Norton: Se anularmos o efeito das fontes independentes ( $I = 0$ )  $\Rightarrow V_i = 0$

$g_m V_i = 0$  (fonte de corrente = 0 = circuito aberto).

Olhando, agora, para a esquerda dos pontos A e B, verifica-se que apenas existe R4, porque R3 fica em série com um circuito aberto, ou seja:  $R_N = R4 = 6 \text{ k}\Omega$

