Alguns esquemáticos indicam valores de simulação. Os valores de tensão apontam para um nó do circuito, indicando assim a diferença de tensão medida desse nó para a massa. Os valores de corrente apontam para um terminal de um componente, indicando assim o valor de corrente que entra por esse terminal. Os valores de potência apontam para o centro do símbolo do componente respectivo.

Por limitação da aplicação de desenho, no esquemático de alguns circuitos deste documento não se indica a unidade no valor das resistências, sendo naturalmente Ohm (Ω). Por vezes também não se indicam as unidades nas fontes de corrente (A) e de tensão (V).

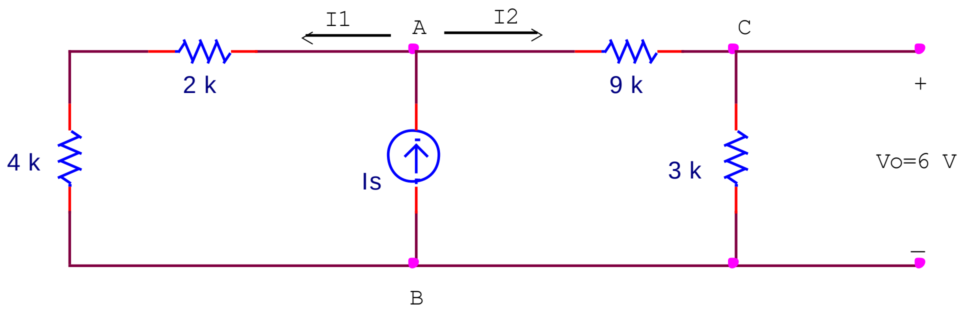
Utilize a convenção seguinte para os díodos: a tensão V_D medida do ânodo A para o cátodo K (V_{AK}) e a corrente I_D com o sentido que percorre o díodo entrando pelo ânodo e saindo pelo cátodo ($I_{A\rightarrow K}$). Tenha em consideração que as grandezas quando se referem ao díodo de Zener, V_Z e I_Z, são definidas simétricas das anteriores, ou seja, V_Z=-V_D e I_Z=-I_D. As grandezas tensão e corrente dos outros componentes devem ser indicadas nos circuitos.
Nos exercícios e para a análise de grandes sinais, utilizam-se os modelos lineares por troços para os díodos: condução directa V_{D0} e R_D; região de zener V_{Z0} e R_Z. Quando se considera R_D=0 Ω indica-se apenas a tensão V_D=V_{D0}, e de modo análogo para o zener V_Z=V_{Z0} com R_Z=0 Ω.

Nos exemplos de simulação com componentes não lineares, como por exemplo o díodo e o transístor, os resultados teóricos com modelos lineares são aproximações aos valores de simulação.

Índice

A. Utilize cálculos simples e por passos nos exercícios seguintes, como se demonstra no exemplo do exercício 1. Uma equação da lei de Ohm, uma equação da lei de Kirchhoff das tensões ou uma equação da lei de Kirchhoff das correntes, em cada passo.

1. Se V_O=6 V no circuito seguinte, calcule I_S.



R.:
Corrente que percorre as resistências em série 9 kΩ e 3 kΩ (lei de Ohm na resistência de 3 kΩ):

$I_2=V_O/3k=6/(3\times10^3)=2\times10^{-3}$ A=2 mA.

Queda de tensão na série de resistências 9 kΩ e 3 kΩ (diferença de tensão do nó A para o nó B; soma das quedas de tensão nas resistências 9 kΩ e 3 kΩ):

$V_{AB}=V_A-V_B=(9k+3k)\times I_2=12\times10^3\times2\times10^{-3}=24$ V

ou $V_{AB}=V_{AC}+V_{CB}=9k\times I_2+V_O=9\times10^3\times2\times10^{-3}+6=24$ V.

Corrente que percorre a série de resistências 2 kΩ e 4 kΩ:

$I_1=V_{AB}/(2k+4k)=24/(6\times10^3)=4\times10^{-3}$ A=4 mA.

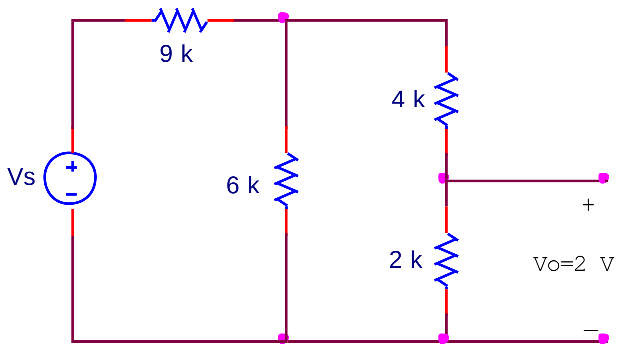
Corrente da fonte I_S:

$I_S=I_1+I_2=4\times10^{-3}+2\times10^{-3}=6\times10^{-3}$ A=6 mA.

Alternativa a partir do cálculo de I_2, divisor de corrente:

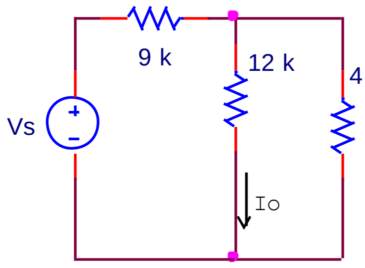
$$I_2=2\,mA=\frac{(4k+2k)}{(4k+2k)+(9k+3k)}I_S$$

2. Se V_O=2 V no circuito seguinte, calcule V_S.



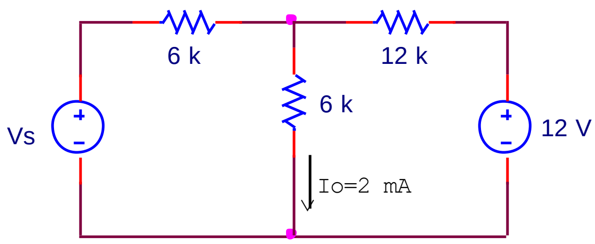
R.: V_S=24 V.

3. Se a potência absorvida pela resistência de 4 kΩ é 36 mW, calcule os valores de I_O e V_S.



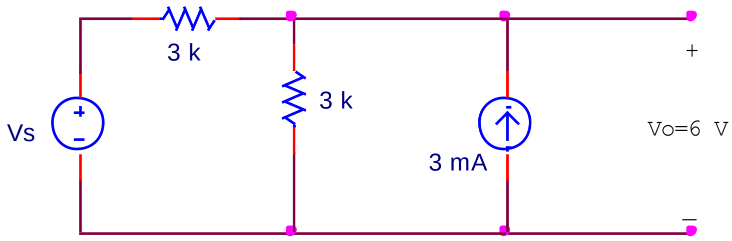
R.: I_O=1 mA; V_S=48 V.

4. No circuito seguinte, se I_O=2 mA, calcule o valor de V_S.



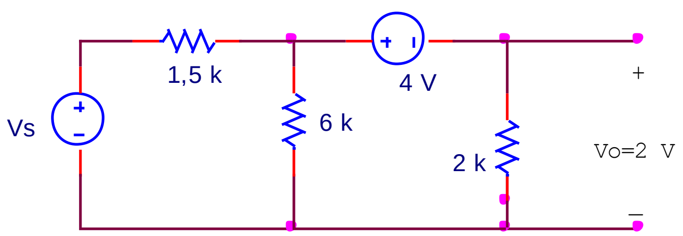
R.: V_S=24 V.

5. No circuito seguinte, calcule o valor da fonte V_S de modo a obter uma tensão V_O=6 V.



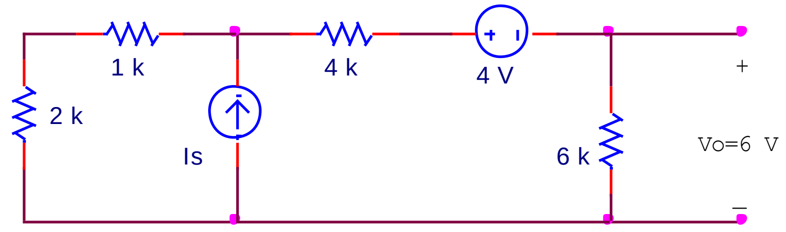
R.: V_S=3 V.

6. No circuito seguinte, calcule o valor da fonte V_S de modo a obter uma tensão V_O=2 V.



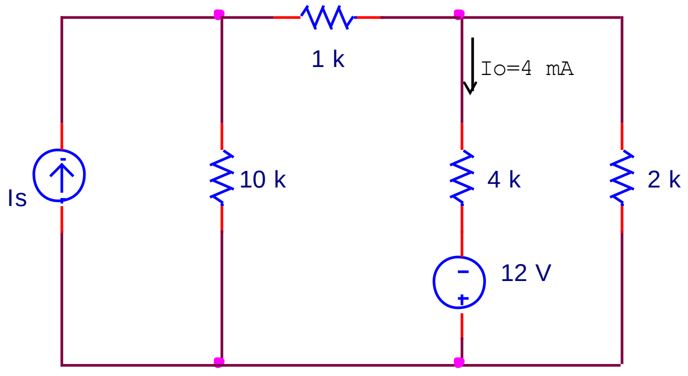
R.: V_S=9 V.

7. No circuito seguinte, calcule o valor da fonte I_S de modo a obter uma tensão V_O=6 V.



R.: I_S=17/3 mA=5,67 mA

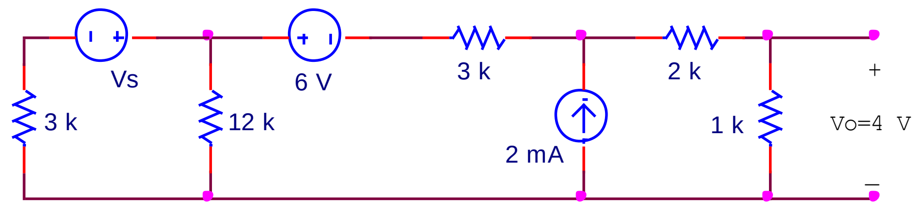
8. No circuito seguinte, calcule o valor da fonte I_S de modo a obter uma corrente I_O=4 mA.



R.: I_S=7 mA.

9. No circuito seguinte, calcule o valor da fonte V_S de modo a obter uma tensão V_O=4 V.

Calcule o total da potência fornecida pelas fontes de tensão e de corrente. Calcule o total da potência dissipada nas resistências. Confirme a conservação de energia.



R.: V_S=36 V

Potência fornecida pelas fontes:

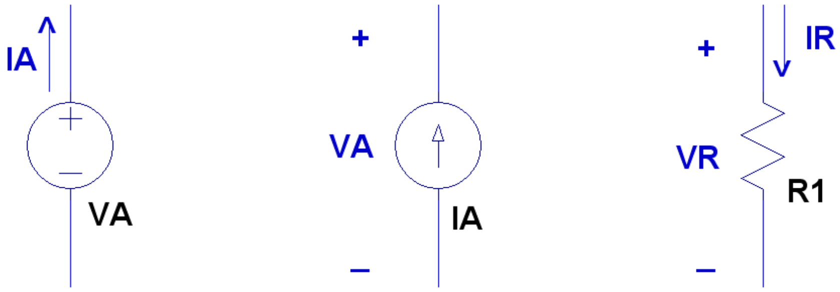
fonte de tensão V_S	→ 36 V × 4 mA = 144 mW
fonte de tensão 6 V	→ 6 V × (-2 mA) = -12 mW (negativa porque neste caso a corrente entra pelo terminal positivo da fonte de tensão)
fonte de corrente 2 mA	→ 12 V × 2 mA = 24 mW
total	→ 156 mW

Potência dissipada nas resistências: 48m+48m+12m+32m+16m=156 mW, igual ao total acima da potência fornecida pelas fontes.

Nota. Atenção ao sinal utilizado para a potência: $Conservação\ de\ energia \rightarrow\ \sum_{\text{ramos}} \text{vi} = 0$. Para obter $0\,W$, adicionando as potências em todos os ramos, deveremos considerar $P_{Vs} = -144\,mW$, $P_{V6V} = +12\,mW$, $P_{I2mA} = -24\,mW$ e P_R positivas.

Considere a seguinte convenção: potência negativa nas fontes de tensão se corrente sai pelo terminal positivo; potência negativa nas fontes de corrente se corrente flui no sentido de tensões mais elevadas; potência positiva nas resistências.

Considere as fontes e a resistência da figura.



Fonte de tensão V_A com corrente I_A.
Fonte de corrente I_A com tensão V_A.
Resistência R_1 com tensão V_R e corrente I_R.
Considere os sentidos assinalados para tensões e correntes.

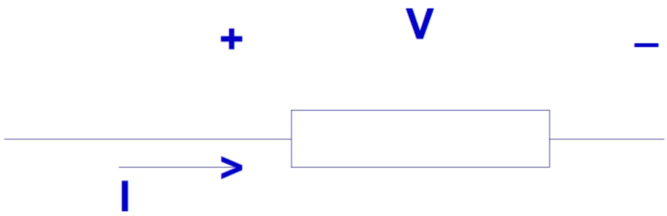
Para se verificar $\sum_{\text{ramos}} \text{vi} = 0\ \text{W}$,
considere a potência das fontes:

$$\text{P} = -\text{V}_\text{A}\text{I}_\text{A}$$

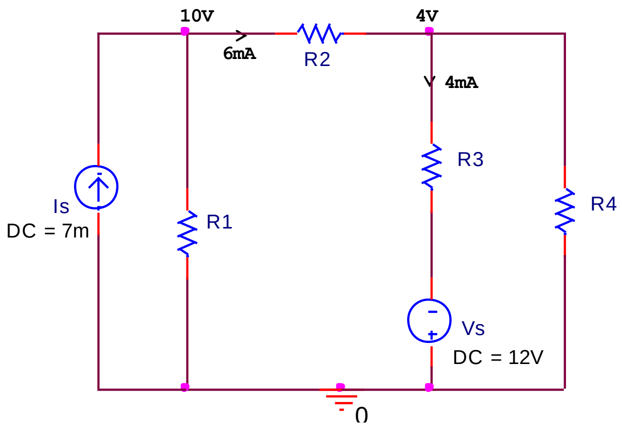
e a potência na resistência:

$$\text{P} = \text{V}_\text{R}\text{I}_\text{R}$$

Ou de forma genérica, para qualquer elemento de 2 terminais, com os sentidos de tensão e corrente definidos na figura seguinte, $P = VI$.



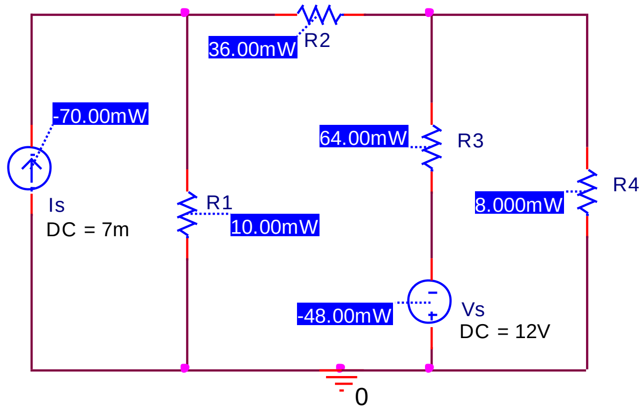
10. No circuito seguinte, calcule o valor das resistências R1, R2, R3 e R4. Tenha em consideração os valores das fontes Is e Vs. Tenha em consideração os valores das tensões nos dois nós indicados e das correntes nos dois ramos indicados.



R.:

$R_1 = 10\ k\Omega$,
$R_2 = 1\ k\Omega$,
$R_3 = 4\ k\Omega$,
$R_4 = 2\ k\Omega$.

11. No circuito seguinte, calcule o valor das resistências R_1, R_2, R_3 e R_4. Tenha em consideração os valores das fontes I_S e V_S. Tenha em consideração os valores das potências associadas a todos os elementos e indicadas no esquema.

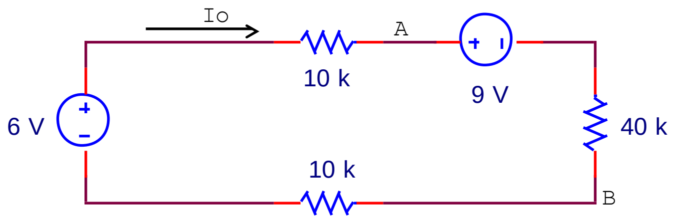


R.:

$R_1 = 10\ k\Omega$,
$R_2 = 1\ k\Omega$,
$R_3 = 4\ k\Omega$,
$R_4 = 2\ k\Omega$.

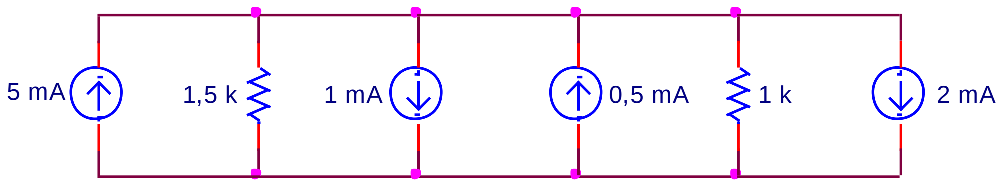
B. Leis de Ohm e de Kirchhoff

1. No circuito seguinte, calcule os valores da corrente I_O e da diferença de tensão V_{AB} entre os nós A e B.



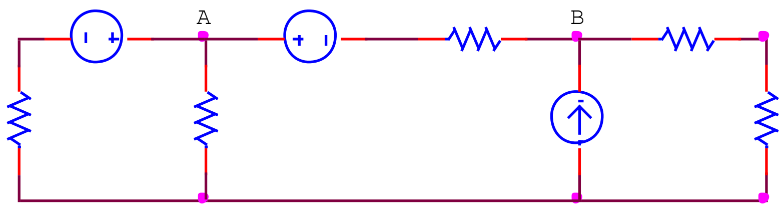
R.: I_O=-50 μA; V_{AB}=7 V.

2. No circuito seguinte, calcule os valores das quedas de tensão e das correntes nas resistências.



R.: 1,5 V; 1 mA; 1,5 mA.

3. No circuito seguinte, atribua nomes às fontes independentes (V_{f1}, V_{f2}, I_{f1}) e às resistências (R_1, R_2, …). Considere conhecidos os valores de todos estes componentes.



Repare que o circuito tem 8 ramos. Identifique-os.
Escreva equações que descrevem os elementos destes ramos.

Repare que o circuito tem 6 nós. Identifique-os.
Escreva as equações de corrente de Kirchhoff.

Repare que o circuito tem 6 malhas. Identifique-as.
Escreva as equações de tensão de Kirchhoff.

Repare que o circuito tem 3 malhas *independentes*[1]. Identifique-as.

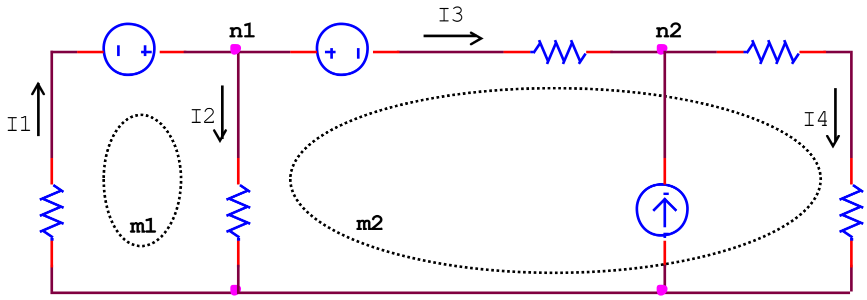
[1] Avalie "malhas independentes" com a seguinte definição: num conjunto de malhas independentes, cada malha contém pelo menos um ramo não presente nas outras malhas.

Um conjunto possível de 8 equações independentes resultantes das leis de Kirchhoff (rede planar):

- lei das correntes em todos os nós excepto um
  5 equações [=6 nós – 1]
- lei das tensões em todas as malhas *independentes*
  3 equações [=8 ramos – (6 nós – 1)]

São necessárias mais 8 equações que descrevem os elementos do circuito (por exemplo, V=RI para as resistências).

Não resolva este sistema de equações.



Repare que o sistema de equações se pode simplificar para os ramos com fontes de tensão ou fontes de corrente e para os nós com ligações a dois elementos apenas.

Refira-se agora ao circuito acima com indicação de nós, malhas e correntes físicas.
Assim, por exemplo, para conhecer os valores de corrente no circuito acima, bastam apenas 4 equações:

- escolha nomes para as 4 correntes (incógnitas I_1, I_2, I_3, I_4) que percorrem resistências
- aplique a lei das correntes para os 2 nós de interesse (n_1 e n_2)
- aplique a lei das tensões para (as) 2 malhas independentes sem fontes de corrente (m_1 e m_2)

KCL - n_1: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$

KCL - n_2: $I_3 + I_{f1} - I_4 = 0$

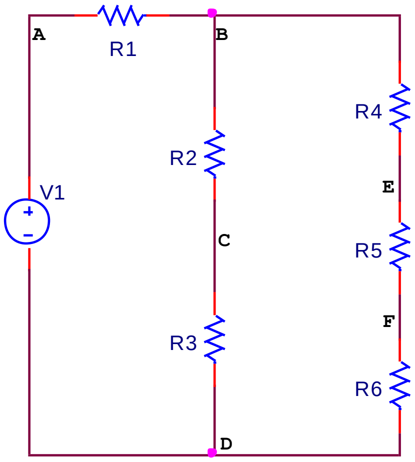
KVL - m_1: $R_1 I_1 - V_{f1} + R_2 I_2 = 0$

KVL - m_2: $-R_2 I_2 + V_{f2} + R_3 I_3 + R_4 I_4 + R_5 I_4 = 0$

Pode-se reduzir o número de incógnitas, minimizando as correntes a calcular no sistema de equações, ou seja, utilizar o método de substituição.

Por exemplo no circuito acima, reduz-se o sistema a 3 equações tendo em atenção que no nó n_2 uma das três correntes é já conhecida ($I_4=I_3+I_{f1}$).
Pode-se ainda reduzir o sistema a 2 equações, as equações das tensões (KVL), tendo também em atenção o nó n_1 ($I_3=I_1-I_2$), para calcular I_1 e I_2.

4. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão V_1=9 V e seis resistências R_1=R_2=1 kΩ e R_3=R_4=R_5=R_6=2 kΩ. Considere os nós A, B, C, D, E e F.

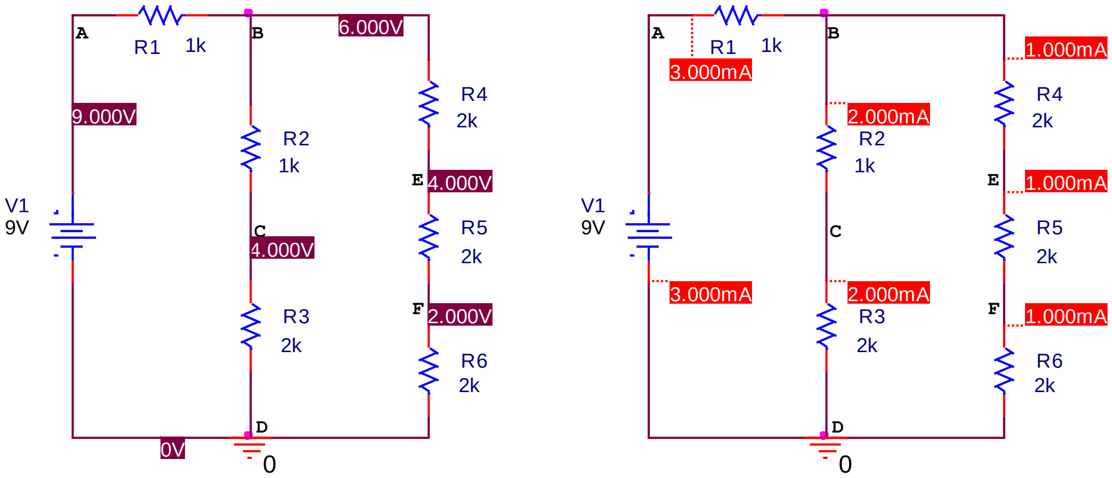


a) Calcule os valores das correntes que percorrem as seis resistências.

b) Calcule os valores das tensões aos terminais das seis resistências.

c) Calcule os valores das diferenças de tensão: V_{AC}, V_{AE}, V_{AF}, V_{BE}, V_{BF}, V_{CE}, V_{CF}, V_{DE}, V_{DF}.

R.: Resultados de simulação:

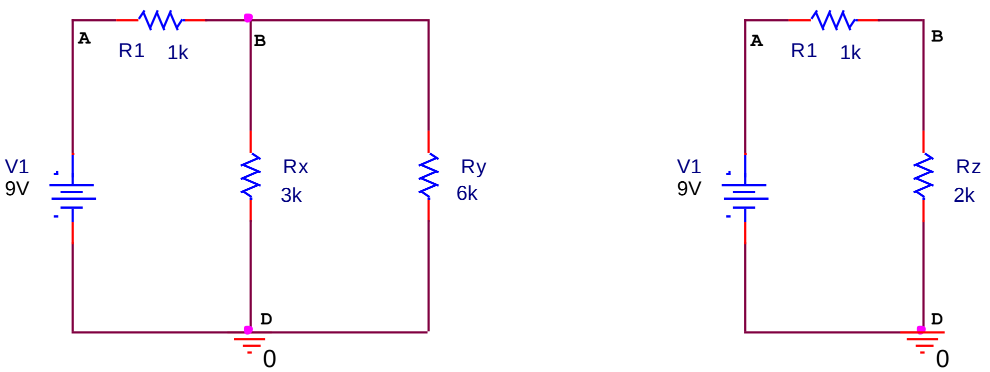


I_{R1}=3 mA, I_{R2}=I_{R3}=2 mA, I_{R4}=I_{R5}=I_{R6}=1 mA.

V_{R1}=3 V, V_{R2}=2 V, V_{R3}=4 V, V_{R4}=2 V, V_{R5}=2 V, V_{R6}=2 V.

V_{AC}=5 V, V_{AE}=5 V, V_{AF}=7 V, V_{BE}=2 V, V_{BF}=4 V, V_{CE}=0 V, V_{CF}=2 V, V_{DE}=-4 V, V_{DF}=-2 V.

Associação de resistências:



$R_x = R_2 + R_3 = 3\ k\Omega;$ $R_y = R_4 + R_5 + R_6 = 6\ k\Omega;$ $R_z = R_x // R_y = 2\ k\Omega.$

Considere-se o nó D massa no circuito, $V_D = 0\,V$ referência para o cálculo de tensões, nas expressões que se seguem.

$V_A = 9\,V$. Divisor de tensão: $V_B = \frac{R_z}{R_z+R_1}V_1 = 6\,V$. $I_{R1} = \frac{V_1}{R_1+R_z} = 3\,mA$, ou $I_{R1} = \frac{V_A-V_B}{R_1} = 3\,mA$.

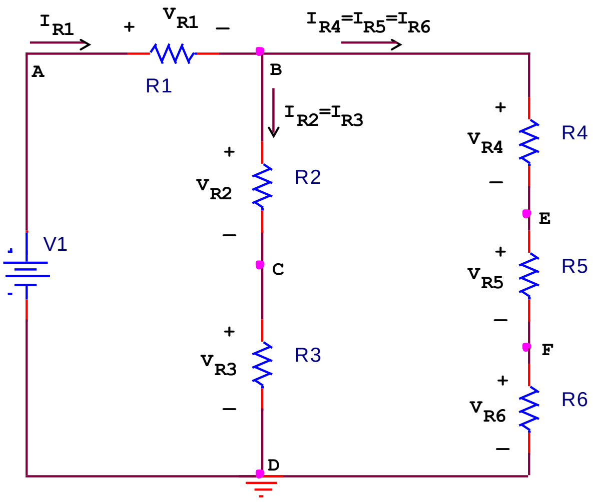
$I_{R2} = I_{R3} = \frac{V_B}{R_2+R_3} = 2\,mA$; $I_{R4} = I_{R5} = I_{R6} = \frac{V_B}{R_4+R_5+R_6} = 1\,mA$.

Ou divisor de corrente:

$I_{R2} = I_{R3} = I_{Rx} = \frac{R_y}{R_y+R_x}I_{R1} = 2\,mA$; $I_{R4} = I_{R5} = I_{R6} = I_{Ry} = \frac{R_x}{R_x+R_y}I_{R1} = 1\,mA$.

Cálculo dos valores de tensão aos terminais das resistências: lei de Ohm, $V_R = RI_R$.

Outras expressões de interesse:



$V_{R1} = V_A - V_B$ $\quad V_{R2} = V_B - V_C$

$V_{R3} = V_C - V_D$ $\quad V_{R4} = V_B - V_E$

$V_{R5} = V_E - V_F$ $\quad V_{R6} = V_F - V_D$

Tensões relativas à massa:

$V_A = V_1$

$V_B = V_A - V_{R1} = V_{R2} + V_{R3} = V_{R4} + V_{R5} + V_{R6}$

$V_C = V_{R3} = V_B - V_{R2}$

$V_D = 0\,V$ (massa)

$V_E = V_{R5} + V_{R6} = V_B - V_{R4}$

$V_F = V_{R6} = V_E - V_{R5}$

Pelas leis de Kirchhoff podemos escolher qualquer caminho para o cálculo da diferença de tensão entre dois nós, como se exemplifica também à direita.

Exemplo: $V_{AC} = V_{R1} + V_{R2} = V_1 - V_{R3}$.

Podemos assim recorrer à diferença das tensões relativas à massa em cada nó. Exemplo: $V_{AC} = V_A - V_C$.

$V_{AC} = V_A - V_C = V_{R1} + V_{R2} = V_1 - V_{R3}$

$V_{AE} = V_A - V_E = V_{R1} + V_{R4}$

$V_{AF} = V_A - V_F = V_1 - V_{R6} = V_{R1} + V_{R4} + V_{R5}$

$= V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} - V_{R6}$

$V_{BE} = V_B - V_E = V_{R4}$

$V_{BF} = V_B - V_F = V_{R4} + V_{R5}$

$V_{CE} = V_C - V_E = -V_{R2} + V_{R4} = V_{R3} - V_{R6} - V_{R5}$

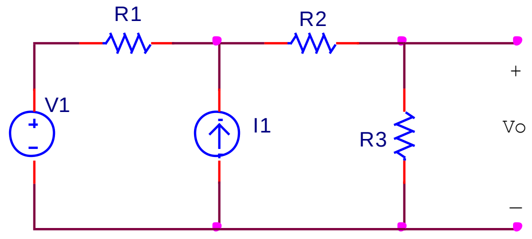
$V_{CF} = V_C - V_F = V_{R3} - V_{R6} = -V_{R2} + V_{R4} + V_{R5}$

$V_{DE} = V_D - V_E = -V_{R6} - V_{R5}$

$V_{DF} = V_D - V_F = -V_{R6}$

…

5. O circuito seguinte contém as fontes V_1=12 V e I_1=1 mA e as resistências R_1=2 kΩ, R_2=4 kΩ e R_3=2 kΩ. Pretende-se calcular o valor da tensão V_O, por dois métodos, leis de Kirchhoff e princípio da sobreposição:



a. Calcule os valores das correntes que percorrem as resistências e a tensão V_O, recorrendo às leis de Kirchhoff.

b. Calcule agora a tensão V_O, utilizando o princípio da sobreposição.

R.: Equações de Kirchhoff

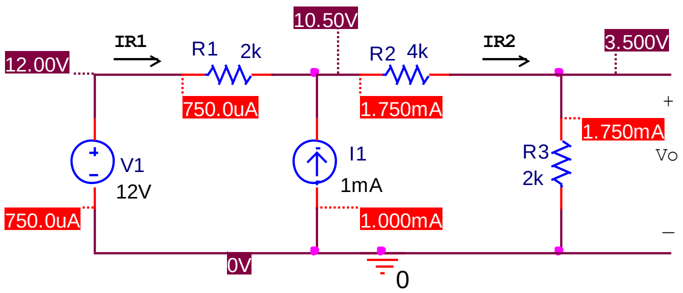
KVL: $-V_1 + R_1 I_{R1} + R_2 I_{R2} + R_3 I_{R2} = 0$ ($I_{R3} = I_{R2}$, ver sentidos no circuito abaixo)

KCL: $I_{R1} + I_1 - I_{R2} = 0$

Soluções do sistema de equações: $I_{R1} = 750\ \mu A$; $I_{R2} = 1{,}75\ mA$.

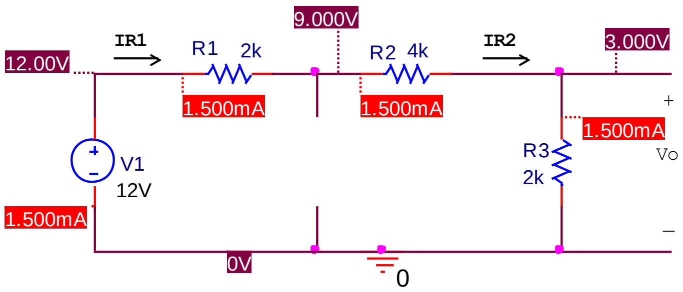
$V_O = R_3 I_{R3} = 3{,}5\ V$.

Simulação:



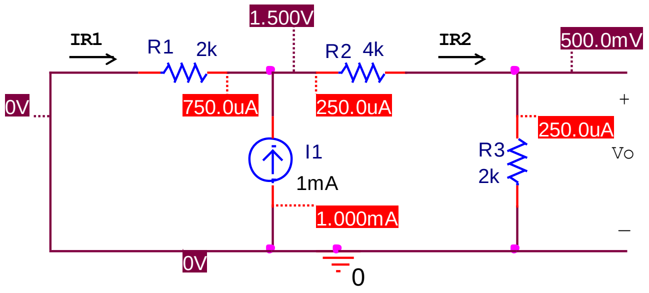
[Princípio da sobreposição na secção D.]

Princípio da sobreposição, $V_O = V_O' + V_O'' = 3 + 0{,}5 = 3{,}5\ V$, conforme análise seguinte.



Anulada fonte I_1.

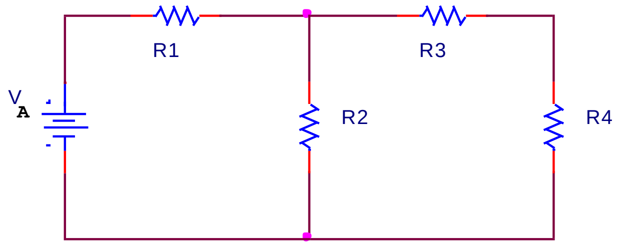
Divisor de tensão: $V_O' = \frac{R_3}{R_3 + R_1 + R_2} V_1 = 3\ V$.



Anulada fonte V_1.

Divisor de corrente: $I_{R3} = I_{R2} = \frac{R_1}{R_1+(R_2+R_3)} I_1 = 250\,\mu A$; $V_O'' = R_3 I_{R3} = 0{,}5\,V$.

6. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão V_A=10 V e quatro resistências R_1=R_2=R_3=R_4=1 kΩ.



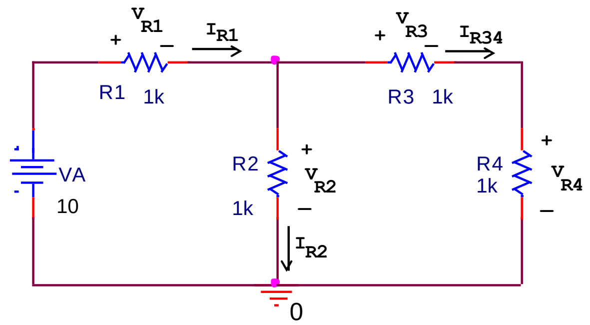
a) Para cada resistência no circuito, calcule o valor de tensão aos seus terminais e o valor de corrente que a percorre.
Assinale no circuito os sentidos dessas grandezas.

b) Com os valores da alínea anterior, confirme as leis de Kirchhoff para as tensões e para as correntes no circuito.

c) Calcule o valor da potência fornecida pela fonte V_A e os valores das potências dissipadas nas quatro resistências. Confirme a lei de Kirchhoff de conservação de energia.

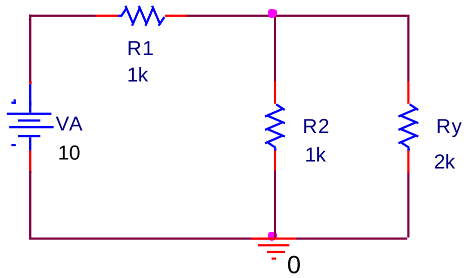
R.: (a)

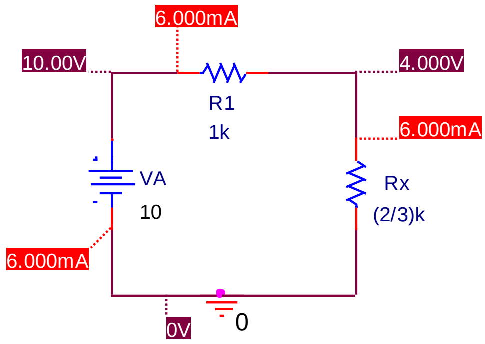
Considere-se as tensões e correntes referentes às quatro resistências conforme o esquema seguinte. V_{R1}, V_{R2}, V_{R3} e V_{R4} são as quedas de tensão nas resistências R_1, R_2, R_3 e R_4 respectivamente. I_{R1} é a corrente que percorre a resistência R_1, I_{R2} é a corrente que percorre a resistência R_2 e I_{R34} é a corrente que percorre as resistências R_3 e R_4 em série.



Método A: associação de resistências.

Substituindo a associação das resistências R_3, R_4 e R_2 pela resistência R_x, obtemos os circuitos equivalentes seguintes. R_3 e R_4 são duas resistências em série, cuja associação é equivalente a $R_y = R_3 + R_4 = 2\,k\Omega$. Esta resistência R_y está em paralelo com R_2, cuja associação é equivalente a $R_x = R_2 // R_y = \frac{R_2 R_y}{R_2 + R_y} = \frac{2}{3}\,k\Omega = 0{,}67\,k\Omega$.





$I_{R1} = I_{Rx} = \frac{V_A}{R_1 + R_x} = 6\,mA$ (associação série das resistências R_1 e R_x). $V_{R1} = R_1 I_{R1} = 6\,V$.

$V_{R2} = V_{Ry} = V_{Rx} = R_x I_{Rx} = 4\,V$. $I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R_2} = 4\,mA$. $I_{R34} = I_{Ry} = \frac{V_{Ry}}{R_y} = 2\,mA$.

$V_{R3} = R_3 I_{R34} = 2\,V$. $V_{R4} = R_4 I_{R34} = 2\,V$.

Alternativa

Reparar também que existem divisores de tensão e corrente que podiam ser utilizados.

Divisor de corrente entre R_2 e R_y:

$I_{R1} = I_{R2} + I_{R34}$. $I_{R2} = \frac{R_y}{R_2 + R_y} I_{R1} = 4\,mA$. $I_{R34} = \frac{R_2}{R_2 + R_y} I_{R1} = 2\,mA$.

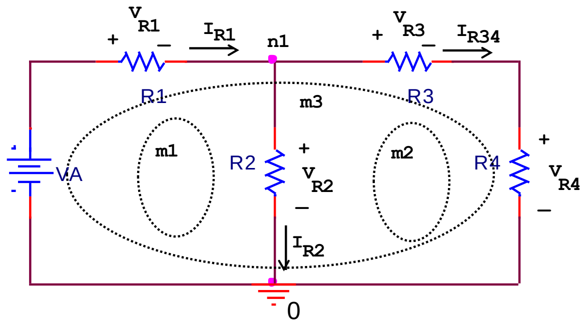
Divisor de tensão entre R_1 e R_x:

$V_A = V_{R1} + V_{Rx}$. $V_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_x} V_A = 6\,V$. $V_{Rx} = \frac{R_x}{R_1 + R_x} V_A = 4\,V$.

Divisor de tensão entre R_3 e R_4:

$V_{Ry} = V_{R3} + V_{R4}$. $V_{R3} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{Ry} = 2\,V$. $V_{R4} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{Ry} = 2\,V$.

Método B: equações das malhas e dos nós – leis de Kirchhoff.



O circuito tem duas malhas independentes, por exemplo m_1 e m_3:

$-V_A + V_{R1} + V_{R2} = 0$

$-V_A + V_{R1} + V_{R3} + V_{R4} = 0$

(circulando na malha no sentido dos ponteiros do relógio)

e um nó de interesse n_1:

$I_{R1} - I_{R2} - I_{R34} = 0$

(correntes que entram no nó).

As equações que definem os componentes são

$V = V_A$ para a fonte de tensão e

$V = RI$ para cada resistência.

Sistema de equações a resolver para o cálculo das correntes:

$$\begin{cases} -V_A + R_1 I_{R1} + R_2 I_{R2} = 0 \\ -V_A + R_1 I_{R1} + R_3 I_{R34} + R_4 I_{R34} = 0 \\ I_{R1} - I_{R2} - I_{R34} = 0 \end{cases}$$

Nota: o método A utiliza associação de resistências série e paralelo e/ou divisores de tensão e corrente que resultam igualmente das leis de Kirchhoff.

R.: (b) $KVL \rightarrow \sum_{\text{malha}} \text{v} = 0$ $KCL \rightarrow \sum_{\text{nó}} \text{i} = 0$

$KVL\ m_1 \rightarrow$ $-V_A + V_{R1} + V_{R2} = -10 + 6 + 4 = 0\ V$

$KVL\ m_2 \rightarrow$ $-V_{R2} + V_{R3} + V_{R4} = -4 + 2 + 2 = 0\ V$

$KVL\ m_3 \rightarrow$ $-V_A + V_{R1} + V_{R3} + V_{R4} = -10 + 6 + 2 + 2 = 0\ V$

$KCL\ n_1 \rightarrow$ $I_{R1} - I_{R2} - I_{R34} = 6mA - 4mA - 2mA = 0\ A$

R.: (c) $Conservação\ de\ energia \rightarrow \sum_{\text{ramos}} \text{vi} = 0$

Potência $P = VI$.

Potência fonte $V_A \rightarrow$ $P_A = -10V \times 6mA = -60\ mW$

[potência fornecida pela fonte;

negativa porque corrente sai do terminal positivo, $I_{R1} > 0$]

Potência resistência $R_1 \rightarrow$ $P_1 = 6V \times 6mA = 36\ mW$

Potência resistência $R_2 \rightarrow$ $P_2 = 4V \times 4mA = 16\ mW$

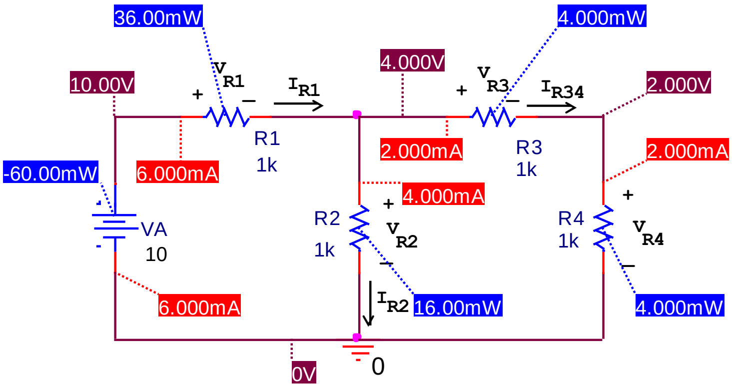
Potência resistência $R_3 \rightarrow$ $P_3 = 2V \times 2mA = 4\ mW$

Potência resistência $R_4 \rightarrow$ $P_4 = 2V \times 2mA = 4\ mW$

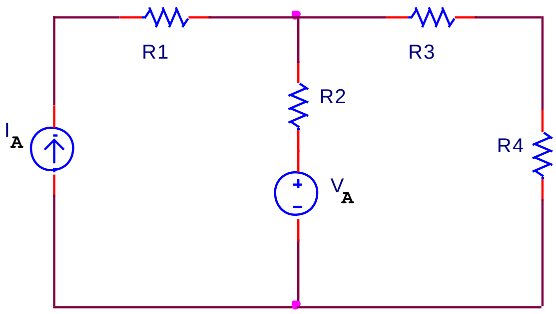
[potência dissipada nas resistências; positiva]

$P_A + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = -60mW + 36mW + 16mW + 4mW + 4mW = 0\ W$

Simulação:

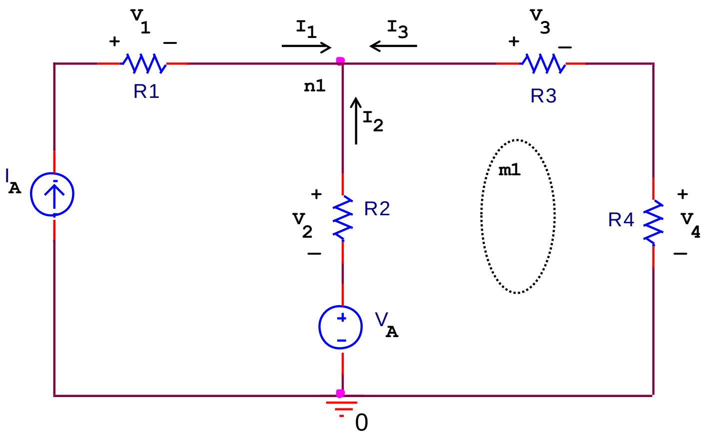


7. O circuito seguinte contém uma fonte de corrente I_A=1 mA, uma fonte de tensão V_A=5 V e quatro resistências R_1=R_2=1 kΩ e R_3=R_4=0,5 kΩ.



Calcule os valores das tensões aos terminais das resistências R_2 e R_4 e os valores das correntes que as percorrem.

Método A – leis de Kirchhoff



Selecção da única malha m_1 que não inclui fontes de corrente.
Selecção do único nó n_1, excepto o nó assinalado como massa, com confluência de três correntes.

$$\begin{cases} m_1 \rightarrow \quad -V_A - V_2 + V_3 + V_4 = 0 \\ \quad n_1 \rightarrow \quad I_1 + I_2 + I_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -V_A + R_2 I_2 - R_3 I_3 - R_4 I_3 = 0 \\ \quad I_A + I_2 + I_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_2 = 2\ mA \\ I_3 = -3\ mA \end{cases}$$

A corrente I_2 percorre a resistência R_2 e a corrente I_3 percorre a resistência R_4, com os sentidos assinalados no esquema.

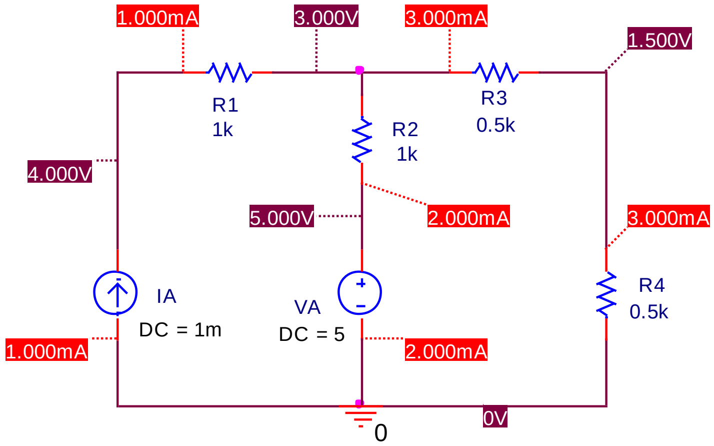
A tensão na resistência $R_2 \rightarrow$ $\quad V_{R2} = V_2 = -R_2 I_2 = -2\ V$

e a tensão na resistência $R_4 \rightarrow$ $\quad V_{R4} = V_4 = -R_4 I_3 = 1{,}5\ V$

com os sentidos assinalados no esquema.

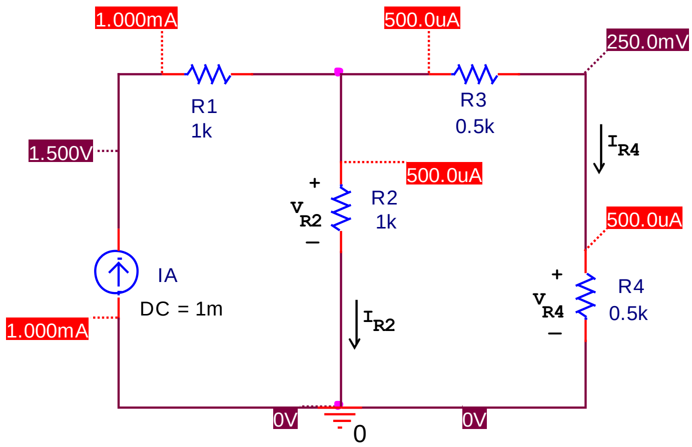
(Compreender os sinais em todas estas expressões!)

Simulação:



[Princípio da sobreposição na secção D.]

Método B: princípio da sobreposição.



Anulada a fonte V_A, $V_A = 0\,V$.

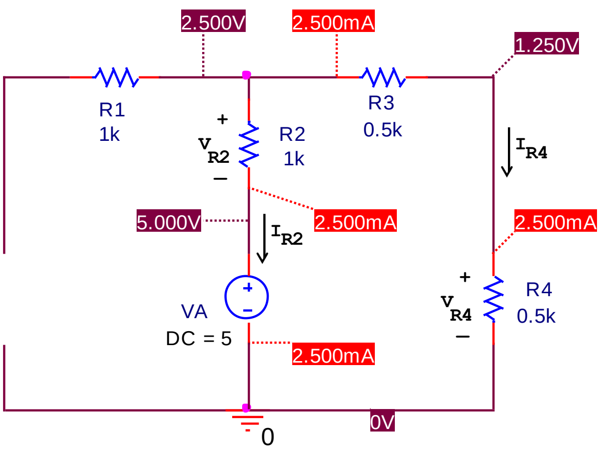
Divisor de corrente

$$I'_{R2} = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} I_A = 500\ \mu A$$

$$V'_{R2} = R_2 I'_{R2} = 0,5\ V$$

$$I'_{R4} = \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} I_A = 500\ \mu A$$

$$V'_{R4} = R_4 I'_{R4} = 0,25\ V$$



Anulada a fonte I_A, $I_A = 0\,A$.

Divisor de tensão ($I_{R1} = 0$)

$$V''_{R2} = -\frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} V_A = -2,5\ V$$

$$I''_{R2} = \frac{V''_{R2}}{R_2} = -2,5\ mA$$

(compreender o sinal negativo nestes valores!)

$$V''_{R4} = \frac{R_4}{R_2 + R_3 + R_4} V_A = 1,25\ V$$

$$I''_{R4} = \frac{V''_{R4}}{R_4} = 2,5\ mA$$

$$V_{R2} = V'_{R2} + V''_{R2} = 0,5 + (-2,5) = -2\ V$$

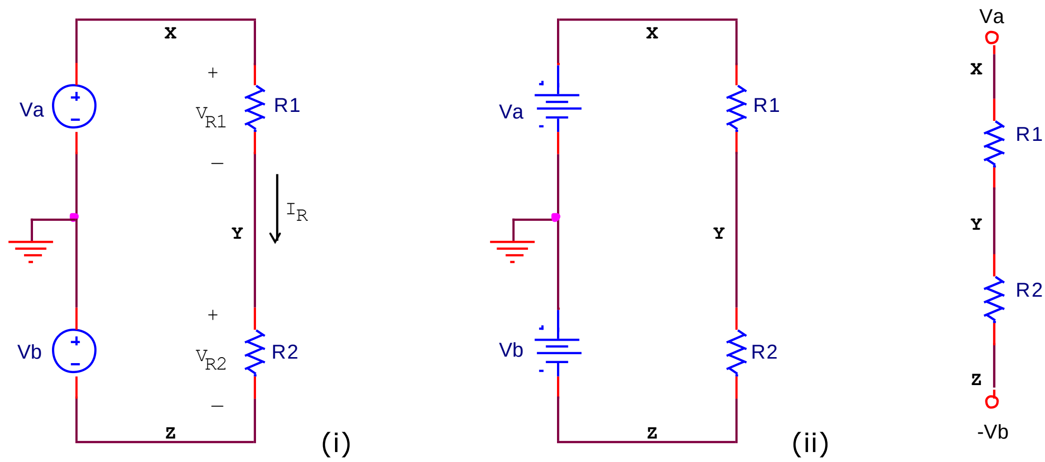
$$V_{R4} = V'_{R4} + V''_{R4} = 0,25 + 1,25 = 1,5\ V$$

$$I_{R2} = I'_{R2} + I''_{R2} = 0,5mA + (-2,5mA) = -2\ mA$$

$$I_{R4} = I'_{R4} + I''_{R4} = 0,5mA + 2,5mA = 3\ mA.$$

[Seleccionou-se (escolheu-se) sentidos diferentes para as correntes, na resolução pelos dois métodos, propositadamente de modo a comparar as resoluções e verificar que os resultados são iguais.]

8. Tente compreender o circuito seguinte com fontes de alimentação simétricas e um divisor de tensão. Considere os nós X, Y, Z e a massa indicados nos circuitos da figura. Os três esquemas (i), (ii) e (iii) representam o mesmo circuito com fontes DC.



(i) (ii) (iii)

a) Calcule as tensões nos nós X e Z, ou seja a diferença de tensão para a massa.

R.: $V_X = V_a$; $V_Z = -V_b$.

b) Deduza expressões para as quedas de tensão nas resistências R_1 e R_2.

R.: Equação de Kirchhoff das tensões na única malha: $-V_a + V_{R1} + V_{R2} - V_b = 0$

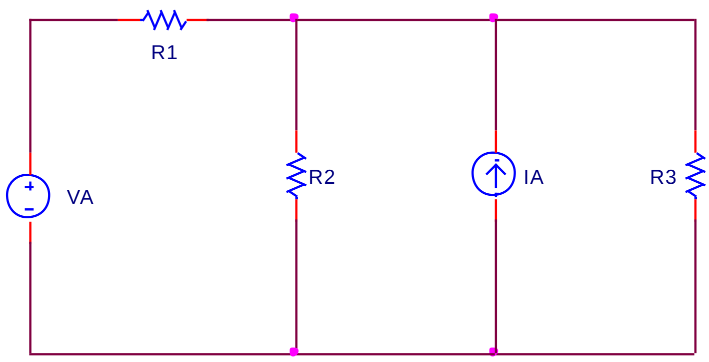
$V_{R1} = R_1 I_R$; $V_{R2} = R_2 I_R$ $I_R = \frac{(V_a+V_b)}{R_1+R_2}$

$V_{R1} = \frac{R_1}{R_1+R_2}(V_a + V_b) = V_X - V_Y = V_{XY}$; $V_{R2} = \frac{R_2}{R_1+R_2}(V_a + V_b) = V_Y - V_Z = V_{YZ}$

c) Deduza uma expressão para a tensão no nó Y.

R.: $V_Y = V_a - V_{R1} = V_a - \frac{R_1}{R_1+R_2}(V_a + V_b)$ $= V_{R2} + V_Z = \frac{R_2}{R_1+R_2}(V_a + V_b) + (-V_b)$

9. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão DC V_A=10 V, uma fonte de corrente DC I_A=2 mA e três resistências R_1=1 kΩ, R_2=2 kΩ e R_3=1 kΩ.

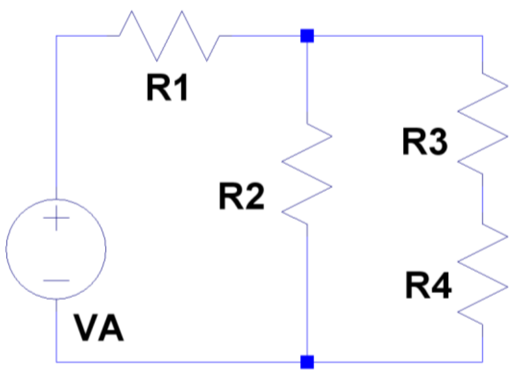


Calcule o valor da queda de tensão na resistência R_2 e o valor da corrente que a percorre.

Resolva o exercício recorrendo a três métodos: transformação de fontes; princípio da sobreposição; e unicamente recorrendo às equações de malhas e nós das leis de kirchhoff e à lei de Ohm.

[Princípio da sobreposição na secção D. Transformação de fontes na secção C.]

Pode associar as resistências R_2 e R_3 em paralelo? Em caso afirmativo e com o circuito simplificado pode resolver o exercício, para o cálculo de V_{R2} e I_{R2}? Justifique.



10. No circuito, considere que se mediram os valores seguintes:

Ohmímetro:

$R_1 = 2\,k\Omega$, $R_2 = 4\,k\Omega$, $R_3 = 4\,k\Omega$, $R_4 = 8\,k\Omega$.

Voltímetro:

$V_A = 8\,V$, $V_{R1} = 3{,}2\,V$, $V_{R2} = 4{,}8\,V$, $V_{R3} = 1{,}6\,V$, $V_{R4} = 3{,}2\,V$.

Amperímetro:

$I_{VA} = 1{,}6\,mA$, $I_{R1} = 1{,}6\,mA$, $I_{R2} = 1{,}2\,mA$, $I_{R3} = 0{,}4\,mA$, $I_{R4} = 0{,}4\,mA$.

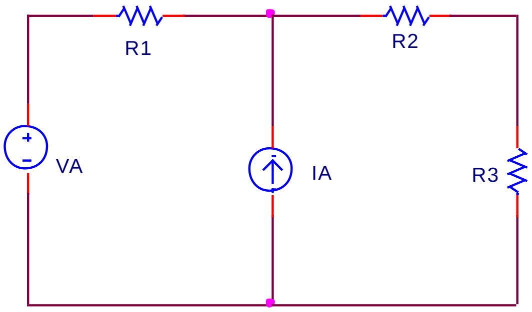
Escolha 5 valores da lista acima.

Deduza os valores restantes a partir daqueles 5 valores iniciais.

Repita com 5 novos valores iniciais.

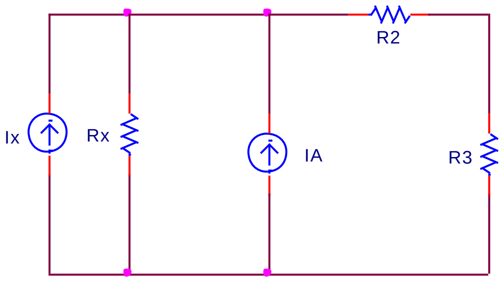
C. Transformação de fontes

1. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão V_A=12 V, uma fonte de corrente I_A=1 mA e três resistências R_1=2 kΩ, R_2=2 kΩ e R_3=3 kΩ.



Calcule o valor da queda de tensão na resistência R_3 e o valor da corrente que a percorre.

R.:



(i)

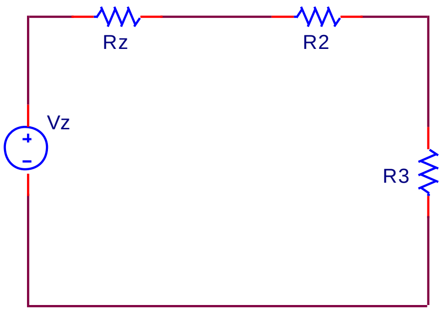
Por transformação de fontes podemos utilizar o circuito (i), substituindo a fonte V_A em série com a resistência R_1 pela fonte $I_x = \frac{V_A}{R_1} = 6\,mA$ em paralelo com a resistência $R_x = R_1 = 2\,k\Omega$.

$$I_{R3} = \frac{R_x}{R_x + R_2 + R_3}(I_x + I_A) = 2\,mA$$

(divisor de corrente);

$V_{R3} = R_3 I_{R3} = 6\,V$ (lei de Ohm).

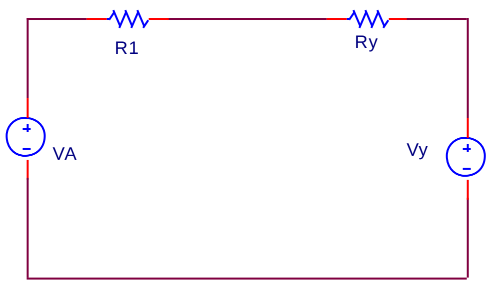
Informação adicional: três notas.



Querendo obter um circuito de malha única a partir do circuito (i), podemos substituir a fonte $I_x + I_A$ em paralelo com a resistência R_x por uma fonte $V_z = (I_x + I_A)R_x = 14\,V$ em série com uma resistência $R_z = R_x = 2\,k\Omega$, conforme esquema à esquerda.

Neste caso, $V_{R3} = \frac{R_3}{R_3+R_z+R_2} V_z = 6\,V$

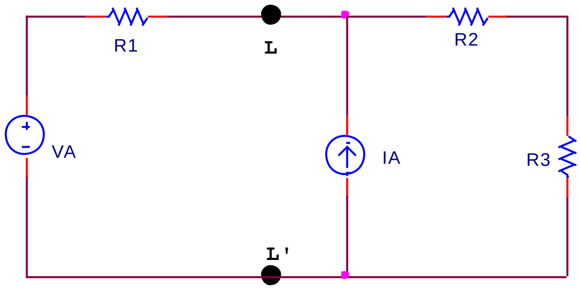
e $I_{R3} = \frac{V_z}{R_z+R_2+R_3} = 2\,mA$.



(ii)

Ao utilizar o circuito (ii), substituindo a fonte I_A em paralelo com a resistência $R_2 + R_3$ pela fonte $V_y = (R_2 + R_3)I_A = 5\,V$ em série com a resistência $R_y = R_2 + R_3 = 5\,k\Omega$, perdemos o acesso à resistência R_3. Não é solução para este exercício.

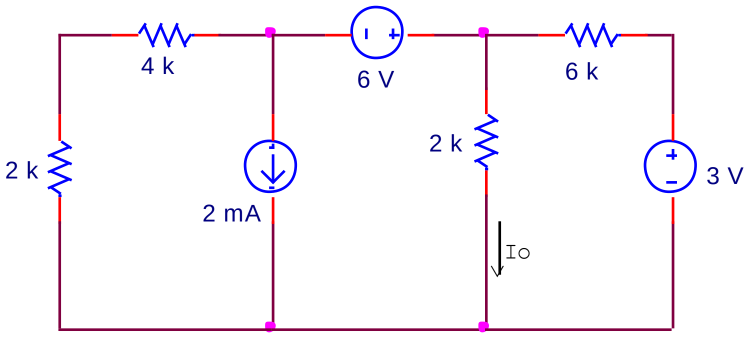
Repete-se de seguida o circuito inicial com a identificação de dois terminais L-L'.
Podemos considerar o circuito (i) por aplicação do teorema de Norton à esquerda dos terminais L-L'. Podemos ainda considerar o circuito (ii) por aplicação do teorema de Thévenin à direita dos terminais L-L'.



Os circuitos de Thévenin e Norton são equivalentes por transformação de fontes, ou a transformação de fontes pode ser deduzida pelos teoremas referidos.
[Teoremas de Thévenin e Norton na secção E.]

Repita o exercício utilizando um sistema de duas equações de Kirchhoff.
Repita ainda o exercício, utilizando o princípio da sobreposição.
[Princípio da sobreposição na secção D.]

2. No circuito seguinte, utilize transformação de fontes para calcular o valor da corrente I_O.

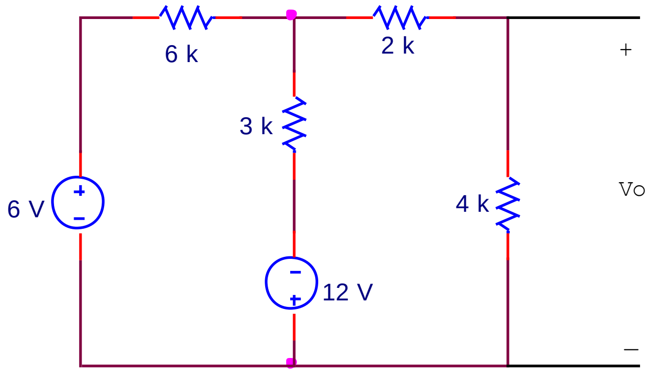


R.: I_O=-0,3 mA.

D. Princípio da sobreposição

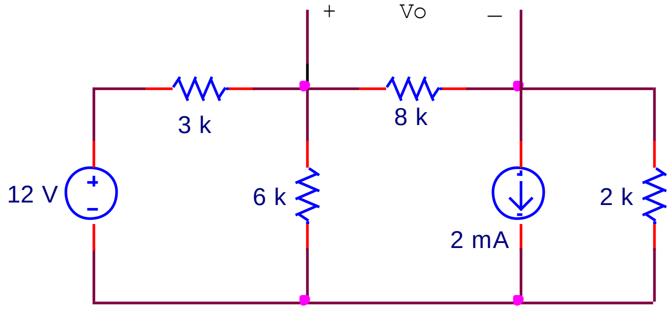
Nota. Pode resolver alguns circuitos da secção B, utilizando o princípio da sobreposição, como alternativa à utilização exclusiva das leis de Kirchhoff. Verificar a resolução de alguns desses exercícios.

1. No circuito seguinte, calcule o valor da tensão V_O, recorrendo ao princípio da sobreposição.



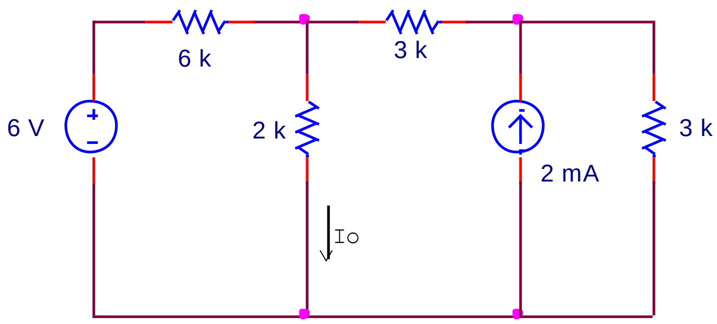
R.: $V_O=1+(-4)=-3$ V.

2. No circuito seguinte, calcule o valor da tensão V_O, recorrendo ao princípio da sobreposição.



R.: $V_O=16/3+8/3=8$ V.

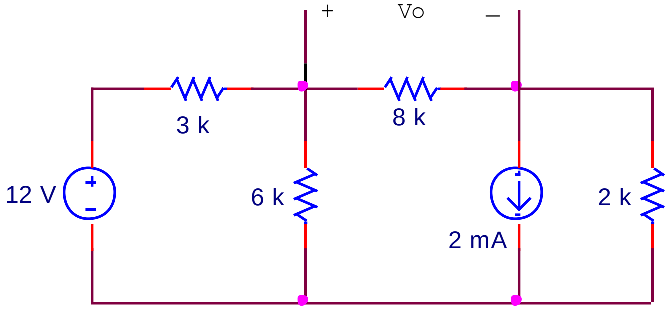
3. No circuito seguinte, calcule o valor da corrente I_O, recorrendo ao princípio da sobreposição.



R.: $I_O=1,2$ mA.

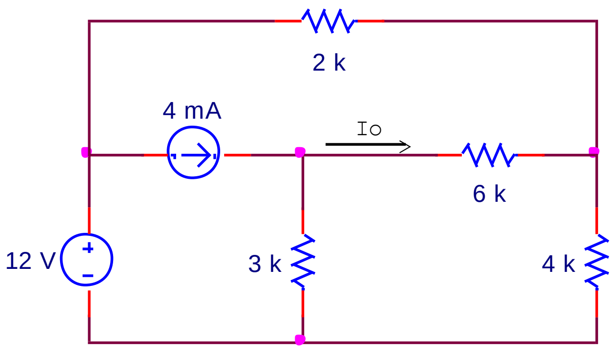
E. Teoremas de Thévenin e Norton

1. Calcule a tensão V_O no circuito, utilizando o teorema de Thévenin.



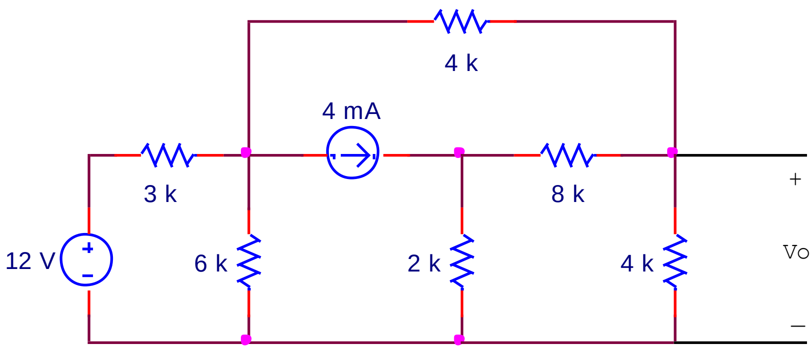
R.: V_{OC}=12 V; R_{Th}=4 kΩ; V_O=8 V (R_L=8 kΩ).

2. Calcule a corrente I_O no circuito, utilizando o teorema de Thévenin.



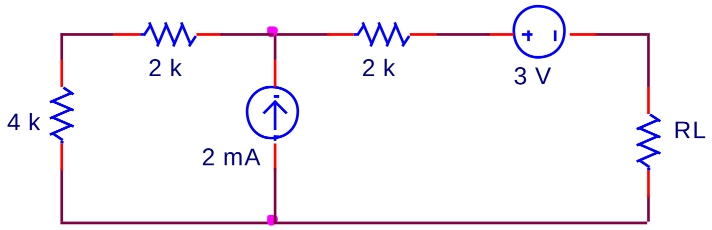
R.: V_{OC}=4 V; R_{Th}=4,33 kΩ; I_O=387 μA (R_L=6 kΩ).

3. Calcule a tensão V_O no circuito, utilizando uma combinação de teorema de Thévenin e sobreposição.



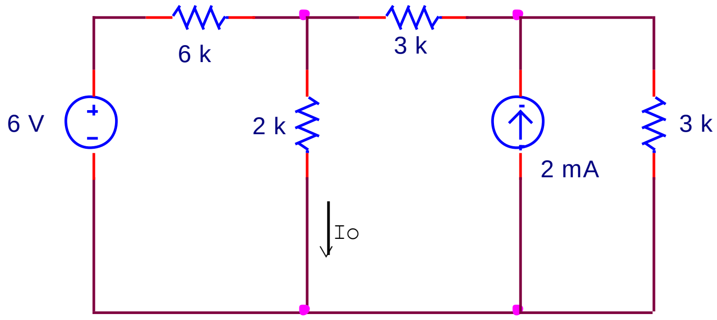
R.: V_{OC}=5-2=3 V; R_{Th}=3,75 kΩ; V_O=1,55 V (R_L=4 kΩ).

4. No circuito da figura, calcule o valor de R_L para máxima transferência de potência. Calcule esse valor de potência.



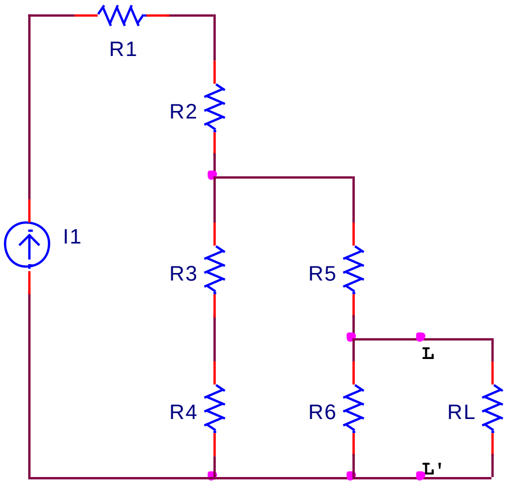
R.: V_{OC}=9 V; R_{Th}=8 kΩ; R_L=8 kΩ; P_L=2,53 mW.

5. Calcule a corrente I_O no circuito, utilizando o teorema de Norton.



R.: I_{SC}=2 mA; R_{Th}=3 kΩ; I_O=1,2 mA (R_L=2 kΩ).

6. O circuito seguinte contém uma fonte de corrente I_1=5 mA e seis resistências R_1=3 kΩ, R_2=1 kΩ, R_3=3 kΩ, R_4=1 kΩ, R_5=1 kΩ e R_6=5 kΩ.

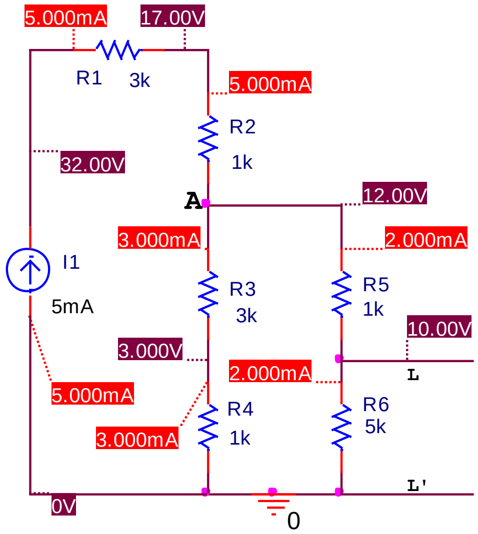


a) Calcule o equivalente de Thévenin do circuito, à esquerda dos terminais L-L'.

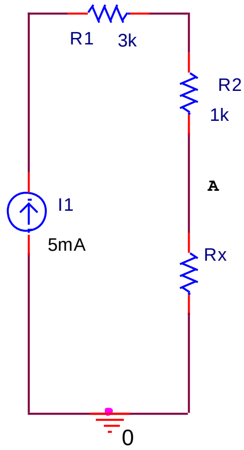
b) Calcule a potência dissipada na resistência de carga R_L=10 kΩ.

c) Calcule o valor da resistência de carga R_L para a qual ocorre a máxima transferência de potência. Indique o valor da potência fornecida à carga nessa situação.

R.: <u>Tensão de Thévenin</u>, V_{Th}=10 V (simulação):



Retirada a carga aos terminais L-L', cálculo da tensão em circuito-aberto, V_{OC}.



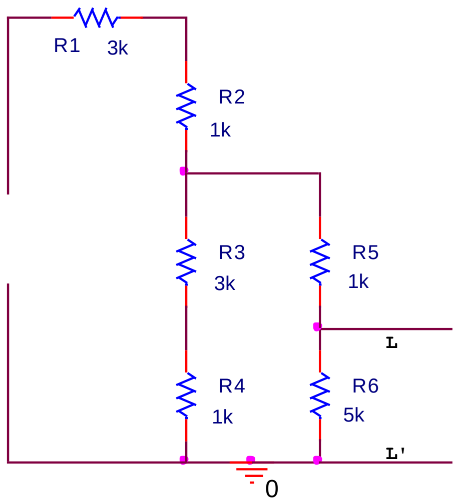
Simplificação do circuito:

$R_x = (R_3 + R_4)//(R_5 + R_6) = 2{,}4\ k\Omega$ (associação de resistências)

$V_A = V_{Rx} = R_x I_1 = 12\ V$ (lei de Ohm)

$V_{Th} = V_{OC} = V_L = \frac{R_6}{R_6+R_5} V_A = 10\ V$ (divisor de tensão)

Cálculo da resistência de Thévenin, R_{Th}.

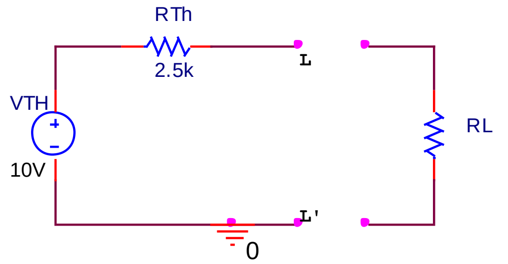


Anuladas as fontes independentes: fontes de corrente em circuito aberto e fontes de tensão em curto-circuito.

$R_{Th} = R_6//(R_5 + R_3 + R_4) = 2{,}5\ k\Omega$.

Nota. Considere o circuito da esquerda.
Se colocar entre os terminais L-L' uma fonte de tensão de valor $1\ V$, a corrente fornecida por essa fonte será $1\ V/R_{Th} = 0{,}4\ mA$.
Se colocar entre os terminais L-L' uma fonte de corrente de valor $1\ mA$, a tensão aos seus terminais será $R_{Th} \times 1\ mA = 2{,}5\ V$.
Se colocar entre os terminais L-L' uma fonte de corrente de valor $0{,}4\ mA$, a tensão aos seus terminais será $R_{Th} \times 0{,}4\ mA = 1\ V$.

Circuito equivalente de Thévenin, V_{TH} e R_{TH}:



Potência em R_L=10 kΩ, P_L=6,4 mW.

$P_{RL} = V_{RL} I_{RL} = 6{,}4\ mW$

$I_{RL} = \frac{V_{Th}}{R_{Th}+R_L} = 0{,}8\ mA$

$V_L = R_L I_{RL} = 8\ V.$

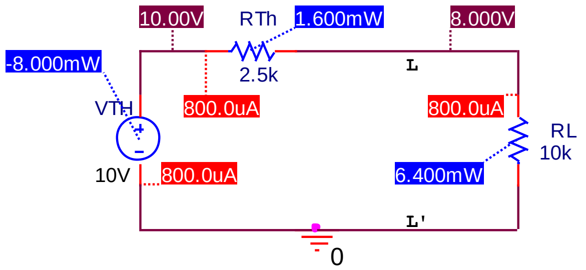
Potência em R_L=R_{Th}=2,5 kΩ, P_L=10 mW.

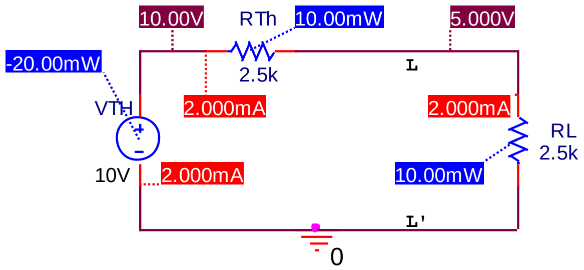
$P_{RL} = V_{RL} I_{RL} = 10\ mW$

$I_{RL} = \frac{V_{Th}}{R_{Th}+R_L} = 2\ mA$

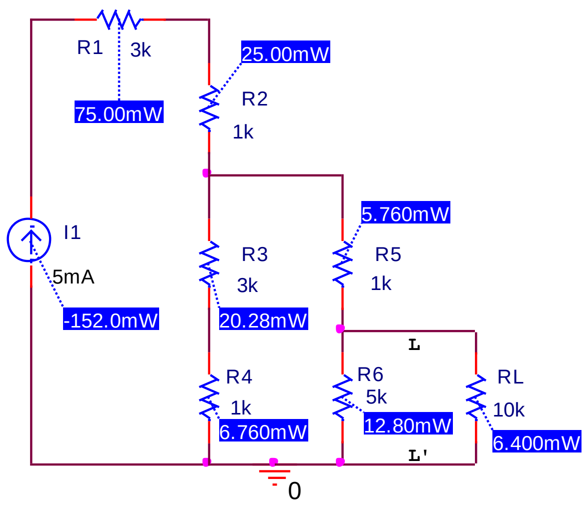
$V_L = R_L I_{RL} = 5\ V.$

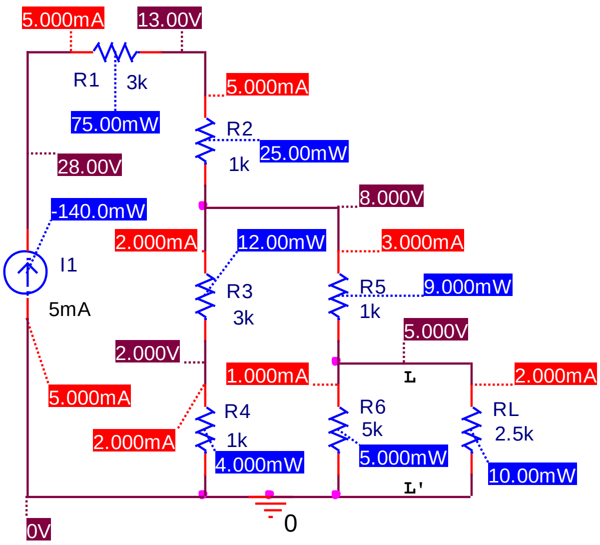
Simulações:



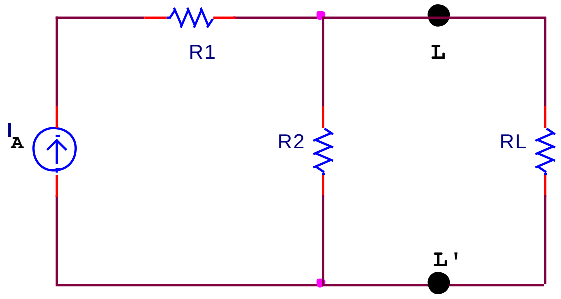


Sem "simplificação" de equivalente de Thévenin (simulação):





7. O circuito seguinte contém uma fonte de corrente I_A=2 mA e três resistências R_1=1 kΩ, R_2=3 kΩ e R_L uma resistência de carga.



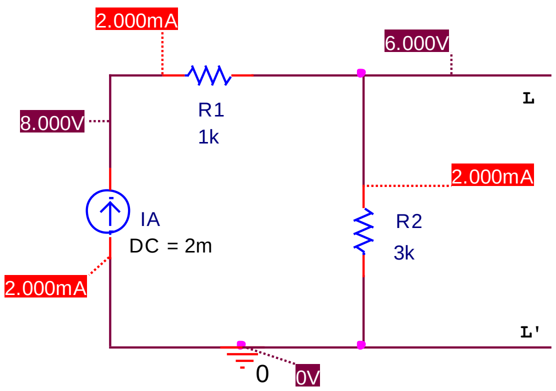
a. Calcule o equivalente de Thévenin do circuito à esquerda dos terminais L-L'.

b. Verifique, calculando a tensão e a corrente numa resistência R_L=1 kΩ, a equivalência entre o circuito original e o circuito com o equivalente de Thévenin.

c. Considerando R_L com um valor que permite máxima transferência de potência, calcule a potência fornecida à carga.

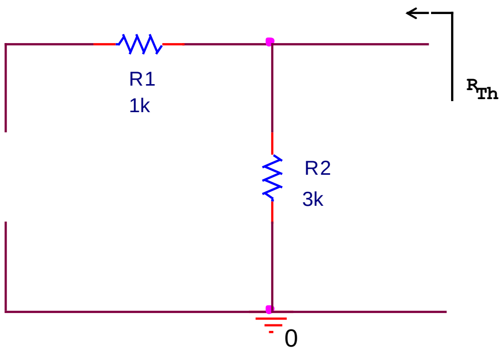
R.: (a)

Equivalente de Thévenin, retirada a resistência de carga.



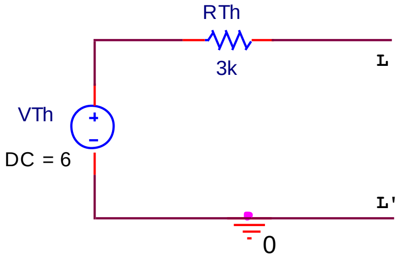
Cálculo da tensão em circuito aberto. $V_{Th} = V_{oc} = V_{LL'}$.

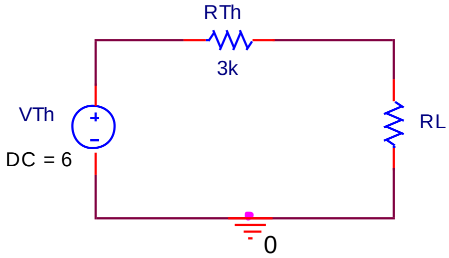
$V_{Th} = R_2 I_A = 6\,V$



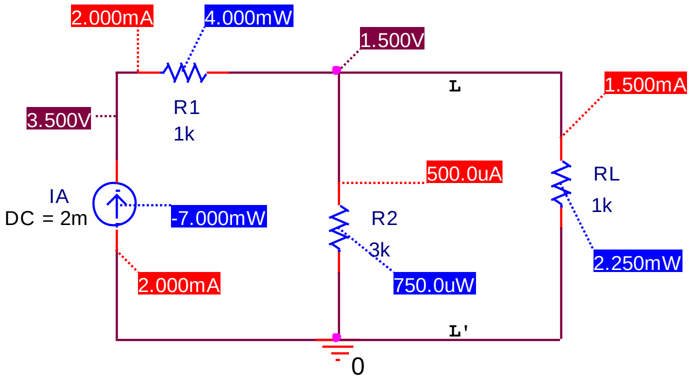
Cálculo da resistência de Thévenin, anulando todas as fontes independentes.

$R_{Th} = R_2 = 3\,k\Omega$





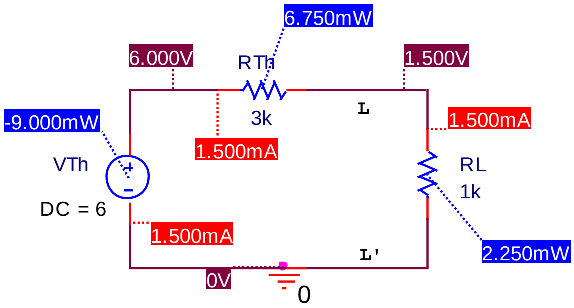
R.:(b)



Circuito original.

$$I_{RL} = \frac{R_2}{R_2 + R_L} I_A = 1{,}5\ mA$$

$$V_{RL} = R_L I_{RL} = 1{,}5\ V.$$



Circuito com equivalente de Thévenin.

$$V_{RL} = \frac{R_L}{R_L + R_{Th}} V_{Th} = 1{,}5\ V$$

$$I_{RL} = \frac{V_{RL}}{R_L} = 1{,}5\ mA.$$

Verificam-se valores iguais nos dois casos, para tensão, corrente e potência na carga R_L.

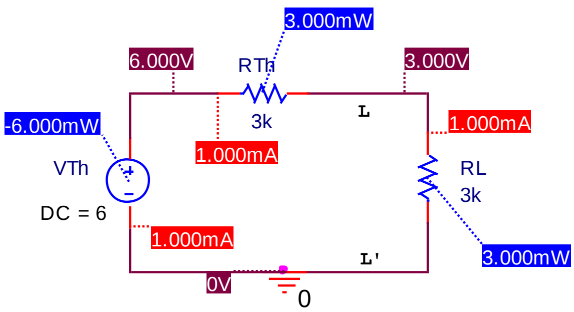
R.: (c)

Máxima transferência de potência ocorre quando $R_L = R_{Th}$.

$R_L = R_{Th} = 3\ k\Omega.$

$V_{RL} = \frac{1}{2} V_{Th} = 3\ V$ $\qquad I_{RL} = \frac{V_{RL}}{R_L} = 1\ mA$

$P_{RL} = V_{RL} I_{RL} = \frac{V_{RL}^2}{R_L} = R_L I_{RL}^2 = 3\ mW.$



F. Circuitos RC

1. Circuitos RC com fontes constantes.

Procedimento válido para circuitos de 1ª ordem com fontes constantes (DC) e interruptores ou fontes constantes por troços (exemplo onda quadrada).

i. Solução para a variável a calcular: $x(t) = K_1 + K_2 e^{-t/\tau}$.
Variável: corrente ou tensão.

ii. Circuito original em regime estacionário antes de mudar o interruptor.
Desenhar o circuito anterior com o condensador substituído por um circuito aberto.
Calcular a tensão no condensador, $v_C(0^-)$.

iii. Energia no condensador não pode variar instantaneamente.
Desenhar o circuito válido apenas para $t = 0^+$.
Interruptor na nova posição.
Condensador substituído por uma fonte de tensão de valor $v_C(0^+)$=$v_C(0^-)$.
Calcular valor inicial da variável, $x(0^+)$.

iv. Assumindo regime estacionário ($t = 5\tau$).
Desenhar circuito equivalente.
Condensador substituído por um circuito aberto.
Calcular $x(t)|_{t>5\tau} = x(\infty)$.

v. Todas as tensões e correntes no circuito têm constante de tempo igual.
Pode obter-se a constante de tempo, reduzindo todo o circuito a um circuito série simples composto por uma fonte de tensão, uma resistência e um condensador, construindo o equivalente de Thévenin aos terminais do condensador.
Circuito equivalente de Thévenin (V_{Th}, R_{Th}) obtido olhando para o circuito a partir dos terminais do condensador.
Constante de tempo: $\tau = R_{Th}C$.

vi. Com os resultados obtidos em iii, iv e v …

$x(0^+) = K_1 + K_2$

$x(\infty) = K_1$

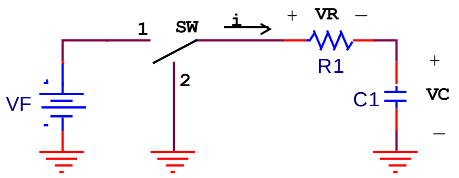
$K_1 = x(\infty)$

$K_2 = x(0^+) - x(\infty)$

$x(t) = x(\infty) + [x(0^+) - x(\infty)]e^{-t/\tau}$

Compare com a equação do formulário: $\boldsymbol{v_c(t) = V_{Cf} + \left(V_{Ci} - V_{Cf}\right)e^{-t/\tau}}$

2. O circuito RC seguinte tem uma fonte de tensão v_F=10 V, uma resistência R_1=1 kΩ e um condensador C_1=1 μF. Considere o condensador com tensão inicial nula V_{Ci}=0 V.



a) Considere que no instante t_0=0, comuta o interruptor SW para a posição 1. Calcule os regimes forçado e livre para a tensão no condensador, $v_C(t)=v_{Cf}(t)+v_{Cl}(t)$ para $t>t_0$. Calcule a tensão na resistência $v_R(t)$ e a corrente no circuito $i(t)$. Esboce os sinais obtidos.

R.: $v_c(t) = V_F\left(1 - e^{-t/RC}\right)$; $v_R(t) = V_F e^{-t/RC}$; $i(t) = \frac{V_F}{R} e^{-t/RC}$; $\tau = R_1 C_1 = 1$ ms.

b) Considere o condensador inicialmente descarregado e o processo de carga levado até ao fim. A energia total fornecida pela fonte V_F é $W_F = C_1 V_F^2$. A energia armazenada no condensador C_1 é $W_c = \frac{1}{2} C_1 V_F^2$ e a energia dissipada na resistência R_1 é $W_R = W_F - W_c = \frac{1}{2} C_1 V_F^2$. Calcule estes valores de energia.

R.: $W_F = C_1 V_F^2 = 100$ μJ.

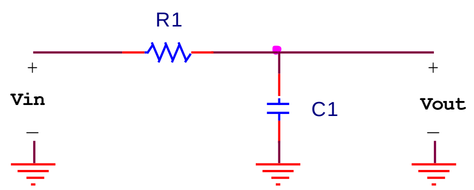
c) A partir da situação da alínea a), t_1 é um instante de tempo em que o circuito atingiu o regime estacionário, $t_1=t_0+\Delta t$ com $\Delta t>5\tau=5RC$. Considere que no instante t_1, comuta o interruptor SW para a posição 2. Calcule os sinais $v_C(t)=v_{Cf}(t)+v_{Cl}(t)$, $v_R(t)$ e $i(t)$ para $t>t_1$. Esboce os sinais obtidos. Calcule o valor de energia dissipada na resistência.

R.: $v_c(t) = V_F e^{-t/RC}$; $v_R(t) = -V_F e^{-t/RC}$; $i(t) = -\frac{V_F}{R} e^{-t/RC}$; $\tau = R_1 C_1 = 1$ ms; 50 μJ.

d) Na situação da alínea a), determine uma expressão para a tensão do condensador $v_C(t)$, regimes forçado e livre (regime transitório), com tensão inicial V_{Ci} não nula.

R.: $v_c(t) = V_F + (V_{Ci} - V_F)e^{-t/RC}$; $v_R(t) = (V_F - V_{Ci})e^{-t/RC}$; $i(t) = \frac{V_F - V_{Ci}}{R} e^{-t/RC}$.

3. O circuito RC seguinte tem uma fonte de tensão $v_{in}(t)$ onda quadrada de valores limite 5 V e -5 V, uma resistência R_1=1 kΩ e um condensador C_1=1 μF. Considere o condensador inicialmente descarregado, tensão inicial nula V_{Ci}=0 V.



Esboce o sinal de tensão no condensador $v_{out}(t)=v_C(t)$ para

a) V_{in} com uma frequência 100 Hz.

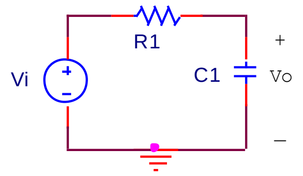
b) V_{in} com uma frequência 500 Hz.

4. Os tempos de atraso e de propagação associados a circuitos RC são importantes para o cálculo das limitações de circuitos digitais de uma determinada tecnologia. Determine expressões para aqueles tempos em função da constante de tempo τ=RC.

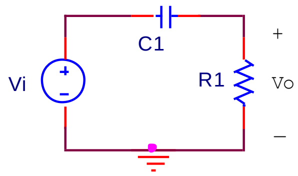
Define-se tempo de atraso $t_{d,0\text{-}50\%}$ como o tempo necessário para atingir 50% da excursão do sinal. Define-se tempo de subida $t_{r,10\text{-}90\%}$ como o tempo decorrido para o sinal passar de 10% a 90% da excursão total. De modo semelhante se define tempo de descida t_f.

R.: $t_d = 0{,}7RC$; $t_r = t_f = 2{,}2RC$.

5. Considerando que a impedância de um condensador tem a expressão $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ com $\omega = 2\pi f$, determine as expressões do módulo do ganho de tensão e da fase para os circuitos filtros RC passa-baixo e passa-alto que se apresentam em baixo. Calcule os seus valores para a frequência de corte $f_c = 1/(2\pi RC)$. Verifique o andamento das curvas de $|v_o/v_i|$ e $\emptyset$, em função da frequência, para valores $f \gg f_c$ e $f \ll f_c$. Apresente as expressões para o cálculo dos sinais $v_{C1}(t)$ e $v_{R1}(t)$, a partir de um sinal sinusoidal à entrada $v_i(t)$.



Passa-baixo



Passa-alto

R.:

Ganho de tensão, a partir do divisor de tensão:

$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_{C1}}{Z_{C1}+Z_{R1}}$ para o circuito da esquerda e $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_{R1}}{Z_{R1}+Z_{C1}}$ par o circuito da direita.

Passa-baixo, $v_o(t) = v_{C1}(t)$: $|v_o/v_i| = 1/\sqrt{1+(f/f_c)^2}$ $\emptyset = -arctan(f/f_c)$

f=fc $\rightarrow$ =0,707=-3 dB =-45°

Passa-alto, $v_o(t) = v_{R1}(t)$: $|v_o/v_i| = 1/\sqrt{1+(f_c/f)^2}$ $\emptyset = arctan(f_c/f)$

f=fc $\rightarrow$ =0,707=-3 dB =45°

Com $v_i(t) = V_{i,dc} + V_{i,amp}\sin(2\pi f t)\ V$, em ambos os circuitos:

$$v_{C1}(t) = V_{i,dc} + V_{i,amp}.\frac{1}{\sqrt{1+(f/f_c)^2}}.\sin\big(2\pi f t - arctan(f/f_c)\big)\ V$$

$$v_{R1}(t) = 0 + V_{i,amp}.\frac{1}{\sqrt{1+(f_c/f)^2}}.\sin\big(2\pi f t + arctan(f_c/f)\big)\ V$$

$|v_o/v_i|$ afecta a amplitude e $\emptyset$ é a fase:

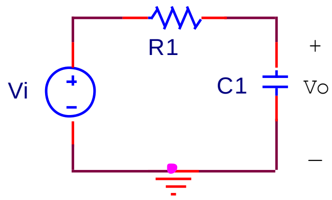
$V_{C1,amp} = V_{i,amp}.\frac{1}{\sqrt{1+(f/f_c)^2}}$ e $V_{R1,amp} = V_{i,amp}.\frac{1}{\sqrt{1+(f_c/f)^2}}$

$\emptyset_{vC1} = phase\left(\frac{v_{C1}}{v_i}\right) \rightarrow$ expressão de $\emptyset$ no passa baixo acima

$\emptyset_{vR1} = phase\left(\frac{v_{R1}}{v_i}\right) \rightarrow$ expressão de $\emptyset$ no passa alto acima

A componente contínua obtém-se por análise separada de fontes constantes, com $V_{i.dc}$.

6. O circuito é composto por uma fonte de sinal $v_i(t)$, uma resistência R_1=1 kΩ e um condensador C_1=1 μF. $v_i(t)$ é uma onda quadrada de frequência 500 Hz e valores extremos 0 V e +5 V.

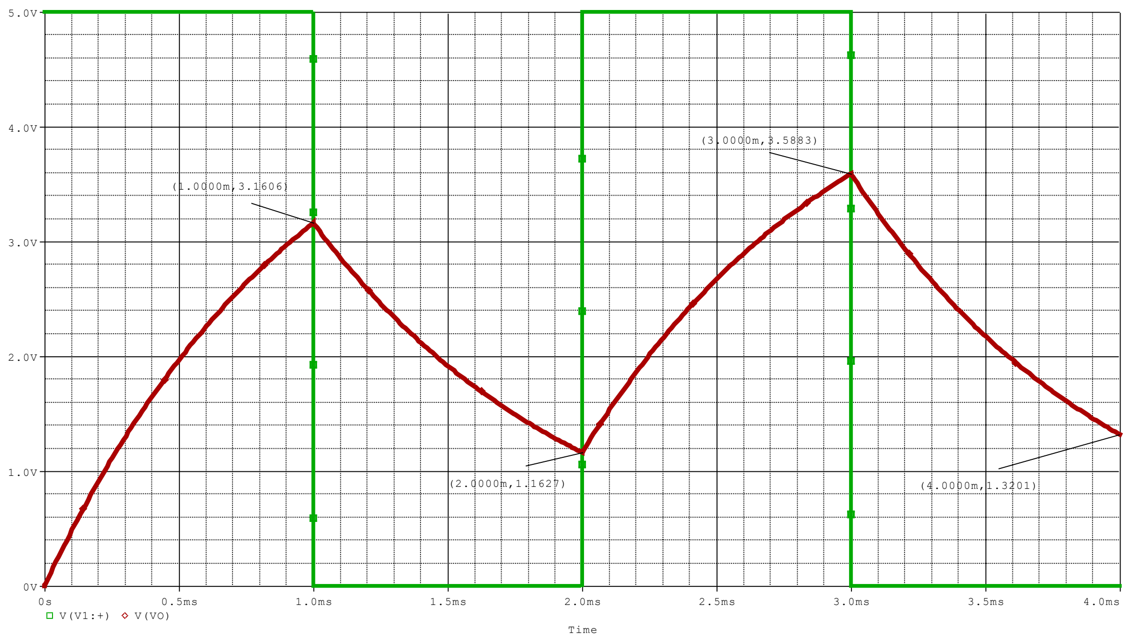


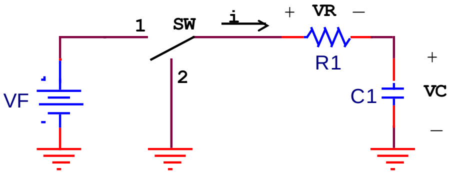
Esboce o sinal de tensão aos terminais do condensador $v_o(t)=v_C(t)$, a partir do instante de tempo t=0 e para dois períodos do sinal $v_i(t)$, considerando o condensador com carga inicial nula em t=0, $v_C(0)=V_{Ci}$=0 V.
Considere que $v_i(t)$ transita de 0 V para +5 V em t=0. No gráfico, indique os valores de $v_o(t)$ no extremo de cada semi-período.

R.: Constante de tempo $\tau = RC = 1\,ms$. $v_c(t) = V_F + (V_{Ci} - V_F)e^{-t/\tau}$ em cada semi-período, com V_{Ci} o valor de tensão inicial em cada semi-período ($t = 0$), e V_F o valor de tensão em $t = \infty$, ou seja, se decorre-se um tempo $t > 5\tau$ e alcançado o regime estacionário.
Período do sinal v_i é $T = 1/500 = 2\,ms$ e $T/2 = 1\,ms$.

Assim: $t_0 = 0\,s$	$v_c(t) = 0\,V$
$0 \leq t \leq 1\,m\,s$	$v_c(t) = 5 + (0 - 5)e^{-(t-t_0)/\tau}$
$t_1 = 1\,ms$	$v_c(t) = 3{,}161\,V$
$1\,ms \leq t \leq 2\,m\,s$	$v_c(t) = 0 + (3{,}161 - 0)e^{-(t-t_1)/\tau}$
$t_2 = 2\,ms$	$v_c(t) = 1{,}163\,V$
$2\,ms \leq t \leq 3\,m\,s$	$v_c(t) = 5 + (1{,}163 - 5)e^{-(t-t_2)/\tau}$
$t_3 = 3\,ms$	$v_c(t) = 3{,}588\,V$
$3\,ms \leq t \leq 4\,m\,s$	$v_c(t) = 0 + (3{,}588 - 0)e^{-(t-t_3)/\tau}$
$t_4 = 4\,ms$	$v_c(t) = 1{,}320\,V$.

Cada período de *carga* e *descarga* do condensador ocorre num intervalo de tempo $T/2 = 1\,ms$. O valor inicial V_{Ci} em cada intervalo é o valor final do intervalo anterior. Em cada intervalo o condensador tenderá a alcançar a tensão v_i de entrada 5 V ou 0 V. Assim a exponencial das expressões anteriores toma sempre o valor $e^{-(T/2)/\tau} = e^{-1}$.
Resultado de simulação:

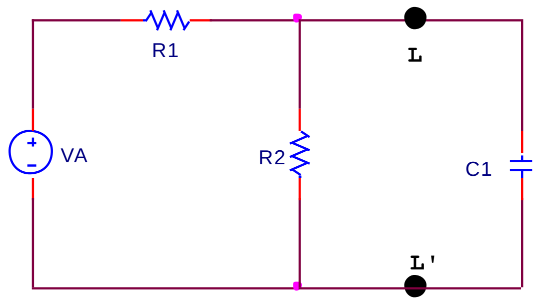




Podemos pensar na análise do circuito, como se existisse um interruptor SW que comuta o circuito RC, ligando-o a uma fonte de tensão $V_F = 5\,V$ ou à massa (ou a uma fonte de tensão $V_F = 0\,V$), alternadamente em cada semi-período e conforme o esquema.

Ler F.1. Repita o exercício com um sinal v_i de valores máximo 2,5 V e mínimo -2,5 V.

7. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão DC V_A=10 V, duas resistências R_1=1 kΩ e R_2=3 kΩ e um condensador C_1=1 μF.

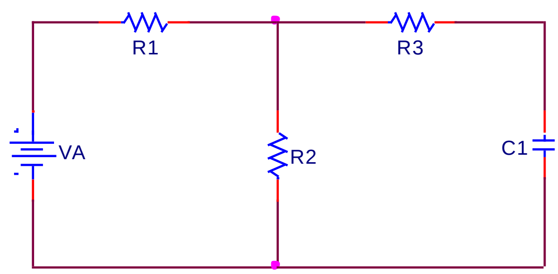


a. Calcule o equivalente de Thévenin do circuito à esquerda dos terminais L-L'.

b. Considere agora o condensador C_1 ligado ao circuito. Calcule o valor da constante de tempo associada ao condensador C_1.

c. Qual o valor de tensão que o condensador apresenta em regime estacionário? Qual o tempo necessário aproximado para atingir esse valor de tensão?

8. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão DC V_A=5 V, três resistências R_1=R_2=R_3=1 kΩ e um condensador C_1=1 nF de carga inicial nula.



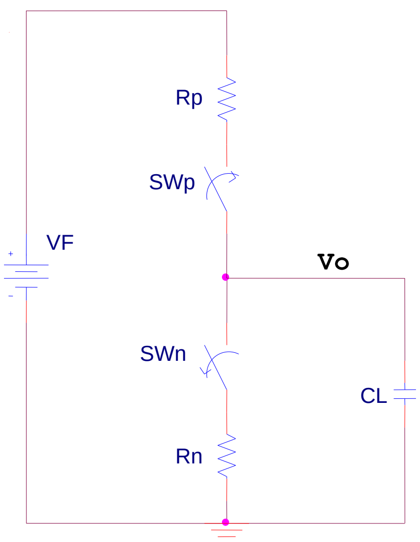
a. Calcule o valor da constante de tempo associada ao condensador C_1.

b. Qual o valor de tensão que o condensador apresenta em regime estacionário? Qual o tempo necessário aproximado para atingir esse valor de tensão?

Sugestão: neste exercício utilize o equivalente de Thévenin do circuito visto a partir dos terminais do condensador.

9. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão DC V_F=5 V, duas resistências R_n=1 kΩ e R_p=2 kΩ, um condensador C_L=1 nF e dois interruptores SW_n e SW_p. Considere que os dois interruptores são actuados em simultâneo e em oposição, ou seja quando um fecha o outro abre no mesmo instante de tempo.

Nota: considere que a frequência de comutação dos interruptores é calculada com o intervalo de tempo entre duas alterações consecutivas ao estado dos interruptores.

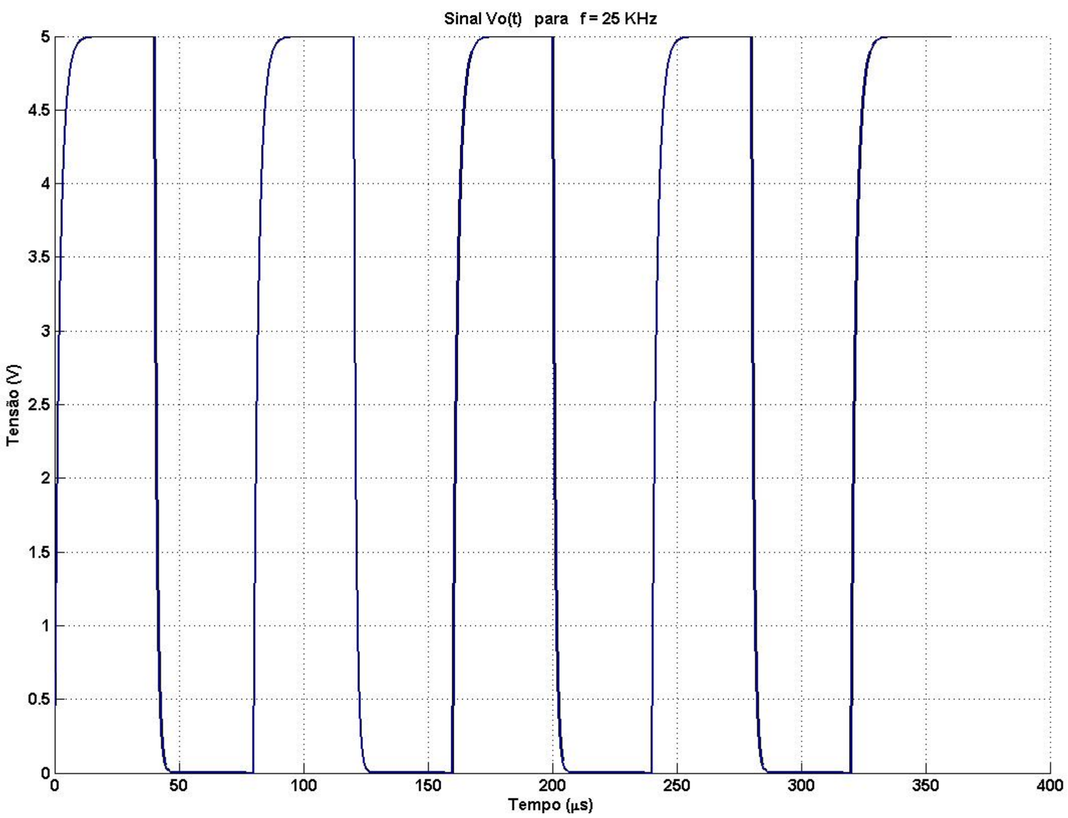


a. Considerando que os interruptores são actuados com uma frequência de 25 kHz, apresente um esboço aproximado de dois períodos do sinal periódico $v_O(t)$.
Repita para uma frequência de 500 kHz.

b. Considerando que o sinal $v_O(t)$ tem que chegar a valores próximos de 5 V (V_F) e 0 V (massa) nos períodos de carga e descarga respectivamente do condensador C_L, calcule a frequência máxima a que os interruptores podem operar.
Se a capacidade C_L aumentar, o valor daquela frequência (máxima) aumenta ou diminui? (*não calcule novos valores*)

R.: **a.**

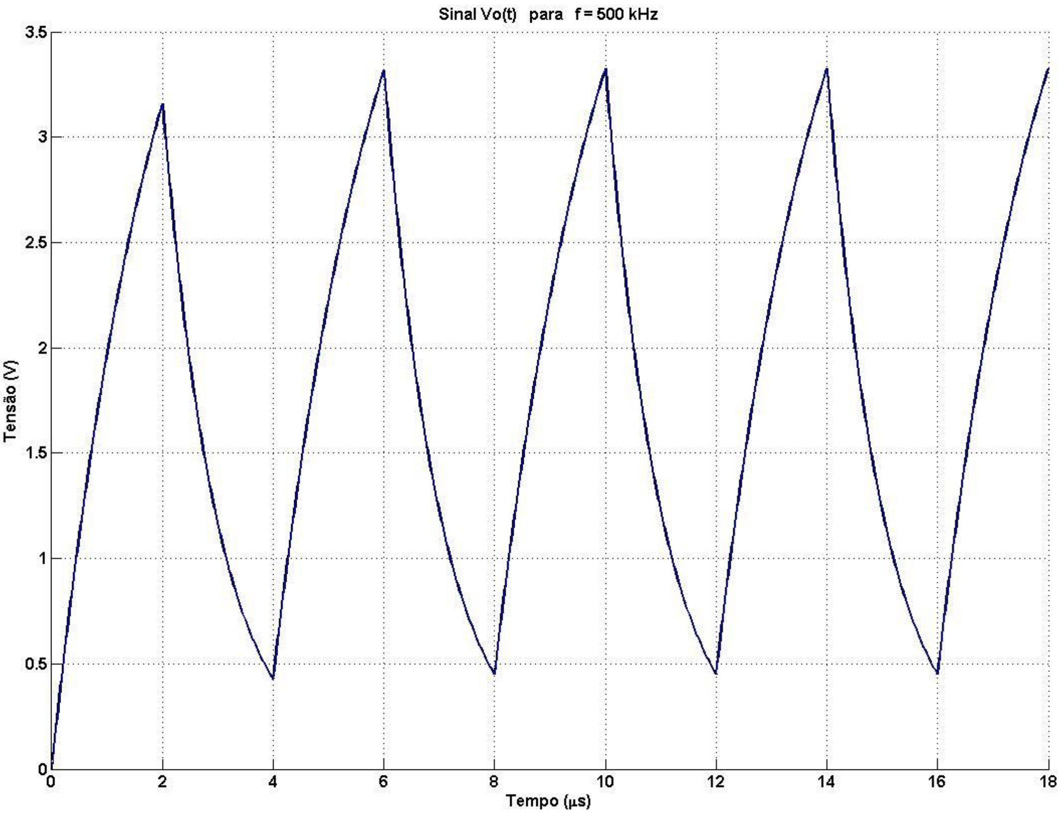
A figura seguinte apresenta o sinal $V_o(t)$, tensão aos terminais do condensador, para uma frequência de comutação dos interruptores de 25 kHz. Repare que há tempo suficiente para o condensador atingir o valor final nos períodos de carga e descarga. O intervalo de tempo de carga ou descarga é T=1/25 kHz=40 μs.



A constante de tempo de carga $\tau_p = R_p C_L = 2\,\mu s$ e a constante de tempo de descarga $\tau_n = R_n C_L = 1\,\mu s$ são ambas muito inferiores ao período T, calculado a partir da frequência de comutação dos interruptores, $T > 5\tau$. Repare que o sinal $V_o(t)$ tem um período de valor 80 μs, o dobro do período de comutação.

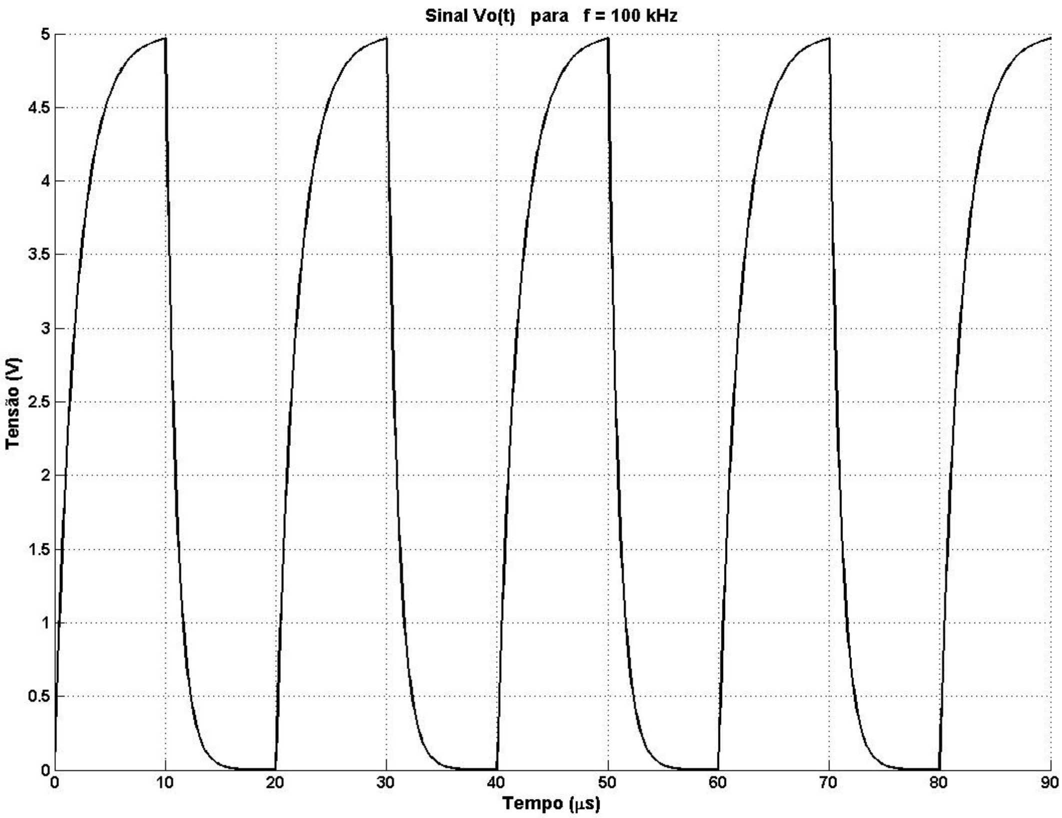
As curvas de tensão no condensador para cada período de comutação são calculadas a partir da expressão seguinte:
$v_c(t) = V_{cf} + (V_{Ci} - V_{cf})e^{-t/\tau}$, em que $\tau = RC$ é a constante de tempo, V_{Ci} é o valor de tensão inicial no condensador em cada período, V_{cf} é o valor de tensão final que o condensador atingiria se decorresse um tempo suficientemente grande ou seja $t > 5\tau$. Atenção: R e V_{cf} constituem o equivalente de Thévenin aos terminais do condensador. Nota: na utilização daquela expressão, o instante de tempo inicial para cada período de comutação é $t = 0\,s$.

A figura seguinte apresenta o sinal $V_o(t)$ para uma frequência de comutação dos interruptores de 500 kHz. Repare que não há tempo suficiente para o condensador atingir o valor final nos períodos de carga e descarga. O intervalo de tempo de carga ou descarga é T=1/500 kHz=2 μs.



A constante de tempo de carga $\tau_p = R_p C_L = 2\,\mu s$ e a constante de tempo de descarga $\tau_n = R_n C_L = 1\,\mu s$ são ambas da ordem de grandeza do período T, calculado a partir da frequência de comutação dos interruptores, $T < 5\tau$. $T = \tau_p = 2\tau_n$. Repare que o sinal $V_o(t)$ tem um período de valor 4 μs, o dobro do período de comutação.

Nos dois gráficos anteriores, foi assumido que $V_{Ci} = 0$ no instante de tempo $t = 0$. Repare os períodos iniciais diferentes, notório no segundo caso. Repare ainda que a carga é mais "lenta" que a descarga, devido às constantes de tempo diferentes. O gráfico seguinte apresenta o caso de frequência f=100 kHz onde se pode verificar melhor esta condição.



b.

Para se alcançar 5 V (V_F) e 0 V (massa) no valor de tensão no condensador é necessário que decorra um tempo $t > 5\tau$, valor de tensão >99% do valor final, em cada intervalo de comutação. Naturalmente, a constante de tempo a considerar é a de maior valor, com $\tau = máximo(\tau_p, \tau_n)$. Assim o período de comutação limite é $T = 5\tau = 5 \times 2\,\mu = 10\,\mu s$, o que resulta numa frequência máxima de comutação para os interruptores $f = \frac{1}{T} = 100\,kHz$.

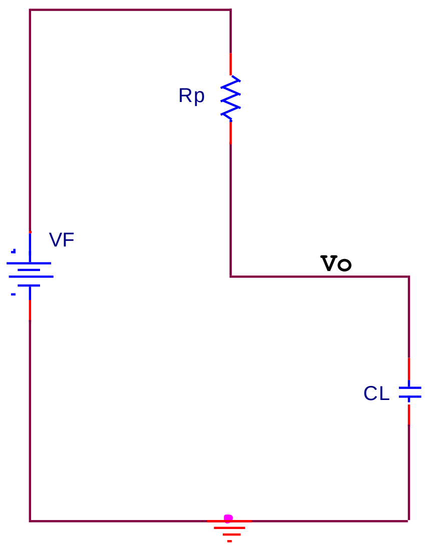
$$f_{máxima} = \frac{1}{5 \times máximo(\tau_p, \tau_n)} = \frac{1}{5 \times máximo(R_p, R_n) \times C_L}$$

Se o valor da capacidade de carga (carga do circuito) C_L aumenta então o valor daquela frequência limite (máxima) diminui, naturalmente como esperado pela explicação da alínea anterior. Repare que o valor de 100 kHz é um caso intermédio dos dois casos pedidos na alínea anterior. Este caso é apresentado no terceiro gráfico da alínea anterior.

Notas finais.

As designações carga e descarga são utilizadas para facilitar a compreensão do circuito. Repare que as expressões matemáticas e o raciocínio são idênticos para os dois casos.

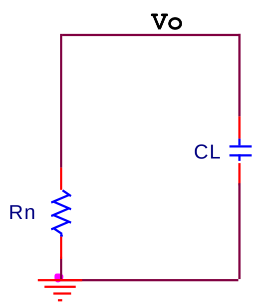
De seguida apresentam-se os circuitos de carga e descarga do condensador.



Carga do condensador

SW_p fechado, SW_n aberto.

Aos terminais de C_L: $R_{Th} = R_p$ e $V_{Th} = V_F$.



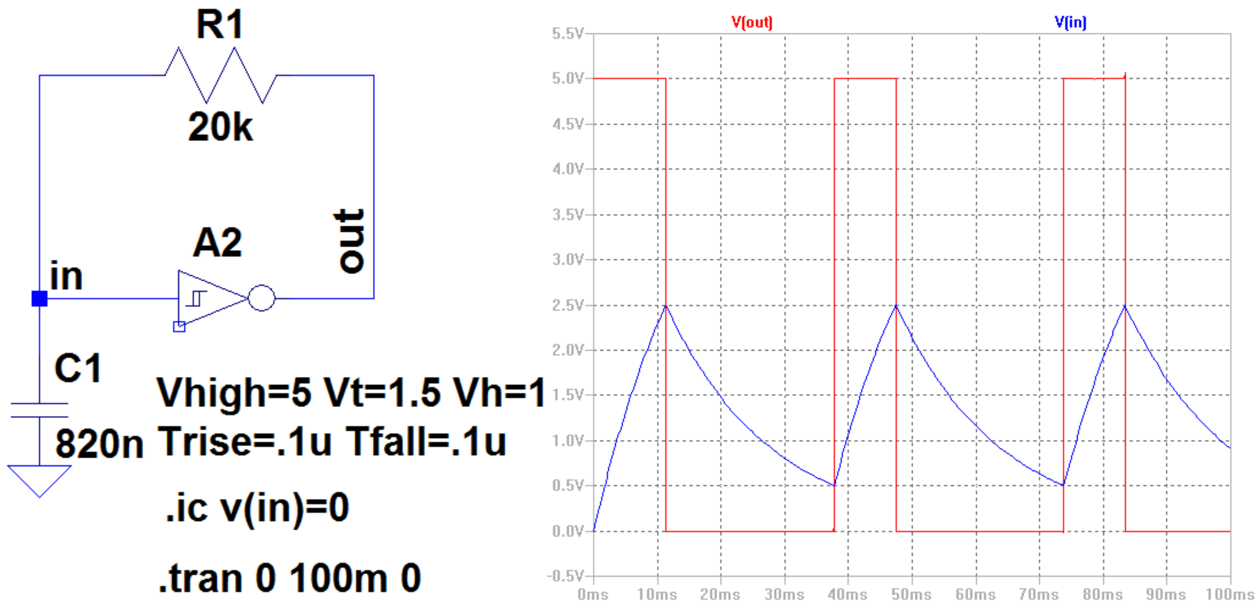
Descarga do condensador

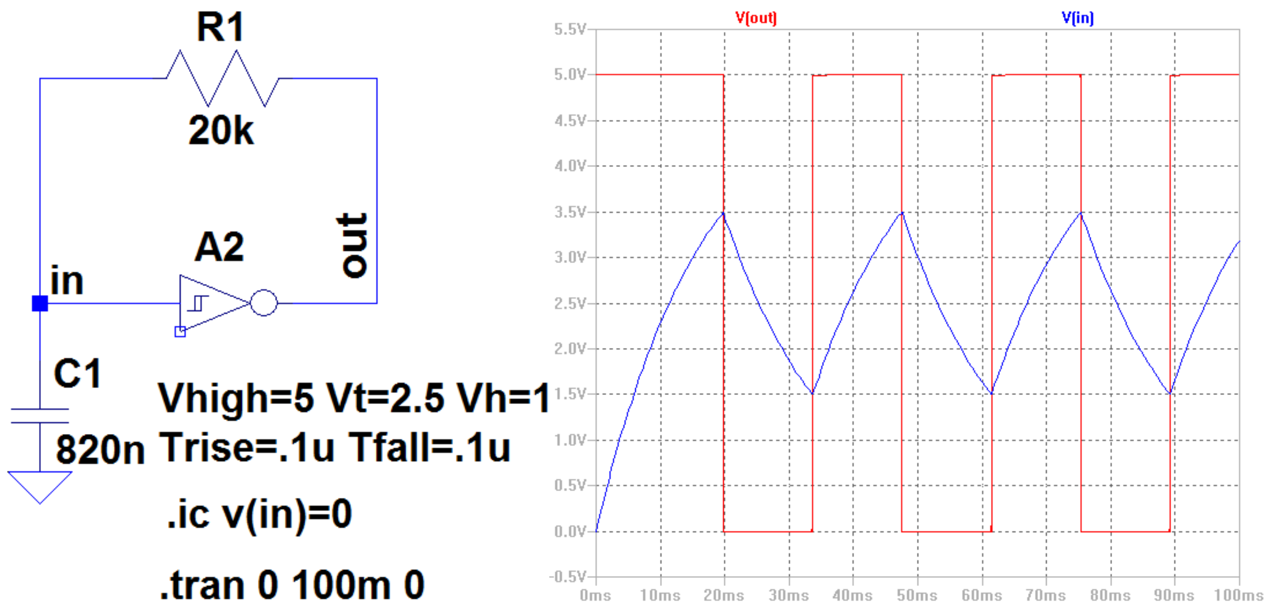
SW_n fechado, SW_p aberto.

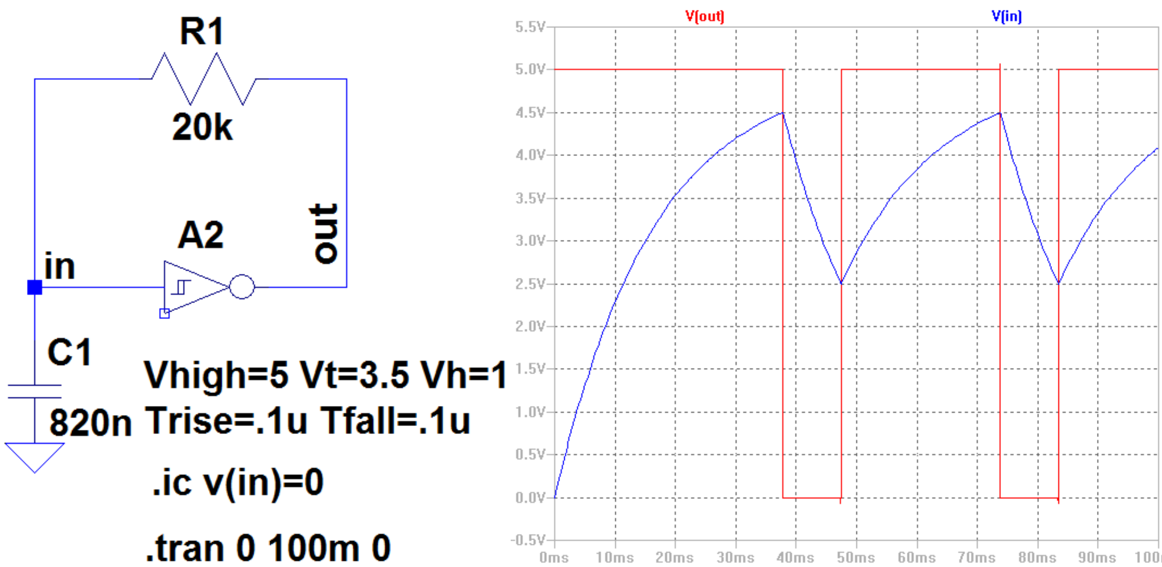
Aos terminais de C_L: $R_{Th} = R_n$ e $V_{Th} = 0$ V.

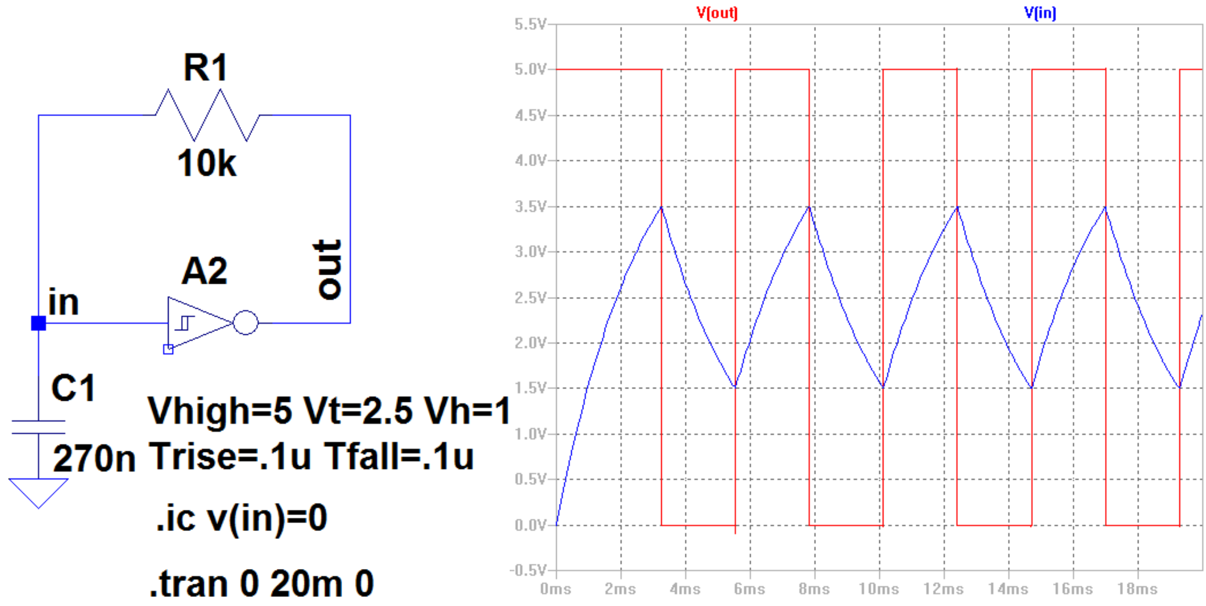
10. Considere o circuito seguinte com um inversor *Schmitt Trigger* (elemento $[Digital]schmtInv$). O circuito é um oscilador baseado em circuito RC. O elemento *Schmitt Trigger* permite estabelecer margens de ruído. Efectue simulações para obter os sinais $V(in)$ e $V(out)$ para vários casos de tensões de transição do inversor. Efectue simulações para obter os sinais $V(in)$ e $V(out)$ para vários casos de tensão de alimentação e de valores de componentes.

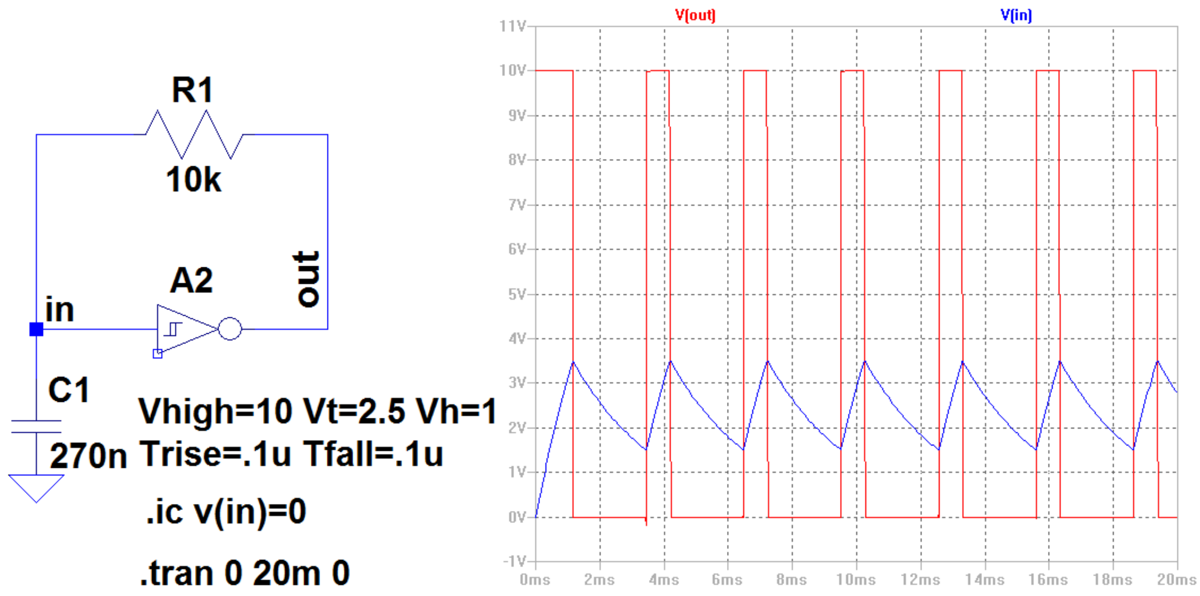
R.:


R1
20k
A2
out
in
C1
820n
Vhigh=5 Vt=1.5 Vh=1
Trise=.1u Tfall=.1u
.ic v(in)=0
.tran 0 100m 0
V(out)
V(in)


R1
20k
A2
out
in
C1
820n
Vhigh=5 Vt=2.5 Vh=1
Trise=.1u Tfall=.1u
.ic v(in)=0
.tran 0 100m 0
V(out)
V(in)

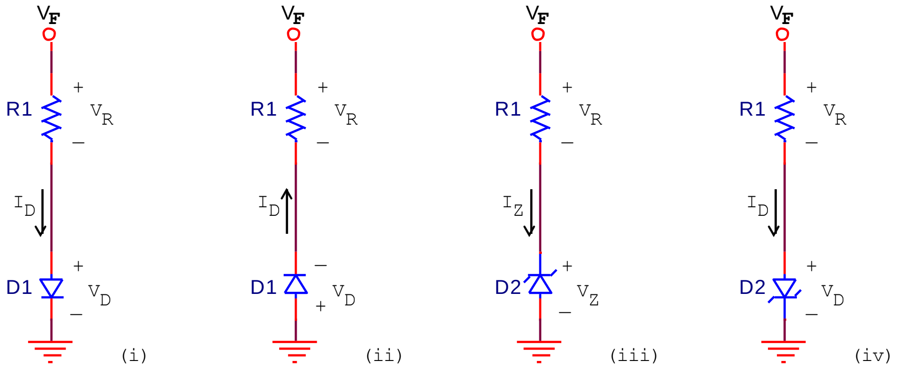

R1
20k
A2
out
in
C1
820n
Vhigh=5 Vt=3.5 Vh=1
Trise=.1u Tfall=.1u
.ic v(in)=0
.tran 0 100m 0
V(out)
V(in)


R1
10k
A2
in
out
C1
270n
Vhigh=5 Vt=2.5 Vh=1
Trise=.1u Tfall=.1u
.ic v(in)=0
.tran 0 20m 0
V(out)
V(in)


R1
10k
A2
in
out
C1
270n
Vhigh=10 Vt=2.5 Vh=1
Trise=.1u Tfall=.1u
.ic v(in)=0
.tran 0 20m 0
V(out)
V(in)

G. Díodos: operação

1. Considere os circuitos seguintes com fontes de tensão DC V_F=10 V, resistências R_1=1 kΩ, díodos D_1 com o modelo de grandes sinais V_{D0}=0,7 V e R_D=0 Ω, e díodos D_2 Zener com o modelo V_{D0}=0,7 V, R_D=0 Ω, V_{Z0}=6,3 V e R_Z=0 Ω.



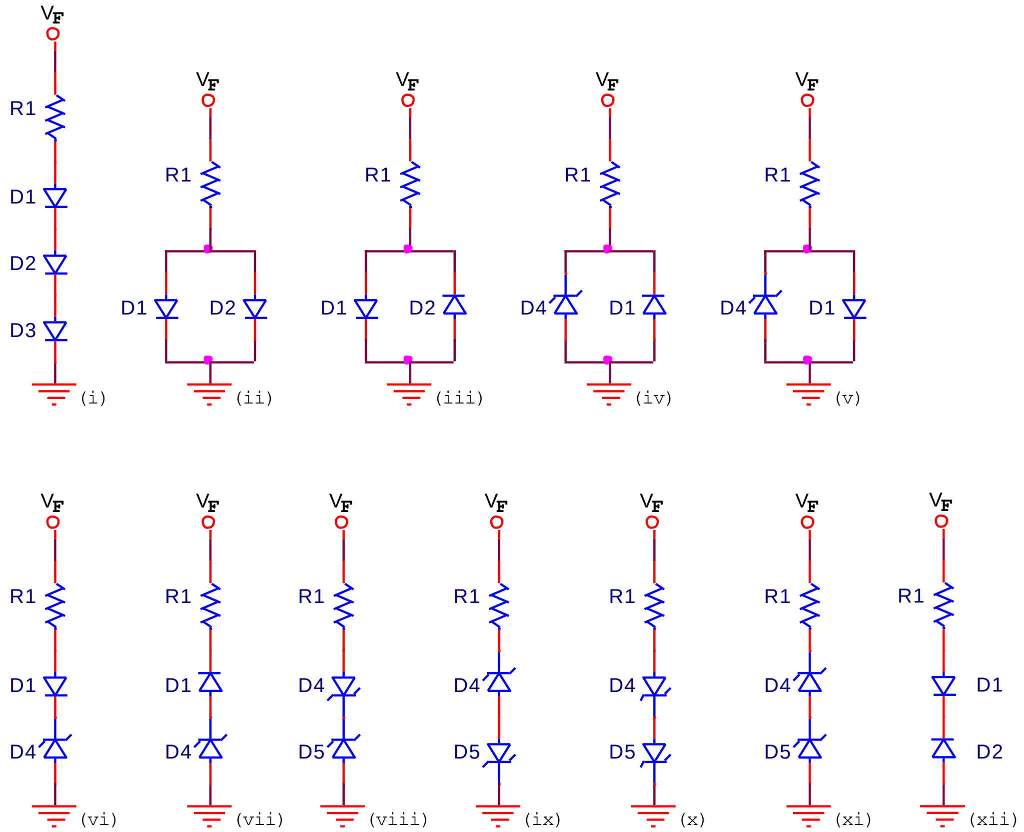
a) Para cada circuito, calcule as tensões aos terminais da resistência (V_R) e do díodo ($V_D = -V_Z$) e a corrente que percorre a resistência e o díodo ($I_D = -I_Z$).

R.: (i) 9,3 V; 0,7 V; 9,3 mA. (ii) 0 V; -10 V; 0 A.
(iii) 3,7 V; -6,3 V; -3,7 mA. (iv) 9,3 V; 0,7 V; 9,3 mA.

b) Para cada circuito, calcule as potências dissipadas na resistência e no díodo e a potência fornecida pela fonte V_F.

R.: (i) 86,5 mW; 6,5 mW; 93 mW. (ii) 0 W.
(iii) 13,7 mW; 23,3 mW; 37 mW. (iv) 86,5 mW; 6,5 mW; 93 mW.

2. Considere os circuitos seguintes com fontes de tensão DC V_F, resistências R_1=1 kΩ, díodos D_1, D_2 e D_3 com o modelo de grandes sinais $V_D=V_{D0}$=0,7 V, e díodos D_4 e D_5 Zener com o modelo $V_D=V_{D0}$=0,7 V e $V_Z=V_{Z0}$=5 V.



Com V_F=15 V e V_F=-15 V, e para cada circuito, calcule as tensões aos terminais da resistência (V_R) e dos díodos (V_D) e as correntes que percorrem a resistência (I_R) e os díodos (I_D).

R.: V_F=15 V

(i) R 12,9 V; D 0,7 V; 12,9 mA;

(ii) R 14,3 V; D 0,7 V; R 14,3 mA; D 7,15 mA.

(iii) R 14,3 V; D_1 0,7 V, D_2 -0,7 V; R 14,3 mA; D_1 14,3 mA, D_2 0 A.

(iv) R 10 V; D -5 V; R 10 mA; D_4 -10 mA, D_1 0 A.

(v) R 14,3 V; D_4 -0,7 V, D_1 0,7 V; R 14,3 mA; D_4 0 A, D_1 14,3 mA.

(vi) R 9,3 V; D_1 0,7 V, D_4 -5 V; R 9,3 mA; D_1 9,3 mA, D_4 -9,3 mA.

(vii) R 0 V; Dados insuficientes para calcular V_{D1} e V_{D4}, mas sabe-se que estão polarizados inversamente e ao corte, $V_{D1,4} < 0$ e $V_{D4} > -V_{Z0}$; 0 A.

(viii) R 9,3 V; D_4 0,7 V, D_5 -5 V; R 9,3 mA; D_4 9,3 mA; D_5 -9,3 mA.

(ix) R 9,3 V; D_5 0,7 V, D_4 -5 V; R 9,3 mA; D_5 9,3 mA; D_4 -9,3 mA.

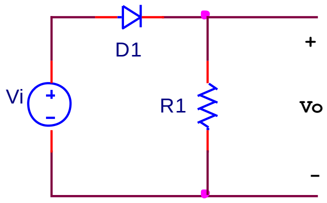
(x) R 13,6 V; D 0,7 V; 13,6 mA.

(xi) R 5 V; D -5 V; -5 mA.

(xii) R 0 V; D_1 0 V; D_2 -15 V; 0 A

H. Díodos: circuitos rectificadores e limitadores

1. Considere o circuito seguinte com sinal de tensão de entrada $v_i(t)$, sinal de tensão de saída $v_o(t)$, resistência R_1=1 kΩ e díodo D_1 de modelo $V_D=V_{D0}$=0,7.



a) Desenhe o circuito equivalente para a situação do díodo em condução directa. Determine uma expressão para a tensão de saída v_o em função da tensão de entrada v_i, $v_o=f(v_i)$, também denominada função de transferência.

R.: $v_o = v_i - V_{D0}$.

b) Desenhe o circuito equivalente para a situação do díodo ao corte. Determine uma expressão para a tensão de saída v_o em função da tensão de entrada v_i.

R.: $v_o = 0$.

c) Calcule as gamas de valores de v_i para as quais as situações anteriores são válidas, díodo em condução directa e díodo ao corte. Sugestão: aplique a condição (ponto) de transição condução/corte no díodo ($V_D=V_{D0}$ e $I_D=0$) ao circuito, para determinar o valor de v_i de transição.

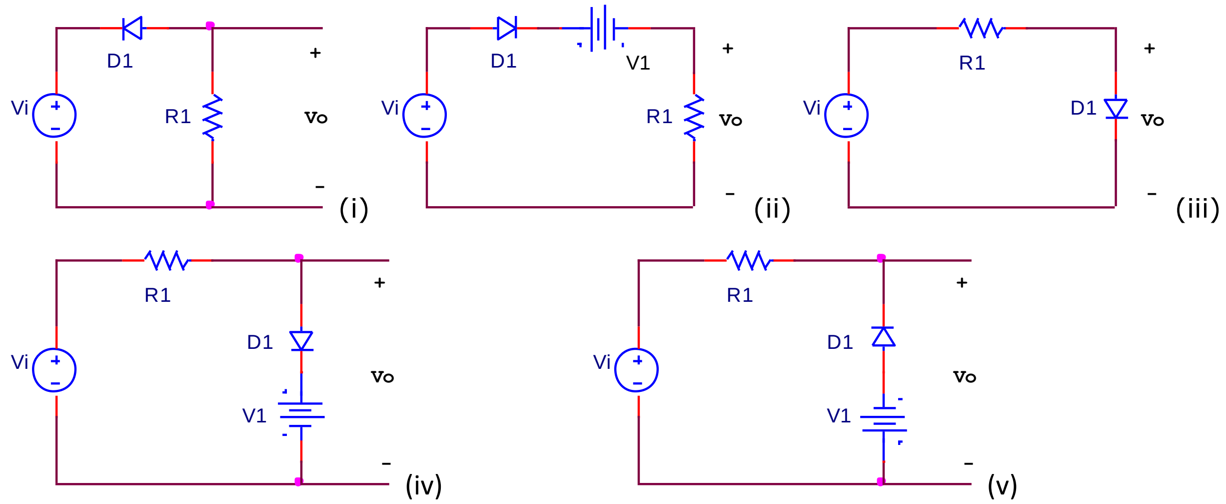
R.: D_1 condução: $v_i > V_{D0}$; D_1 corte: $v_i < V_{D0}$.

d) Esboce a característica de transferência $v_o=f(v_i)$ a partir dos resultados obtidos nas alíneas anteriores. Pode apresentar uma característica linearizada por troços, com indicação dos valores dos pontos importantes, incluindo as transições, e dos declives em cada zona.

e) Esboce a característica de transferência para a corrente na resistência R_1, $i_{R1}=f(v_i)$, seguindo o método sugerido nas alíneas anteriores.

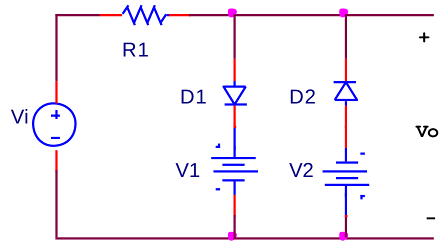
f) Para um sinal $v_i(t)=10\times\sin(\omega t)$ V, esboce os sinais $v_o(t)$ e $i_{R1}(t)$.

2. Repita as questões do exercício 1 para os circuitos seguintes, com V_1=5 V.



R.: (iv) D_1 condução: $v_o = V_{D0} + V_1$, $v_i > V_{D0} + V_1$; D_1 corte $v_o = v_i$, $v_i < V_{D0} + V_1$.

3. Repita as questões do exercício 1 para o circuito seguinte, com díodos D1 e D2 de V_D=V_{D0}=0,7 V e com V_1=5 V e V_2=3 V.



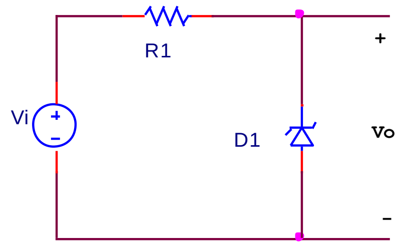
Repare que neste circuito tem 3 situações: D_1 em condução e D_2 ao corte; D_1 ao corte e D_2 em condução; D_1 e D_2 ao corte. Porque não tem o caso D_1 e D_2 em condução?

R.: D_1 condução, D_2 corte: $v_o = V_{D01} + V_1$, $v_i > V_{D01} + V_1$;

D_1 corte, D_2 condução: $v_o = -V_{D02} - V_2$, $v_i < -V_{D02} - V_2$;

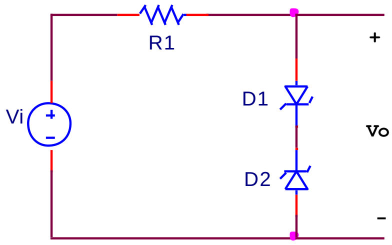
D_1 e D_2 corte: $v_o = v_i$, $-V_{D02} - V_2 < v_i < V_{D01} + V_1$.

4. Repita as questões do exercício 1 para o circuito seguinte, com um díodo D_1 Zener de V_D=V_{D0}=0,7 V e V_Z=V_{Z0}=5 V.



Repare que neste circuito tem 3 situações: D_1 em condução directa; D_1 ao corte; e D_1 na região de zener.

5. Repita as questões do exercício 1 para o circuito seguinte com díodos de Zener, D_1 de $V_D=V_{D0}=0{,}7$ V e $V_Z=V_{Z0}=5$ V e D_2 de $V_D=V_{D0}=0{,}7$ V e $V_Z=V_{Z0}=7$ V.



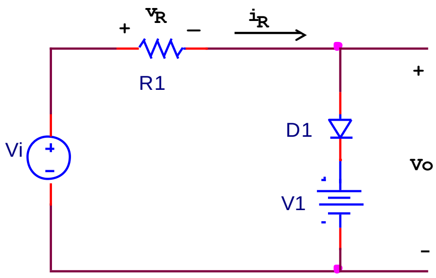
Repare que neste circuito tem 3 situações: D_1 em condução directa e D_2 zener; D_1 zener e D_2 em condução directa; D_1 e D_2 ao corte. Porque não tem mais situações? Repare também que a corrente que percorre um díodo também percorre o outro porque os díodos estão em série, embora *costas com costas*.

R.: D_1 condução directa e D_2 zener: $v_o = V_{D01} + V_{Z02}, \quad v_i > V_{D01} + V_{Z02}$;

D_1 zener e D_2 condução directa: $v_o = -V_{Z01} - V_{D02}, \quad v_i < -V_{Z01} - V_{D02}$;

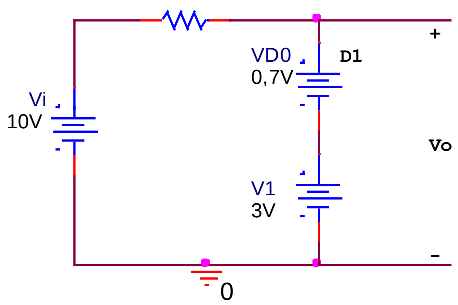
D_1 e D_2 corte: $v_o = v_i, \quad -V_{Z01} - V_{D02} < v_i < V_{D01} + V_{Z02}$.

6. $v_i(t)$ é o sinal de tensão de entrada aplicado ao circuito composto por uma resistência R_1=1 kΩ, uma fonte DC V_1=3 V e um díodo D_1 de modelo V_{D0}=0,7 V e R_D=0 Ω. $v_o(t)$ é a tensão de saída medida entre os nós indicados.

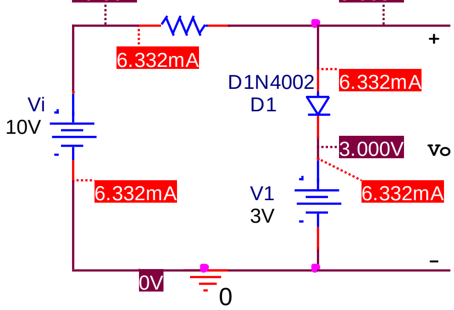


a) Para v_i=10 V, calcule v_{D1}, v_o, v_R e i_R. Desenhe o circuito equivalente.

R.: (i) Circuito equivalente e (ii) simulação com díodo *real*:



(i)



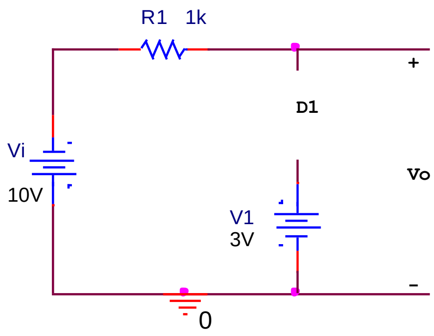
(ii)

Díodo em condução: $v_{D1} = V_{D0} = 0{,}7\,V$; $\quad v_o = v_{D1} + V_1 = 3{,}7\,V$;

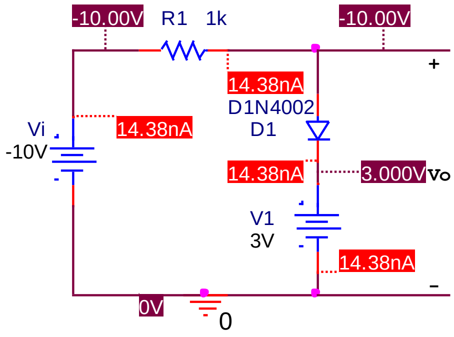
$v_R = v_i - (v_{D1} + V_1) = 6{,}3\,V$ (KVL); $\quad i_R = v_R / R_1 = 6{,}3\,mA$ (lei de Ohm); $\quad i_{D1} = i_R$.

b) Para v_i=-10 V, calcule v_{D1}, v_o, v_R e i_R. Desenhe o circuito equivalente.

R.: (i) Circuito equivalente e (ii) simulação com díodo *real*:



(i)



(ii)

Díodo ao corte: $i_R = i_{D1} = 0\,A$; $V_A = V_{\hat{a}nodo} = v_i - R_1 i_R = v_i$; $V_K = V_{c\acute{a}todo} = V_1$;

$v_{D1} = V_A - V_K = v_i - V_1 = -13\,V$; $v_o = v_i - R_1 i_R = v_{D1} + V_1 = -10\,V$; $v_R = R_1 i_R = 0\,V$.

c) Para os casos do díodo em condução e ao corte, calcule a função de transferência $v_o = f(v_i)$. Calcule a gama de valores de v_i válida para cada situação. Esboce a característica de transferência $v_o = f(v_i)$.

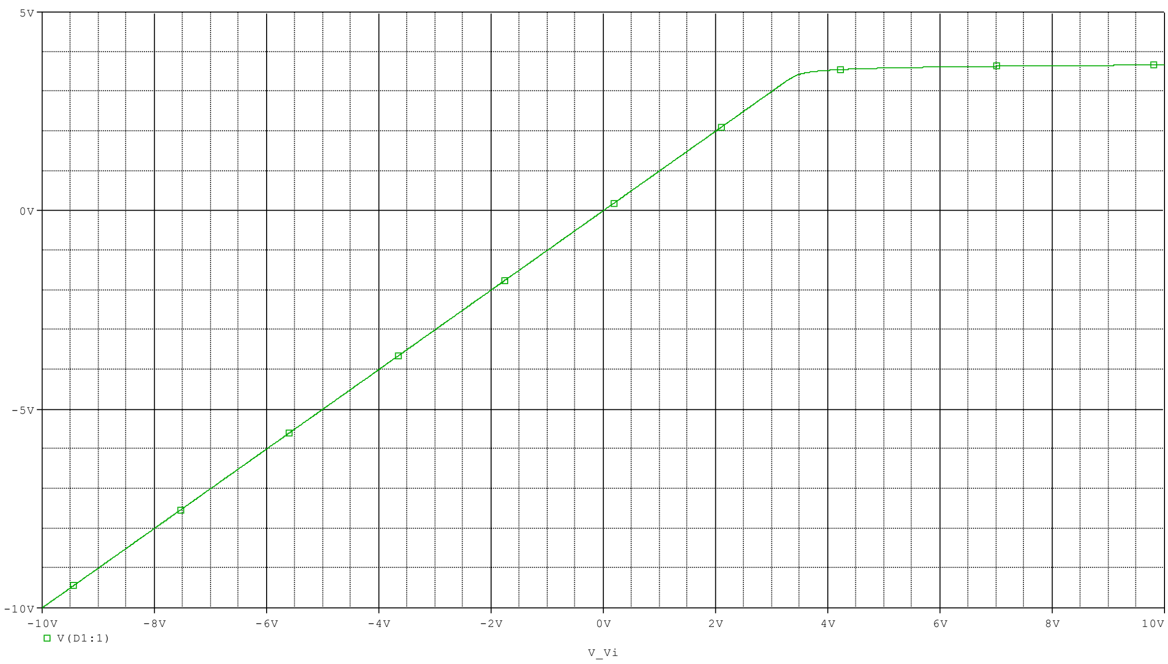
R.:

D_1 condução: $v_o = V_{D0} + V_1 = 3{,}7\,V$, para $v_i > V_{D0} + V_1$ (declive valor 0 na característica)

D_1 corte $v_o = v_i$, para $v_i < V_{D0} + V_1 = 3{,}7\,V$ (declive valor 1 na característica)

Limiar de condução: aplicando ao circuito a condição ($i_D = 0$; $v_D = V_{D0}$), obtém-se $v_i = V_{D0} + V_1 = 3{,}7\,V$. Naturalmente o díodo conduz ($i_D > 0$) para tensões superiores.

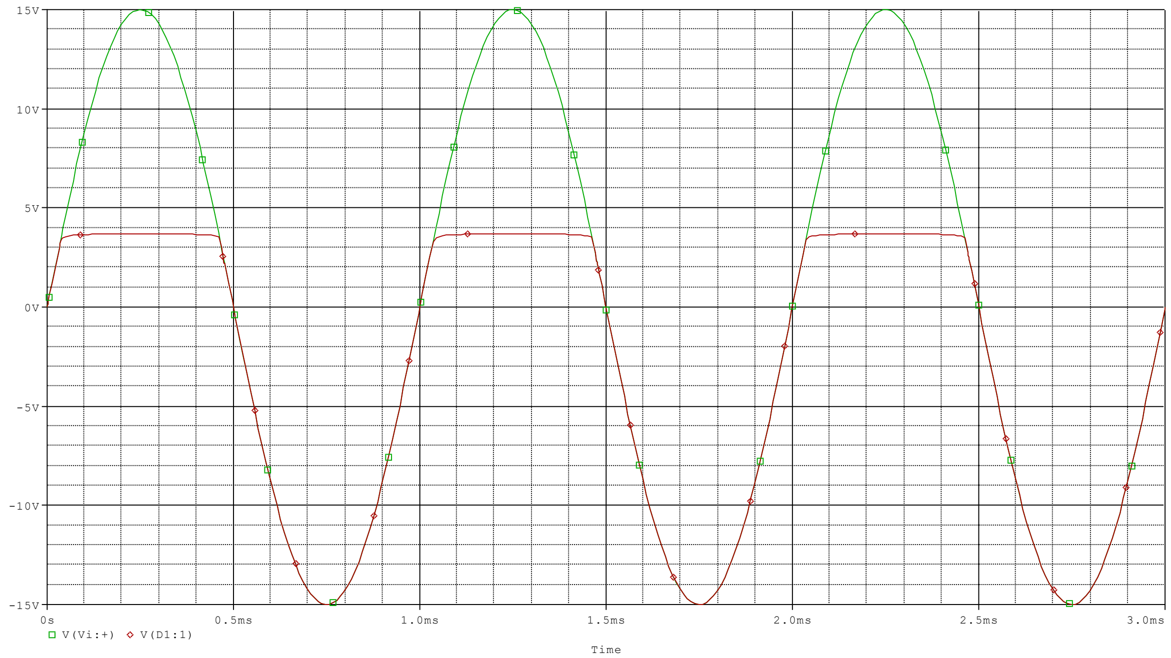
Característica de transferência $v_o = f(v_i)$ simulada com díodo D_1 *real*:



Verifica-se a funcionalidade de circuito limitador, com limite superior $v_o \cong V_{D0} + V_1 = 3{,}7\,V$.

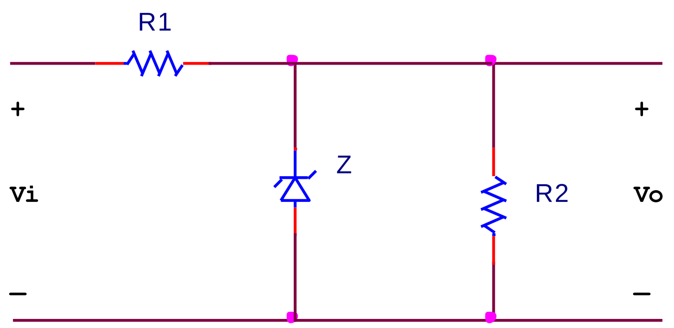
d) Para $v_i(t)$ um sinal sinusoidal de amplitude 15 V, esboce $v_o(t)$.

R.: Sinais simulados com díodo D_1 *real*:



Verifica-se novamente a funcionalidade de circuito limitador.

7. No circuito da figura o díodo é caracterizado por V_{D0}=0,7 V, V_{Z0}=4,7 V e R_D=R_Z=0 Ω. R_1=R_2=1 kΩ.



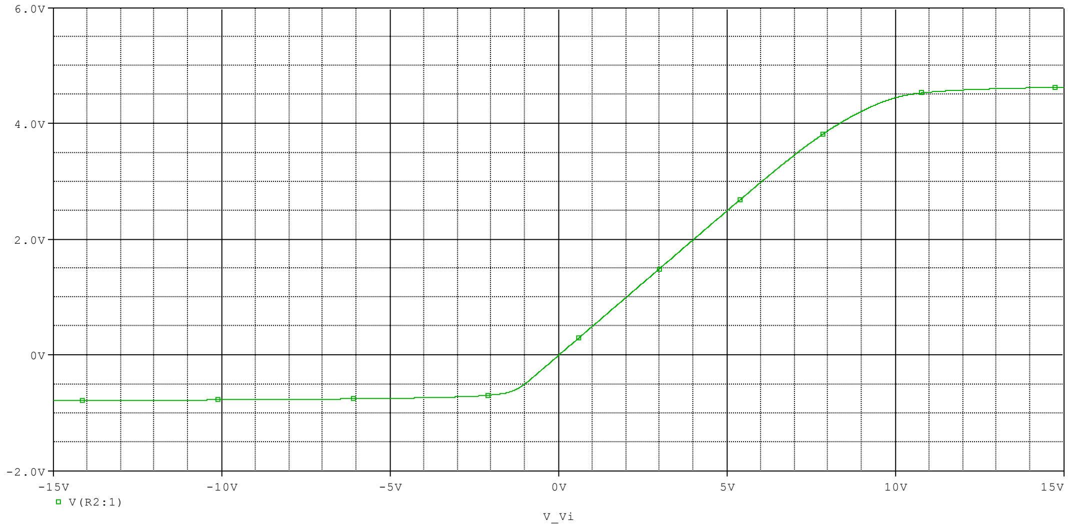
a) Esboce a função de transferência $V_o=f(V_i)$ e apresente os circuitos equivalentes para cada zona de funcionamento do circuito/díodo.

b) Com V_i=15 V, valor fixo, calcule o valor limite de R_2 que mantém o díodo a funcionar na região de zener.

R.:

a)

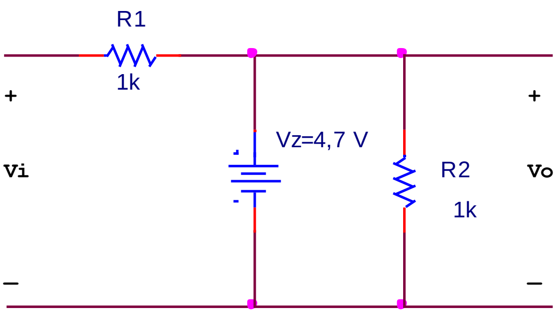
O gráfico da figura seguinte apresenta a característica $V_o = f(V_i)$ simulada para um díodo V_Z=4,7 V @ 20 mA.



Três situações de funcionamento do díodo – solução com modelos lineares:

Zener

Circuito equivalente



Tensão à saída:

$$V_o = V_Z = V_{Z0} + R_Z I_Z = 4{,}7V \ .$$

Limiar de condução:

$$D \to \ -V_D = V_Z = V_{Z0} = 4{,}7V \ , \quad -I_D = I_Z = 0A$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i = 4{,}7V \quad \to \quad V_i = 9{,}4V \ .$$

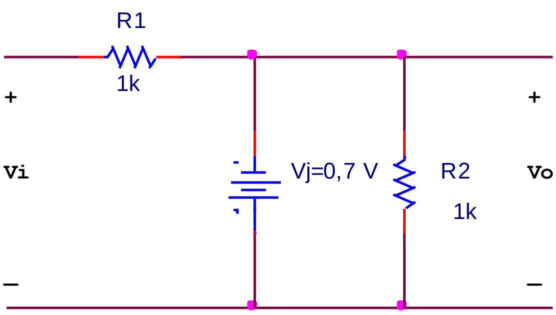
Condução na região de Zener:

$$V_i > 9{,}4V \ .$$

No gráfico: recta com declive 0.

Condução directa

Circuito equivalente



Tensão à saída:

$$V_o = -(V_{D0} + R_D I_D) = -0{,}7V \ .$$

Limiar de condução:

$$D \to \ V_D = V_{D0} = 0{,}7V \ , \quad I_D = 0A$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i = -0{,}7V \quad \to \quad V_i = -1{,}4V \ .$$

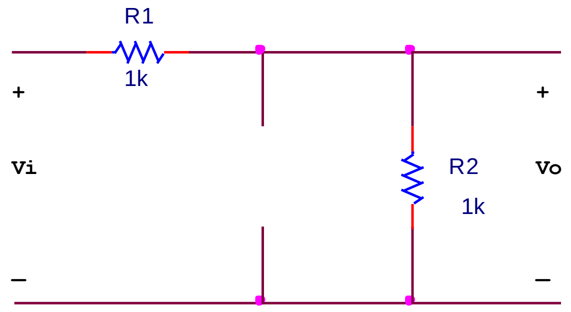
Zona de condução directa:

$$V_i < -1{,}4V \ .$$

No gráfico: recta com declive 0.

Corte

Circuito equivalente



Tensão à saída:

$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i$.

Condição valores de entrada:

$-1{,}4V < V_i < 9{,}4V$.

No gráfico: recta que passa na origem com declive $\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2}$.

b)

$V_i = 15V$.

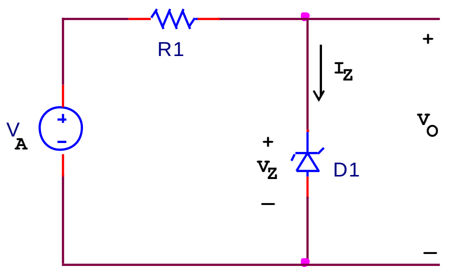
Limiar de condução:

$D \rightarrow \quad -V_D = V_Z = 4{,}7V \;, \quad -I_D = I_Z = 0A$.

Análise do circuito:

$I_{R1} = \frac{V_i - V_Z}{R_1} = 10{,}3mA\,,\quad I_{R2máximo} = I_{R1}\,,\quad R_{2mínimo} = \frac{V_Z}{I_{R2máximo}} = 456\Omega$.

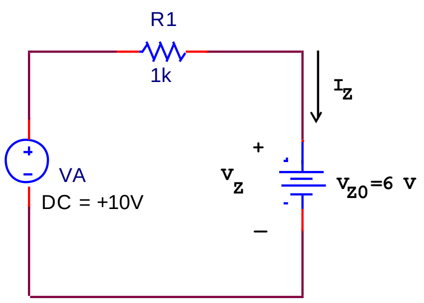
8. O circuito seguinte inclui uma fonte de tensão V_A, uma resistência R_1=1 kΩ e um díodo de zener de modelo V_{D0}=0,7 V, V_{Z0}=6 V e R_D=R_Z=0 Ω.



d) Calcule os valores de tensão (V_Z) e de corrente (I_Z) no díodo para os três casos de tensão da fonte V_A: 10 V, 4 V e -10 V.

e) Esboce a característica V_0=V_Z=$f(V_A)$ para $V_A \in$ [-10 V; 10 V], indicando os pontos de transição na zona de funcionamento do díodo e o declive em cada zona (linear) de funcionamento do díodo.

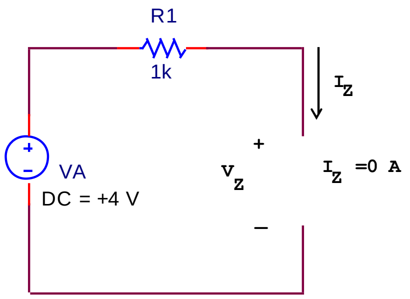
R.: (a)
Seguem-se os circuitos equivalentes para as várias zonas de funcionamento do díodo.
Convenções: $V_Z(= V_{KA}) = -V_D$; $I_Z(= I_{K\rightarrow A}) = -I_D$.



$V_A = +10\ V$
Díodo na zona de funcionamento de Zener (polarização inversa).

Tensão no díodo
$V_Z = V_{Z0} + R_Z I_Z = V_{Z0} = 6\ V \qquad (V_D = -6\ V)$

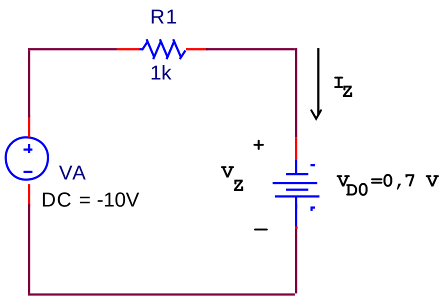
Corrente no díodo medida na resistência R_1
$I_Z = I_{R1} = \frac{V_A - V_Z}{R_1} = 4\ mA \qquad (I_D = -4\ mA)$



$V_A = +4\ V$
Díodo ao corte (polarização inversa).

Corrente no díodo
$I_Z = 0\ A; \qquad I_{R1} = 0\ A \qquad (I_D = 0\ A)$

Tensão no díodo imposta pelo circuito
$V_Z = V_A - R_1 I_{R1} = V_A = 4\ V \qquad (V_D = -4\ V)$



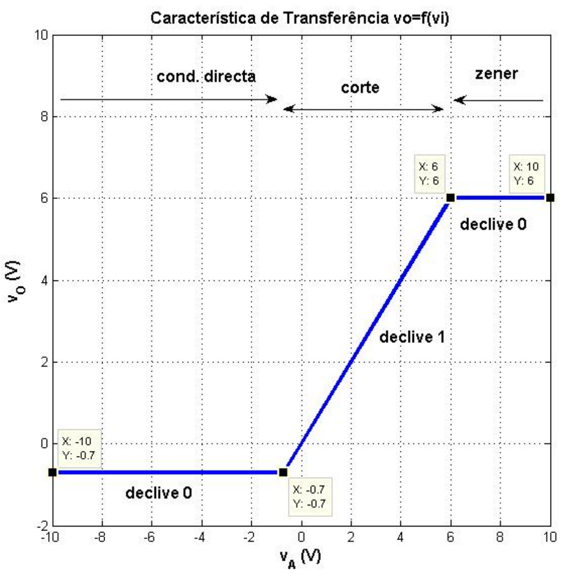
$V_A = -10\ V$
Díodo na zona de condução (com polarização) directa

Tensão no díodo
$V_D = V_{D0} + R_D I_D = V_{D0} = 0{,}7\ V$
$V_Z = -0{,}7\ V$

Corrente no díodo medida na resistência R_1
$I_D = I_{R1} = \frac{-V_{D0} - V_A}{R_1} = 9{,}3\ mA; \qquad I_Z = -9{,}3\ mA$

Para cada situação de valor da fonte V_A, assumiu-se a zona de funcionamento correcta. Contudo, aconselha-se a repetir o exercício partindo de uma hipótese diferente. Por exemplo, para $V_A = 10\ V$ assumir condução directa e verificar a impossibilidade; e para $V_A = 4\ V$ e $V_A = -10\ V$ assumir zona de zener e verificar a impossibilidade.

Ver também o exercício 7 deste grupo.



R.: (b)

<u>Zona de Zener</u>

$v_o = V_{Z0} = 6\ V \qquad$ para $\quad v_i > V_{Z0} = 6\ V$

<u>Zona de condução directa</u>

$v_o = -V_{D0} = -0{,}7\ V \qquad$ para $\quad v_i < -V_{D0} = -0{,}7\ V$

<u>Corte</u>

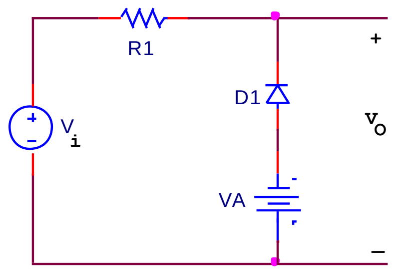
$v_o = v_i \qquad$ para $\quad -V_{D0} = -0{,}7\ V < v_i < V_{Z0} = 6\ V$

Em cada zona recorre-se aos circuitos equivalentes apresentados na alínea (a). Os pontos de transição calculam-se para as condições de limiar de condução:

zener/corte $\begin{cases} V_Z = V_{Z0} \\ I_Z = 0 \end{cases}$

condução directa/corte $\begin{cases} V_D = V_{D0} \\ I_D = 0 \end{cases}$.

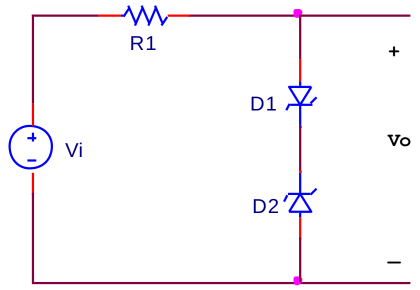
9. O circuito seguinte inclui uma fonte de tensão variável v_i, uma resistência R_1=1 kΩ, uma fonte de tensão DC V_A=3 V e um díodo D_1 de modelo V_{D0}=0,7 V e R_D=0 Ω.



a. Calcule os valores de tensão e de corrente no díodo e na resistência para os dois casos de tensão da fonte v_i: 7 V e -7 V.
Indique no circuito os sentidos das grandezas a calcular.

b. Esboce a característica $v_0=f(v_i)$ para $v_i \in$ [-10 V; 10 V], indicando os pontos de transição na zona de funcionamento do díodo e o declive em cada zona (linear) de funcionamento do díodo.

10. O circuito seguinte inclui uma fonte de tensão variável v_i, uma resistência R_1=1 kΩ e dois díodos de zener D_1 (V_{D0}=0,7 V e R_D=0 Ω; V_{Z0}=5 V e R_Z=0 Ω) e D_2 (V_{D0}=0,7 V e R_D=0 Ω; V_{Z0}=7 V e R_Z=0 Ω).

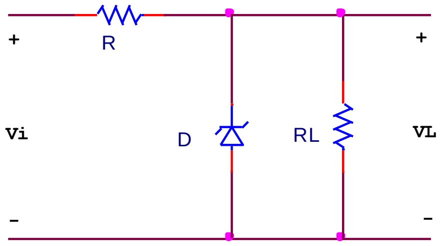


a. Calcule os valores de tensão e de corrente nos díodos para os dois casos de tensão da fonte v_i: 10 V e -10 V. Indique no circuito os sentidos das grandezas a calcular.

b. Esboce a característica $v_0=f(v_i)$ para $v_i \in$ [-10 V; 10 V], indicando os pontos de transição na zona de funcionamento dos díodos e o declive em cada zona (linear) de funcionamento dos díodos.

I. Díodos: circuitos reguladores

1. Considere o circuito seguinte com sinal de tensão de entrada $v_i(t)$, resistência R=0,5 kΩ e díodo D Zener de modelo $V_D=V_{D0}=0{,}7$ V, $V_{Z0}=5$ V e $R_Z=0$ Ω. A tensão de saída $v_L(t)$ é medida na resistência de carga R_L. Considere que a potência máxima do díodo é 250 mW.



a) Para $v_i=10$ V e $R_L=1$ kΩ, calcule I_R, I_Z e I_L.

R.: 10 mA; 5 mA; 5 mA (díodo na região de zener).

b) Para $v_i=6$ V e $R_L=1$ kΩ, calcule I_R, I_Z e I_L.

R.: 4 mA; 0 A; 4 mA (díodo ao corte).

c) Para $v_i=10$ V e $R_L=220$ Ω, calcule I_R, I_Z e I_L.

R.: 13,9 mA; 0 A; 13,9 mA (díodo ao corte).

d) Com $v_i=10$ V, calcule o valor mínimo de R_L que mantém o díodo a funcionar na região de zener. R.: 500 Ω.

e) Com $R_L=1$ kΩ, calcule o valor mínimo de v_i que mantém o díodo a funcionar na região de zener. R.: 7,5 V.

f) Com $v_i=10$ V, calcule o valor máximo de R_L que mantém a potência dissipada no díodo abaixo da potência máxima.

R.: Neste caso não existe máximo (circuito aberto, ∞).

g) Com $R_L=1$ kΩ, calcule o valor máximo de v_i que mantém a potência dissipada no díodo abaixo da potência máxima.

R.: $I_{Zmáx}=P_{Zmáx}/V_Z=50$ mA; 32,5 V.

h) Esboce os gráficos para as características $v_L=f(v_i)$, $i_R=f(v_i)$, $i_Z=f(v_i)$ e $i_L=f(v_i)$, com $R_L=1$ kΩ e $v_i \in [-15\text{ V}, +15\text{ V}]$.

i) Esboce os gráficos para as características $v_L=f(R_L)$, $i_R=f(R_L)$, $i_Z=f(R_L)$ e $i_L=f(R_L)$, com $v_i=10$ V e $R_L \in [10\ \Omega, 10\text{ k}\Omega]$.

j) Determine uma expressão para a tensão $v_L=f(v_i,V_{Z0},R_Z,R,R_L)$, considerando R_Z não nula e o díodo a operar na região de zener.

R.: Desenhe o circuito equivalente, se ainda não o fez (!), com $V_Z = V_{Z0} + R_Z I_Z$.

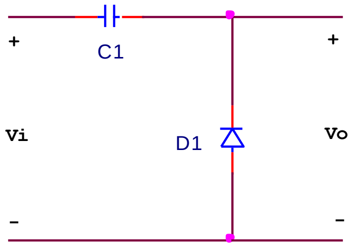
$v_L = \frac{R_Z//R_L}{R_Z//R_L+R} v_i + \frac{R//R_L}{R//R_L+R_Z} V_{Z0}$, pelo teorema da sobreposição.

$v_L = \frac{R_Z}{R_Z+R} v_i - (R_Z//R) i_L + \frac{R}{R+R_Z} V_{Z0}$, se considerar uma fonte de corrente i_L em substituição da carga R_L, representando a corrente pedida pela carga.

Esta última expressão é mais esclarecedora das dependências de v_L.

J. Díodos: circuitos fixadores

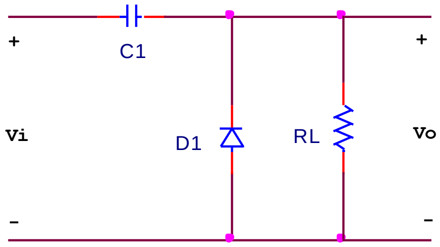
1. Considere o circuito seguinte com um condensador C_1=1 μF e um díodo D_1 de modelo em condução V_D=V_{D0}=0,7 V. Considere um sinal de tensão de entrada $v_i(t)$ uma onda quadrada de valores limites +6 V e -4 V.



Calcule e esboce o sinal de tensão de saída $v_o(t)$. Repita para um sinal de entrada de limites +4 V e -6 V. Que conclui?

R.: Em ambos os casos, $v_o(t)$ é uma onda quadrada de valores extremos -0,7 V e 9,3 V. O condensador C_1 carrega com 3,3 V no 1º caso e 5,3 V no 2º caso, valor necessário para posicionar o sinal de saída, $v_o = v_c + v_i$.

2. Repita o exercício 1 para o circuito seguinte, com uma resistência de carga R_L=1 kΩ. Considere dois casos para a frequência do sinal $v_i(t)$, 100 Hz e 500 Hz.



R.: Díodo ao corte e descarga de C_1 quando a saída assume valores positivos perto de 9,3 V, com constante de tempo $\tau_d = R_L C_1 = 1\,\text{ms}$. Díodo em condução e carga de C_1 no outro período em que a saída é inferior, com constante de tempo $\tau_c = (R_D // R_L)C_1 = 0\,s$ (!).

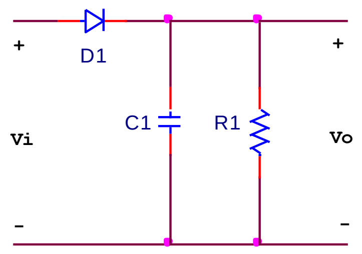
Com o sinal $v_i(t)$ de frequência 100 Hz, o intervalo de tempo permitido para carga ou descarga é 5 ms=5τ_d. Para 500 Hz é 1 ms=τ_d.

3. Repita o exercício 2 com uma capacidade C_1=10 μF.

R.: A constante de tempo de descarga sobe para $\tau_d = R_L C_1 = 10\,\text{ms}$. Assim o sinal à saída aproxima-se de uma onda quadrada, com *menor* deformação. O que se pretende no circuito fixador é $\tau_d = R_L C_1 \gg T$, sendo T o período do sinal $v_i(t)$.

K. Díodos: rectificação e filtragem

1. Considere o circuito seguinte com um condensador C_1=1 μF e um díodo D_1 de modelo em condução V_D=V_{D0}=0,7 V. Considere um sinal de tensão de entrada $v_i(t)$ uma onda sinusoidal de amplitude V_p=15 V.



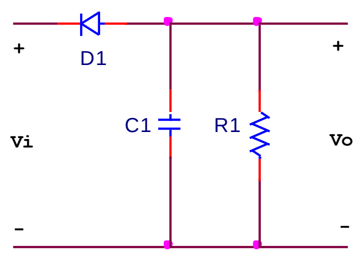
a) Esboce o sinal de tensão à saída $v_o(t)$ e o sinal de corrente no díodo $i_D(t)$. Considere dois casos para a frequência do sinal $v_i(t)$, 100 Hz e 500 Hz.

R.: Carga através do díodo D_1 com constante de tempo $\tau = (R_D//R_1)C_1 = 0$ (!). Descarga, com o díodo ao corte, através da resistência R_1 com constante de tempo $\tau = R_1C_1 = 1\,ms$. Quanto maior (menor) a frequência (o período) menor a tensão de *ripple*.

b) Determine uma expressão aproximada para a tensão de *ripple*, assumindo uma situação em que se verifica τ=RC >> T.

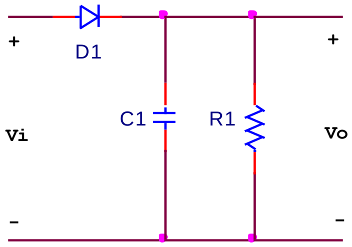
R.: $V_r \approx V_p \frac{T}{RC} = \frac{V_p}{fRC}$.

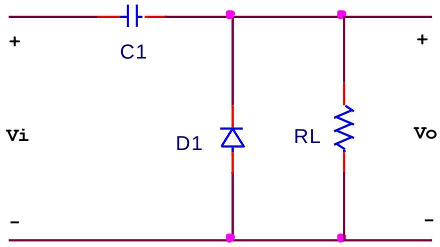
2. Repita o exercício 1 para o circuito seguinte.



3. As constantes de tempo (τ=RC) associadas a condensadores têm uma importância grande no estudo dos circuitos electrónicos.

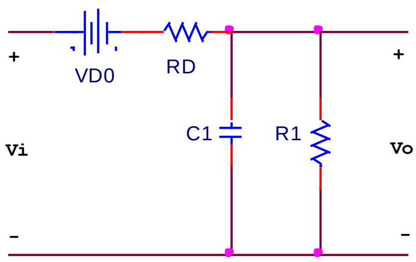
Calcule as constantes de tempo para os períodos de carga e descarga do condensador no circuito rectificador com filtragem e no circuito fixador que se apresentam em baixo. Considere D_1 com V_{D0}=0,6 V e R_D=10 Ω, R_1=1 kΩ e C_1=1 μF. Retire conclusões dos valores obtidos para as constantes de tempo.



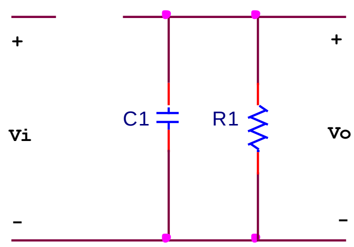


R.: A resistência da constante de tempo RC é a resistência de Thévenin aos terminais do condensador.

Circuito rectificador com filtragem



(i)

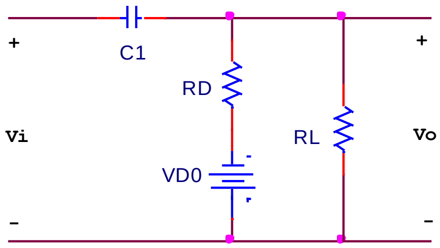


(ii)

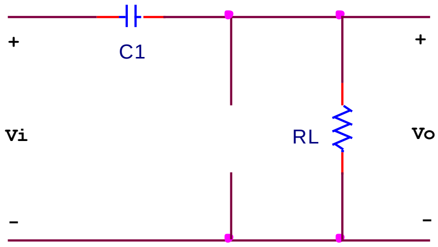
(i) Carga: $R_{Th}=R_D//R_1\approx 10\ \Omega$, $\tau=R_{Th}C_1=10\ \mu s$.

(ii) Descarga: $R_{Th}=R_1=1\ k\Omega$, $\tau=R_{Th}C_1=1$ ms.

Circuito fixador



(i)



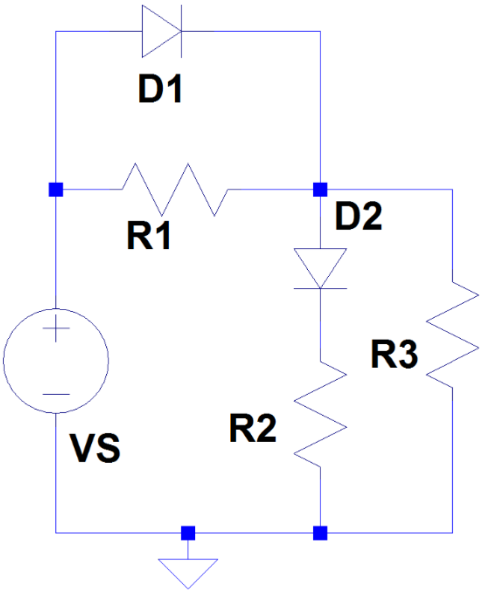
(ii)

(i) Carga: $R_{Th}=R_D//R_1\approx 10\ \Omega$, $\tau=R_{Th}C_1=10\ \mu s$.

(ii) Descarga: $R_{Th}=R_1=1\ k\Omega$, $\tau=R_{Th}C_1=1$ ms.

L. Díodos: teste de condução

1.



Considere $R_1 = 5{,}6\ k\Omega$, $R_2 = 2{,}7\ k\Omega$ e $R_3 = 1\ k\Omega$.
Considere $V_D = 1{,}8\ V$ para díodos em condução.

a)
Calcule o valor da fonte V_S que permite obter $I_{D1} = 1\ mA$.

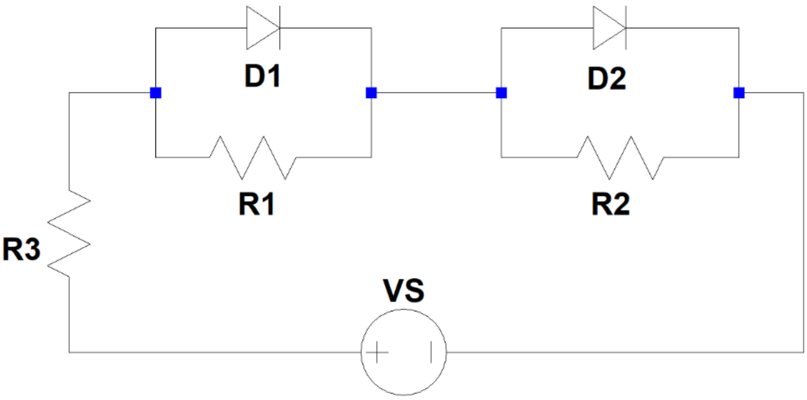
Sugestão A:
- Faça a hipótese de condução para os dois díodos e verifique a validade com os valores calculados.
- Se a hipótese anterior falha, analise um novo circuito com uma situação válida.

Sugestão B:
- Com a hipótese de condução inicial para o díodo D_1 ($I_{D1} = 1\ mA$), verifique se a corrente e a tensão mínimas em R_3 com o díodo D_2 em condução são possíveis.

Solução: $V_S = 3{,}12\ V$ para $I_{D1} = 1\ mA$.
Neste caso D_1 está em condução e D_2 está ao corte com $V_{D2} = 1{,}32\ V$ (polarização não suficiente).

b)
Calcule o valor da fonte V_S a partir do qual os dois díodos estão em condução.
Solução: $V_S = 3{,}6\ V$
Para $V_S > 3{,}6\ V$ os dois díodos estão em condução com $I_{D1} > 1{,}48\ mA$ e $I_{D2} > 0\ A$.

2.



Considere $R_1 = 1\ k\Omega$, $R_2 = 2\ k\Omega$ e $R_3 = 1\ k\Omega$.

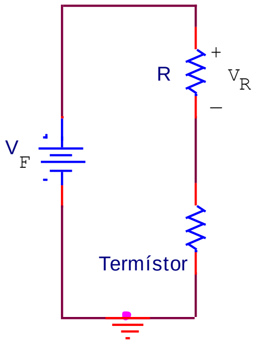
Considere $V_D = 2\ V$ para os díodos em condução.

a)
Calcule o valor de tensão da fonte V_S a partir do qual os dois díodos estão em condução.
Solução: $V_S = 6\ V$.
Os dois díodos estão em condução para $V_S > 6\ V$.

b)
Para o valor limite da alínea a) ($V_S = 6\ V$), calcule os valores de corrente nos dois díodos.
Solução: $I_{D1} = 0\ A$ e $I_{D2} = 1\ mA$.
Para $V_S > 6\ V$, as correntes $I_{D1} > 0\ A$ e $I_{D2} > 1\ mA$.

M. Sensores

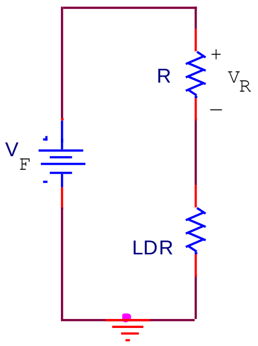
1. O circuito seguinte tem uma fonte DC V_F=1 V, R=2,2 kΩ e um termístor NTC. Considere que mediu o valor de tensão na resistência R às 06:00 e às 14:00 horas de um determinado dia, V_{6h}=0,4 V e V_{14h}=0,6V. O datasheet do fabricante do termístor indica a variação no valor de resistência ΔR=-100 Ω/°C.



Calcule a variação de temperatura em graus centígrados ou Célsius (°C) das 06:00 para as 14:00 nesse dia. A que horas se registou a temperatura mais alta? Justifique.

R.: Δt=+18 °C; 14:00.

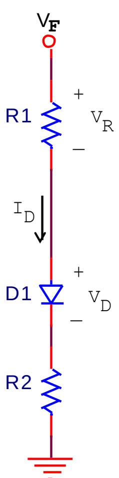
2. O circuito seguinte tem componentes V_F, R e uma fotoresistência LDR. Considere que a LDR tem uma variação negativa com a intensidade da luz incidente.



Considere que o circuito se encontra *à janela*, *detectando* a luz ambiente exterior, e que tem um voltímetro a medir a tensão na resistência R, V_R. Esta leitura é utilizada para ligar as luzes de iluminação interior. Quando o valor daquela tensão sobe além de um determinado limite pré-estabelecido as luzes são ligadas.

Está este sistema bem dimensionado? Porquê?

R.: Não, deveriam ser ligadas as luzes para valores inferiores de tensão na resistência R.

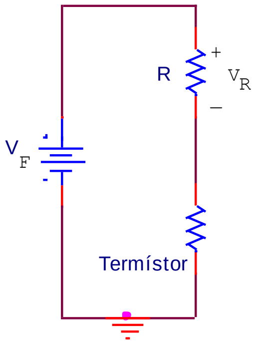


3. O circuito seguinte tem os componentes seguintes: uma fonte V_F=12 V, uma resistência R_1=860 Ω, um díodo LED de V_D=2 V e uma fotoresistência R_2 LDR. Considere que o LED emite luz para correntes superiores a 2 mA. Considere que a luz do LED não interfere com a LDR.

Calcule o valor da resistência R_2 a partir do qual o LED emite luz, R_{2t}. Se a LDR tem uma variação negativa com a intensidade da luz incidente, o LED emite luz perceptível para intensidades de luz incidente na LDR superiores ou inferiores à intensidade a que corresponde R_{2t}? Justifique.

R.: 4,14 kΩ; superiores.

4. O circuito tem uma fonte DC V_F=10 V, uma resistência R=2,2 kΩ e um termístor. O termístor tem uma variação negativa com a temperatura do seu valor de resistência ΔR=-100 Ω/°C. Considere que mediu o valor de tensão na resistência R em duas situações (a) e (b), $v_{Ra} = 4\,V$ e $v_{Rb} = 6\,V$.



Calcule a variação de temperatura Δt em graus Célsius (°C) da situação (a) para a situação (b).

R.: Resposta igual ao exercício 1, mas com as tensões 10 vezes superiores e a corrente 10 vezes inferior. Considere a resistência no termístor R_T, R_{Ta} na situação (a) e R_{Tb} na situação (b).
Resolução a partir do divisor de tensão calculado na resistência R.

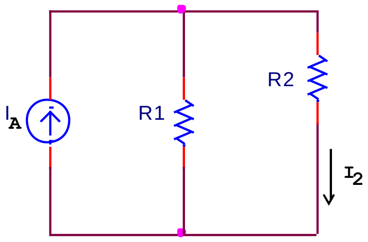
$v_{Ra} = \frac{R}{R+R_{Ta}} V_F \rightarrow R_{Ta} = 3{,}3\ k\Omega$

$v_{Rb} = \frac{R}{R+R_{Tb}} V_F \rightarrow R_{Tb} \cong 1{,}5\ k\Omega$

$\Delta R_T \cong R_{Tb} - R_{Ta} = -1{,}8\ k\Omega$

$\Delta\text{t} \cong (-1{,}8\ k\Omega)/(-100\ \Omega) = +18\ °\text{C}.$

5. O circuito seguinte contém uma fonte de corrente I_A=10 mA, uma resistência R_1=3 kΩ e um termístor R_2 que é uma resistência com variação negativa com a temperatura de coeficiente $\Delta R_{Th} = -200\ \Omega/°\text{C}$.



Considere que mediu a corrente I_2, assinalada no circuito, em duas situações de temperatura (X) e (Y):
I_{2X}=5 mA e I_{2Y}=7,5 mA.
Calcule a variação de temperatura em Célsius (°C) ocorrida da situação X para a situação Y.

R.:

O circuito apresenta um divisor de corrente $I_2 = \frac{R_1}{R_1+R_2} I_A$ $R_2 = \frac{R_1 I_A}{I_2} - R_1$.

Utilizando esta relação calculamos $R_{2X} = 3\ k\Omega$ e $R_{2Y} = 1\ k\Omega$.

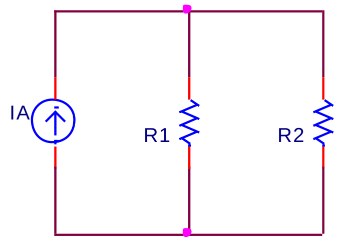
Alternativa: $I_1 (= I_{R1}) = I_A - I_2$ $V_{R1} = R_1 I_1 = V_{R2}$ $R_2 = \frac{V_{R2}}{I_2} = \frac{R_1(I_A - I_2)}{I_2}$.

(Repare que esta última expressão para R_2 é igual à de cima, naturalmente!)

$\Delta R_2 = R_{2Y} - R_{2X} = -2\ k\Omega$

$\Delta\text{t} = \Delta R_2/\Delta R_{Th} = (-2\ k\Omega)/(-200\ \Omega) = +10\ °\text{C}.$

6. O circuito seguinte contém uma fonte de corrente I_A=1 mA, uma resistência R_1=3 kΩ e termístor R_2 que é uma resistência com variação negativa com a temperatura de coeficiente ΔR=-200 Ω/°C.



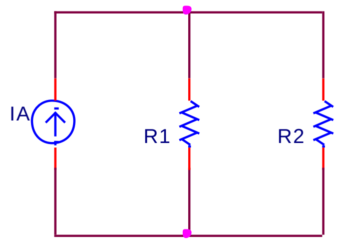
Considere que mediu a tensão na resistência R_2 em duas situações de temperatura (X) e (Y):

V_{2X}=1,5 V e V_{2Y}=0,75 V.

a. Calcule a variação de temperatura em Célsius (°C) ocorrida da situação X para a situação Y.

b. Com R_2 de valor inicial 2 kΩ, calcule o valor final de R_2 se a temperatura descer 5 °C.

7. O circuito seguinte contém uma fonte de corrente I_A=1 mA, uma resistência R_1=2 kΩ e um termístor R_2 que é uma resistência com variação negativa com a temperatura de coeficiente ΔR=-200 Ω/°C.



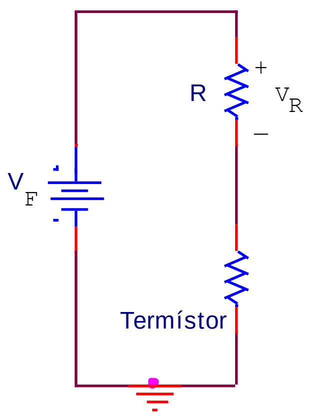
a. Considere que mediu a tensão na resistência R_2 em duas situações de temperatura (X) e (Y):

V_{2X}=0,4 V e V_{2Y}=1,2 V.

Calcule a variação de temperatura em Célsius (°C) ocorrida da situação X para a situação Y.

b. Com R_2 de valor inicial 2 kΩ, calcule a variação de corrente na resistência R_2 se a temperatura descer 5 °C.

8. No circuito seguinte considere um termístor NTC (R_T) com a expressão seguinte, a partir da qual pode obter a temperatura em Celsius conhecendo o seu valor de resistência em Ohm, com $R_{25} = 10\,k\Omega$.



$$T(R_T) = \frac{1}{3{,}35 \times 10^{-3} \; + \; 2{,}57 \times 10^{-4} \times \ln\left(\frac{R_T}{R_{25}}\right)} - 273$$

(Datasheet *NTC Thermistor 2322 640 6.3103*, página 15 coluna 6.103 – expressão aproximada.)

Considere $V_F = 1\,V$, $R = 8{,}2\,k\Omega$.

Mediu-se $V_R = 0{,}54\,V$.

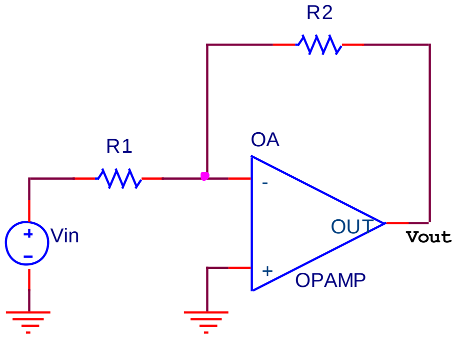
Calcule o valor de temperatura ambiente.

R.: $34\,°C$

Nota.
A secção O contém alguns exercícios com circuitos que incluem sensores, como por exemplo O2 e O8.

N. Amplificador operacional (OpAmp): funcionamento linear

1. Considere o circuito seguinte com um OpAmp ideal.

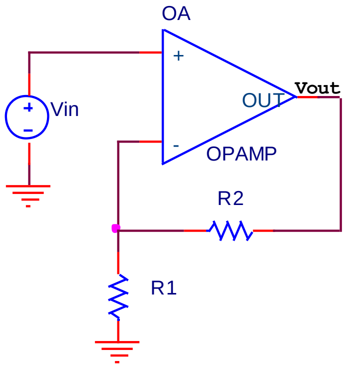


Determine uma expressão para o ganho de tensão v_{out}/v_{in}.

Com R_1=10 kΩ, R_2=20 kΩ e $v_{in}(t)=2\times\sin(\omega t)$ V, esboce o sinal à saída $v_{out}(t)$.

R.: Montagem inversora, $v_{out}/v_{in} = -\frac{R_2}{R_1}$.

2. Considere o circuito seguinte com um OpAmp ideal.

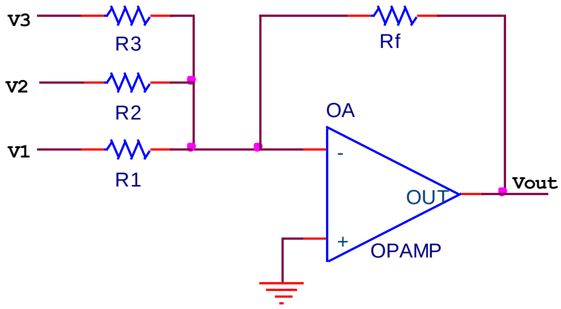


Determine uma expressão para o ganho de tensão v_{out}/v_{in}.

Com R_1=10 kΩ, R_2=20 kΩ e $v_{in}(t)=2\times\sin(\omega t)$ V, esboce o sinal à saída $v_{out}(t)$.

R.: Montagem não-inversora, $v_{out}/v_{in} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$.

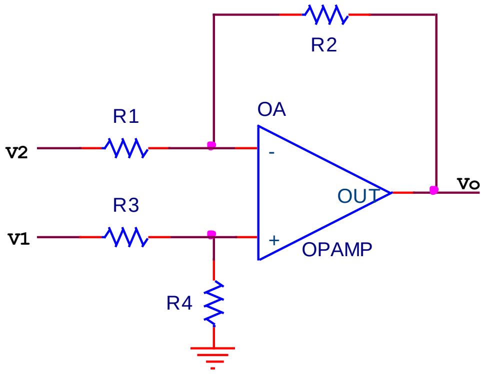
3. Considere o circuito seguinte com um OpAmp ideal.



Determine uma expressão de v_{out} em função das entradas v_1, v_2 e v_3.

R.: Amplificador de soma, $v_{out} = -\frac{R_f}{R_1}v_1 - \frac{R_f}{R_2}v_2 - \frac{R_f}{R_3}v_3$, pelo princípio da sobreposição.

4. Considere o circuito seguinte com um OpAmp ideal.



Determine uma expressão de v_o em função das entradas v_1 e v_2.

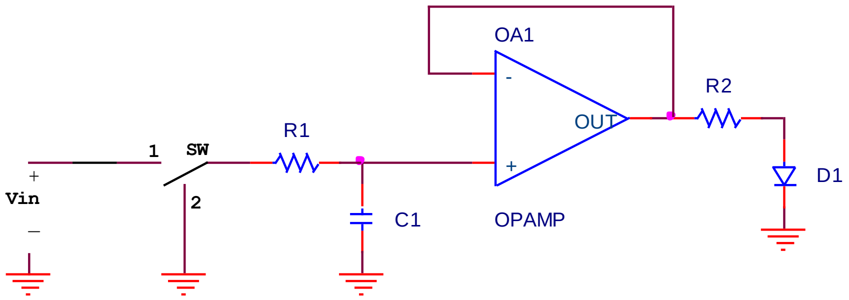
R.: Amplificador de diferença, $v_o = \frac{R_4}{R_3+R_4}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)v_1 - \frac{R_2}{R_1}v_2$, pelo princípio da sobreposição.

Nota: se $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \rightarrow v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_1 - v_2)$.

5. Considere o circuito seguinte *track-and-hold*, com um interruptor SW, um OpAmp OA_1, duas resistências R_1 e R_2, um condensador C_1 e um díodo LED D_1.

Considere que OA_1 é um OpAmp ideal. Considere R_2=3 kΩ, R_1=1 MΩ e C_1=10 μF.

Considere que o brilho do LED só é perceptível para correntes superiores a I_D=1 mA e apresenta uma tensão V_D≈2 V.



Considere inicialmente o interruptor na posição 2 e o tempo suficiente para o condensador C_1 descarregar completamente. Considere V_{in}=+10 V DC.

Considere desprezáveis os tempos de atraso no OpAmp e no díodo.

Considere que no instante t_0=0, comuta o interruptor SW para a posição 1.

Quanto tempo decorre até o LED emitir luz com uma intensidade perceptível, t_1?

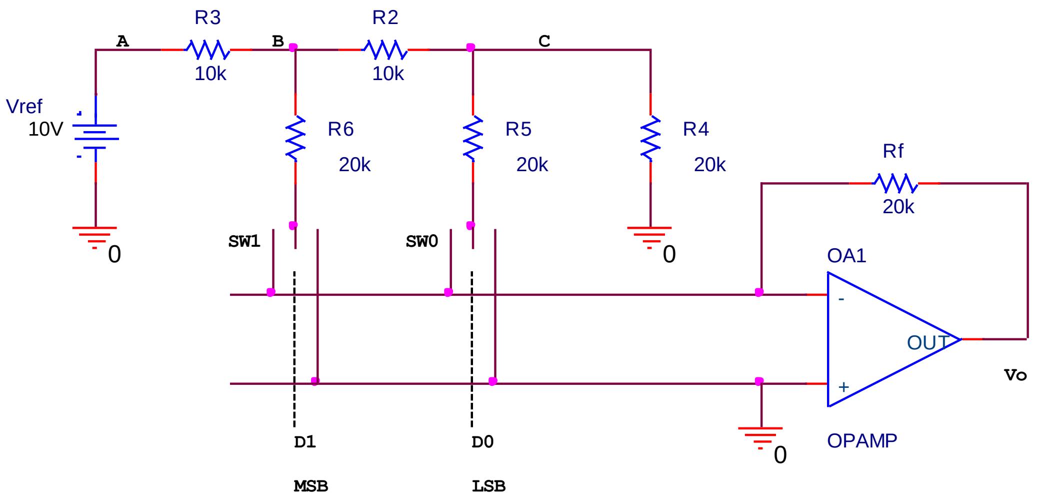
R.: $i_D = 1\,mA \rightarrow v_{out} = v_{C1} = 5\,V$. Montagem seguidora de tensão $v_{out} = v_p$, com v_p entrada não inversora do OpAmp.

$v_{C1}(t) = V_{in}\left(1 - e^{-\frac{t}{R_1C_1}}\right) \rightarrow$ cálculo de t_1 para $v_{C1}(t_1) = 5\,V$, com $V_{in} = 10\,V$.

Alternativa: $\Delta t = t_1 - t_0 = t_d = 0{,}7R_1C_1 = 7\,s$.

t_d por constatação que o intervalo de tempo Δt corresponde a metade da excursão do sinal de v_{C1}, $V_{C1-reg.estacionário} = V_{in}$.

6. O circuito da figura é um conversor digital-analógico.



Considere a fonte de referência V_{REF}=10 V, $R_2=R_3$=10 kΩ, $R_4=R_5=R_6$=20 kΩ e R_F=20 kΩ. Considere o OpAmp OA_1 ideal.

D_0 e D_1 são os 2 bits a converter em valor de tensão.

Considere que o valor lógico "1" num bit corresponde a actuar num interruptor e ligar a resistência respectiva à entrada inversora (terminal -) do OpAmp. Por exemplo, D_0="1" actua no interruptor SW0 de modo a ligar a resistência R_5 ao terminal – do OpAmp.

Considere que o valor lógico "0" num bit corresponde a actuar no circuito e ligar a resistência respectiva à entrada não inversora (terminal +) do OpAmp, ligada no circuito à massa. Por exemplo, D_1="0" actua no interruptor SW1 de modo a ligar a resistência R_6 à massa.

a) Calcule os valores de tensão nos nós superiores da escada de resistências.

R.:

nó A	V_{REF}=10 V
nó B	$V_{REF}/2$=5 V
nó C	$V_{REF}/2^2$=2,5 V.

b) Para todas as combinações de entrada D_1D_0, calcule os valores respectivos de tensão de saída v_o.

R.:

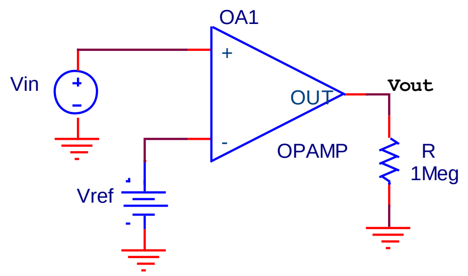
D_1D_0	v_o
00	0 V
01	-2,5 V
10	-5 V
11	-7,5 V

Nota:

Repare que tem uma montagem inversora e somadora com ganho -1.

O. Amplificador operacional (OpAmp): funcionamento não linear

1. Considere o circuito da figura com R=1 MΩ. v_{in} é o sinal de tensão à entrada e v_{out} é o sinal de tensão à saída. O OpAmp OA_1 é ideal com tensões de saturação V_{sat}^{+}=10 V e V_{sat}^{-}=-10 V.



a) Esboce o sinal $v_{out}(t)$, se V_{REF}=0 V e $v_{in}=5\times\sin(\omega t)$ V.

b) Esboce o sinal $v_{out}(t)$, se V_{REF}=0 V e $v_{in}=2+5\times\sin(\omega t)$ V.

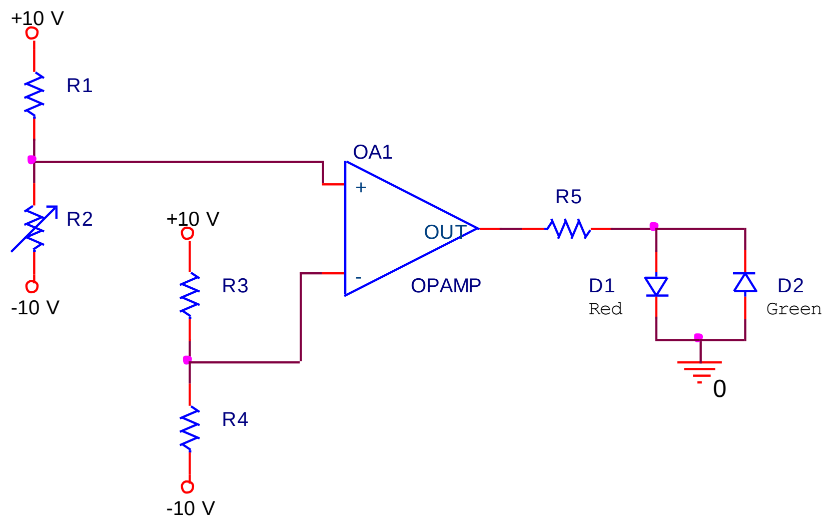
c) Esboce o sinal $v_{out}(t)$, se V_{REF}=2 V e $v_{in}=5\times\sin(\omega t)$ V.

d) Esboce o sinal $v_{out}(t)$, se V_{REF}=-2 V e $v_{in}=5\times\sin(\omega t)$ V.

e) Esboce o sinal $v_{out}(t)$, se V_{REF}=2 V e $v_{in}=-2+5\times\sin(\omega t)$ V.

R.: Tenha em atenção que o OpAmp está *saturado*, em funcionamento não linear: $v_+ > v_- \Rightarrow v_{out} = V_{sat}^+$ e $v_+ < v_- \Rightarrow v_{out} = V_{sat}^-$; v_+ é a entrada não inversora; v_- é a entrada inversora; e v_{out} é a saída do OpAmp. Também se podem designar as entradas com v_p (p de *plus* em inglês) e v_m (m de *minus* em inglês), para não criar confusão com as alimentações do circuito V^+ e V^-.

2. Considere o circuito da figura com o OpAmp OA_1 ideal e de tensões de saturação V_{sat}^{+}=10 V e V_{sat}^{-}=-10 V. D_1 é um díodo LED vermelho e D_2 é um díodo LED verde.



a) Dimensione o valor da resistência R_5 de modo a obter uma corrente aproximada de condução dos díodos de 10 mA. Considere uma tensão de condução directa dos díodos aproximada de 2 V.

R.: 800 Ω.

b) Considere $R_3=R_4$, $R_1=10\ \text{k}\Omega$ e R_2 um potenciómetro. Determine as gamas de valores de R_2 para as quais visualiza luz vermelha e luz verde.

R.: $\text{Red} \rightarrow R_2 > 10\ \text{k}\Omega$; $\text{Green} \rightarrow R_2 < 10\ \text{k}\Omega$.

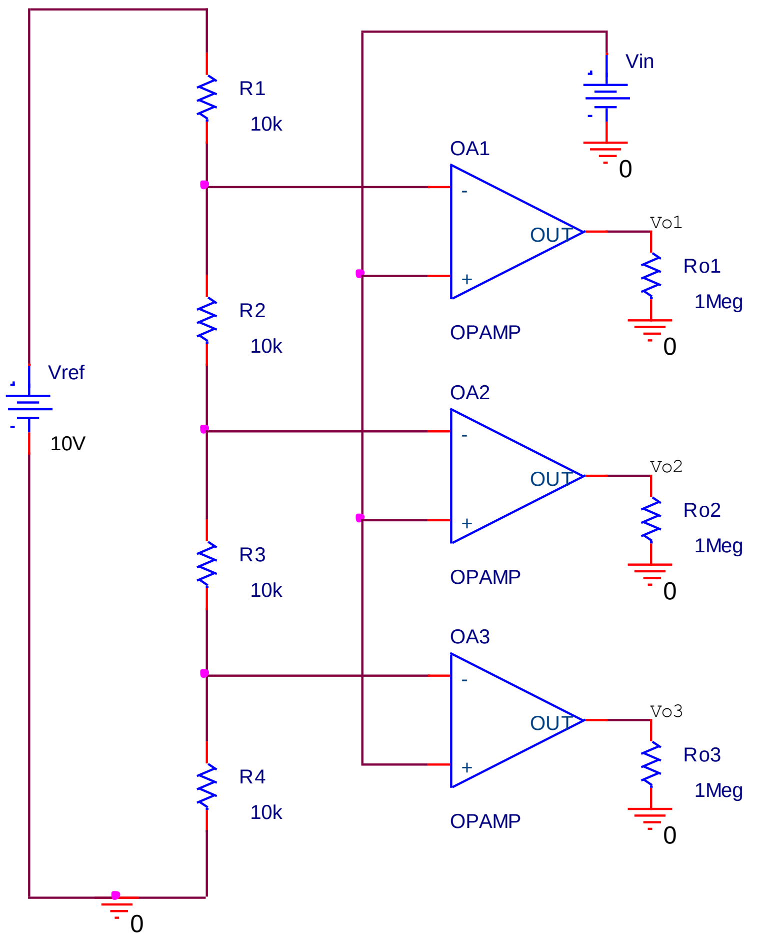
Nota. As fontes de tensão de 10 V em conjunto com as resistências R_1/R_2 e R_3/R_4 formam dois divisores de tensão, uma vez que se considera corrente nula nas entradas do OpAmp. Recorde o cálculo destes divisores a partir do exercício B.8 do módulo "*Exercícios 1*".

c) Repita a línea anterior para $R_4=2\times R_3$.

R.: $\text{Red} \rightarrow R_2 > 20\ \text{k}\Omega$; $\text{Green} \rightarrow R_2 < 20\ \text{k}\Omega$.

d) Se R_2 fosse uma fotoresistência ou um termístor que aplicações teria este circuito? Explique a sua operação.

3. O circuito da figura é um conversor analógico-digital, ou seja converte um valor de tensão, em Volt, numa sequência de bits "0" e "1".



Considere que a fonte de tensão de referência tem um valor fixo $V_{REF}=10\ \text{V}$, $R_1=R_2=R_3=R_4=10\ \text{k}\Omega$, e $R_{o1}=R_{o2}=R_{o3}=1\ \text{M}\Omega$.

v_{in} é a tensão de entrada a converter para uma palavra digital. A tensão de entrada pode assumir os valores $v_{in} \in [0\ \text{V}, 10\ \text{V}]$.

Os OpAmp são ideais com tensões de saturação V_{sat}^{+}=10 V e V_{sat}^{-}=0 V. Considere que a tensão à saída de um OpAmp de v_o=10 V corresponde ao valor lógico "1" e que a tensão de v_o=0 V corresponde ao valor lógico "0".

a) Calcule os valores de tensão nos nós do circuito divisor de tensão à esquerda na figura.

R.: 10 V | 7,5 V | 5 V | 2,5 V.

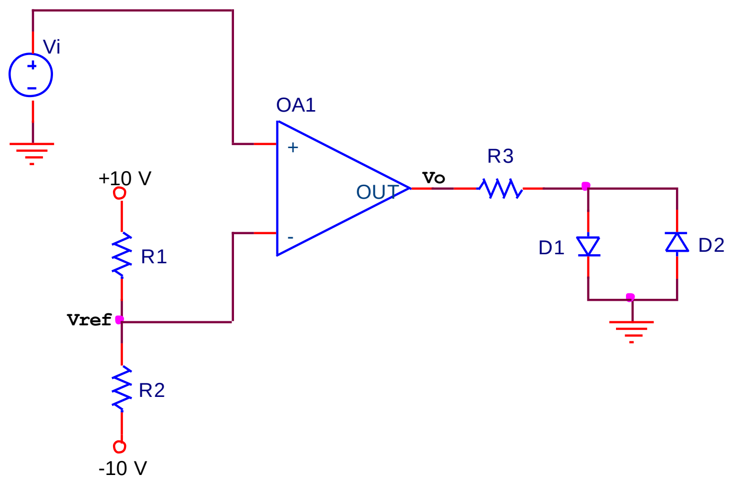
b) Determine quais as palavras binárias possíveis à saída $v_{o1}|v_{o2}|v_{o3}$ e a que gamas de valor de tensão de entrada v_{in} correspondem.

R.:

000 → 0 V a 2,5 V
001 → 2,5 V a 5 V
011 → 5 V a 7,5 V
111 → 7,5 V a 10 V

Nota: Repare que os OpAmp funcionam como comparadores e que o código gerado é um código *termómetro*. Só necessita de dois bits para representar esta informação, assim deveria existir um *decoder* 3:2 (2^N-1:N, com N=2) para conversão de 3 para 2 bits.

4. Considere o circuito com um amplificador operacional ideal (OpAmp) de tensões de saturação $V_{sat}^{+} = +10$ V e $V_{sat}^{-} = -10$ V. $v_i(t)$ é um sinal triangular de amplitude 10 V. R_1, R_2 e R_3 são resistências e D_1 e D_2 são díodos.



a) Considere duas situações: R_2=R_1 e R_2=3×R_1. Calcule V_{ref} para cada situação. Esboce o sinal à saída do OpAmp $v_o(t)$ para as duas situações. Em cada um dos dois gráficos, desenhe os sinais $v_i(t)$ e $v_o(t)$.

R.: O OpAmp OA_1 funciona como comparador.

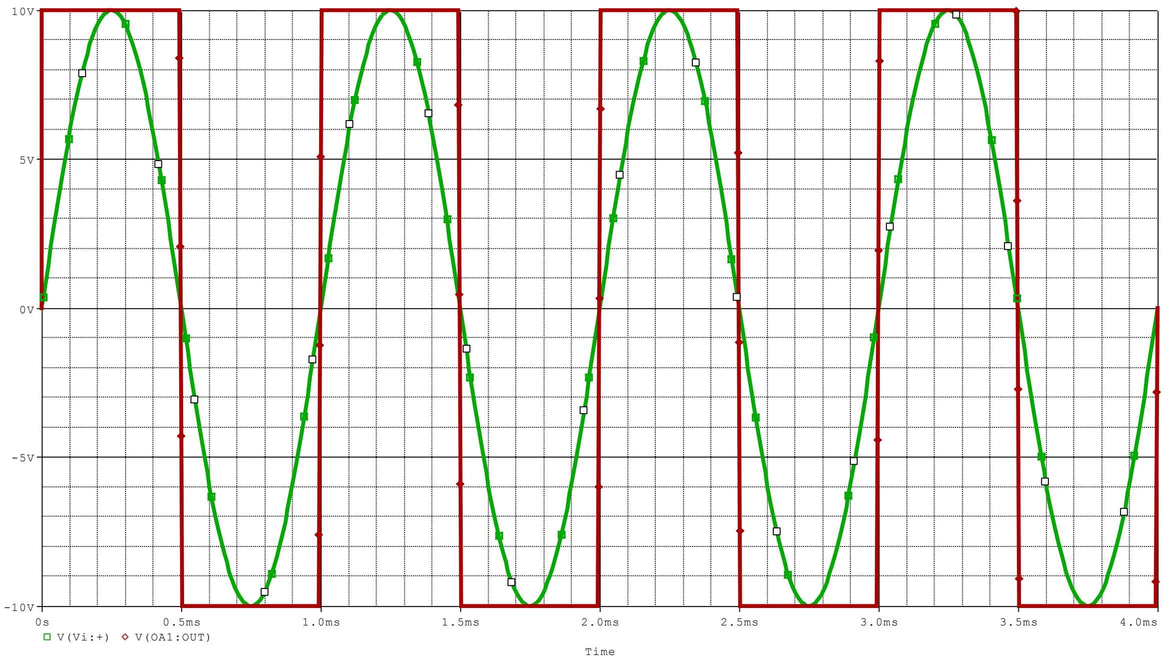
Divisor de tensão da alimentação simétrica $\pm 10\,V$ para as resistências R_1 e R_2, porque não existe corrente nas entradas do OpAmp:

$V_{ref} = \frac{R_2}{R_2+R_1} \times 20 - 10.$

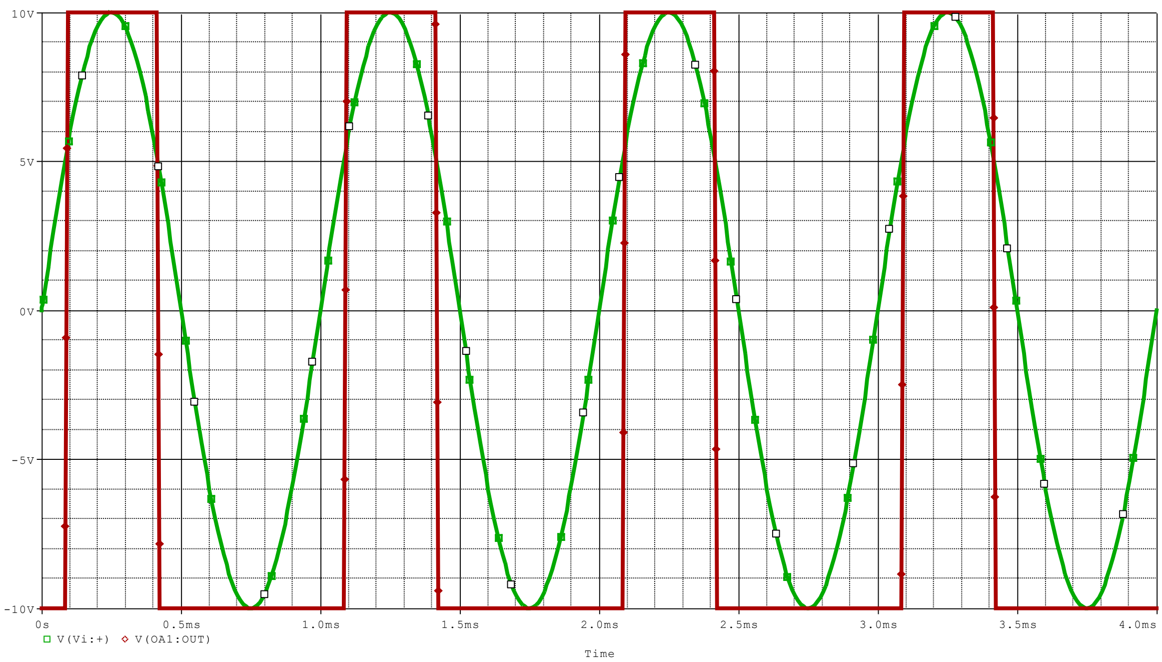
OpAmp comparador:

$$v_i > V_{ref} \rightarrow v_o = V_{sat}^{+} = +10\text{ V}.$$
$$v_i < V_{ref} \rightarrow v_o = V_{sat}^{-} = -10\text{ V}.$$

Situação $R_2 = R_1 \;\; \rightarrow \;\; V_{ref} = 0\,V$, simulação com v_i sinusoidal:



Situação $R_2 = 3 \times R_1 \;\; \rightarrow \;\; V_{ref} = 5\,V$, simulação com v_i sinusoidal:



Repare que o sinal rectangular à saída v_o comuta quando o sinal de entrada v_i passa pelo valor V_{ref}.

b) Indique os períodos de condução dos díodos D_1 e D_2 nos gráficos da alínea anterior.

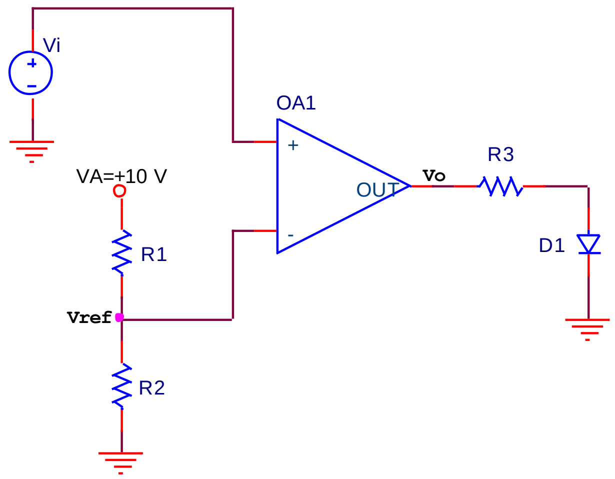
R.:

Díodo D_1 conduz quando $v_i > V_{ref}$, porque neste caso $v_o = V_{sat}^{+} = +10\text{ V}$.

Díodo D_2 conduz quando $v_i < V_{ref}$, porque neste caso $v_o = V_{sat}^{-} = -10\text{ V}$.

Resolva o exercício 3 desta secção.

5. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão DC V_A=10 V, três resistências R_1, R_2 e R_3, um díodo LED D_1 com V_{D0}=2 V e R_D=0 Ω, uma fonte de tensão variável $v_i(t)$ e um amplificador operacional OA_1 que funciona como comparador com tensões de saturação V_{sat}^+=10 V e V_{sat}^-=0 V.



a. Considerando $R_1=R_2$=10 kΩ e R_3=1 kΩ, calcule a gama de valores de v_i para a qual o díodo D_1 conduz. Nesta situação calcule também a corrente que percorre o díodo.

b. Querendo que o díodo LED emita luz quando o sinal v_i apresenta valores superiores a 7,5 V e que nesta condição a corrente no díodo seja 16 mA, dimensione um conjunto de valores para R_1, R_2 e R_3.

c. Na situação da alínea (a) esboce o sinal $v_o(t)$ para um sinal $v_i(t)=5 + 5\times\sin(\omega t)$ V.

R.: (a)
Tensão na entrada inversora V_m do OpAmp

$$V_m = V_{ref} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_A = 5\,V$$

Tensão na entrada não-inversora V_p do OpAmp

$$V_p = v_i$$

OpAmp comparador, tensão à saída v_o

$V_p > V_m \;\rightarrow\; v_o = V_{sat}^+$ $\qquad\qquad$ $V_p < V_m \;\rightarrow\; v_o = V_{sat}^-$

O díodo conduz com polarização directa para o caso $v_o = V_{sat}^+ = 10\,V$.
Assim, o díodo conduz para tensões $v_i > 5\,V \quad (V_p > V_m)$.
No circuito ligado à saída do OpAmp, a corrente que percorre o díodo $i_D = \frac{V_{sat}^+ - V_{D0}}{R_3} = 8\,mA$.

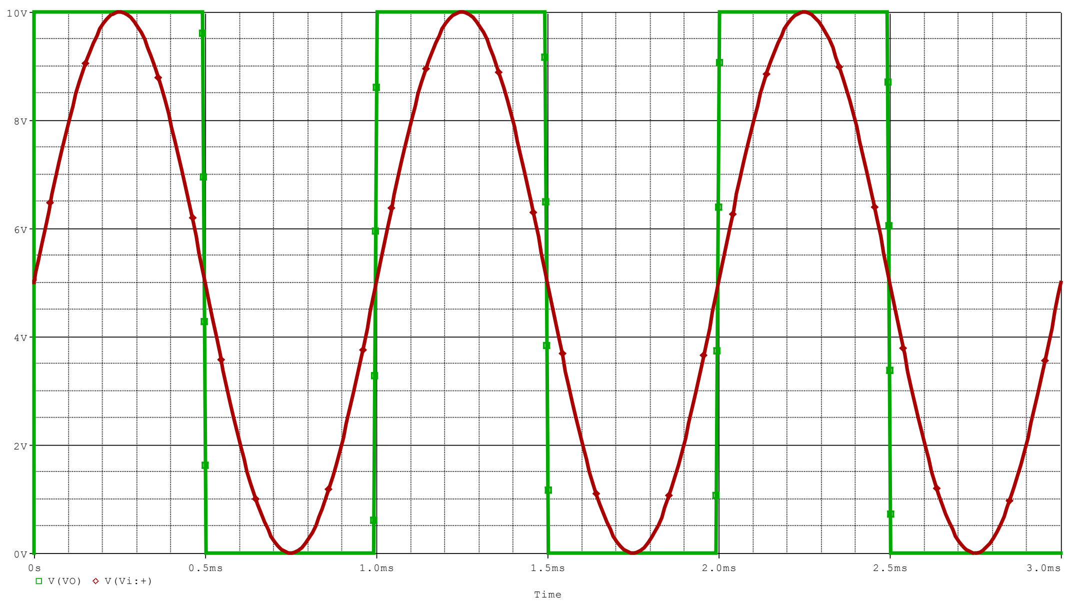
R.: (b)
Escolhe-se um valor para R_1 (ou R_2) e calcula-se R_2 (ou R_1) e R_3.

Pretende-se $V_{ref} = 7{,}5\,V$, ou seja $\frac{R_2}{R_2+R_1} = \frac{V_{ref}}{V_A} = 0{,}75 = \frac{3}{4}$.
Consegue-se esta razão de tensões com $R_2 = 3R_1$, por exemplo $R_1 = 10\,k\Omega$ e $R_2 = 30\,k\Omega$.
$R_3 = \frac{V_{sat}^+ - V_{D0}}{i_D} = 500\,\Omega$.

R.: (c)

$v_i > V_{ref} = 5\,V \;\rightarrow\; v_o = V_{sat}^{+} = 10\,V$ $\qquad$ $v_i < V_{ref} = 5\,V \;\rightarrow\; v_o = V_{sat}^{-} = 0\,V$

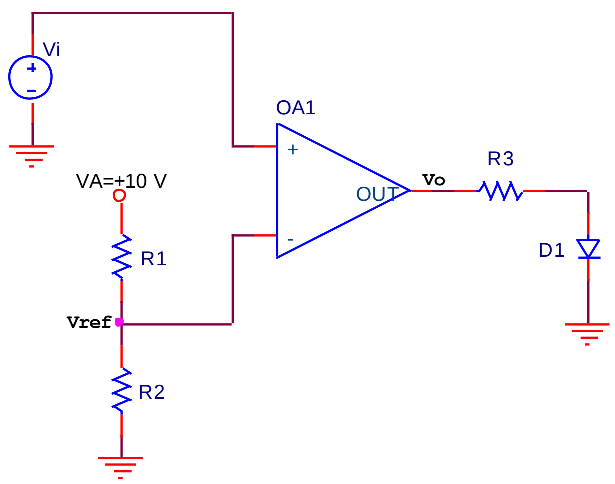
v_i a traço interrompido e v_o em traço contínuo no gráfico seguinte.



v_o é uma onda quadrada (*duty-cycle*=50%) de valores extremos $\begin{cases}10\,V\\ 0V\end{cases}$ e com frequência igual à do sinal v_i.

($f = 1\,kHz$ no exemplo escolhido para o gráfico que visualiza 3 períodos dos sinais.)

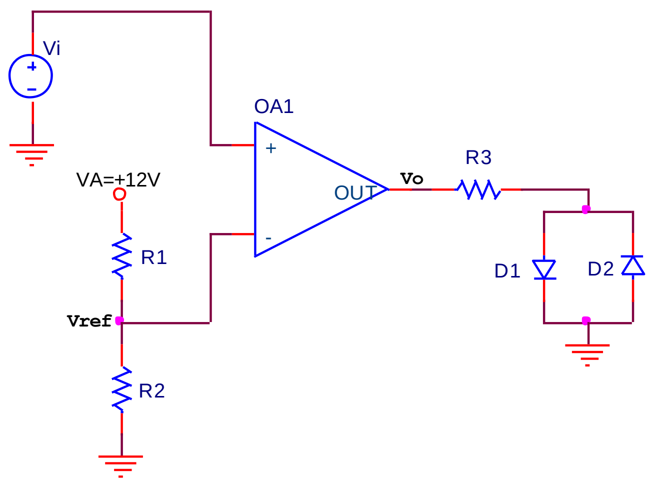
6. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão DC V_A=10 V, três resistências R_1, R_2 e R_3, um díodo LED D_1 com V_{D0}=2 V e R_D=0 Ω, uma fonte de tensão variável $v_i(t)$ e um amplificador operacional OA_1 que funciona como comparador com tensões de saturação V_{sat}^{+}=10 V e V_{sat}^{-}=0 V.



a. Considerando R_1=30 kΩ, R_2=10 kΩ e R_3=0,5 kΩ, calcule a gama de valores de v_i para a qual o díodo D_1 conduz. Nesta situação calcule também a corrente que percorre o díodo.

b. Considere $v_i(t)=3 + 4\times\sin(\omega t)$ V. Dimensione um conjunto de valores para R_1 e R_2, de modo a que o intervalo de tempo em que o LED emite luz é igual ao intervalo de tempo em que o LED está ao corte. Nesta situação, esboce o sinal $v_o(t)$.

7. O circuito seguinte contém uma fonte de tensão DC V_A=12 V, três resistências R_1, R_2 e R_3, dois díodos LED D_1 e D_2 com V_{D0}=2 V e R_D=0 Ω, uma fonte de tensão variável $v_i(t)$ e um amplificador operacional OA_1.



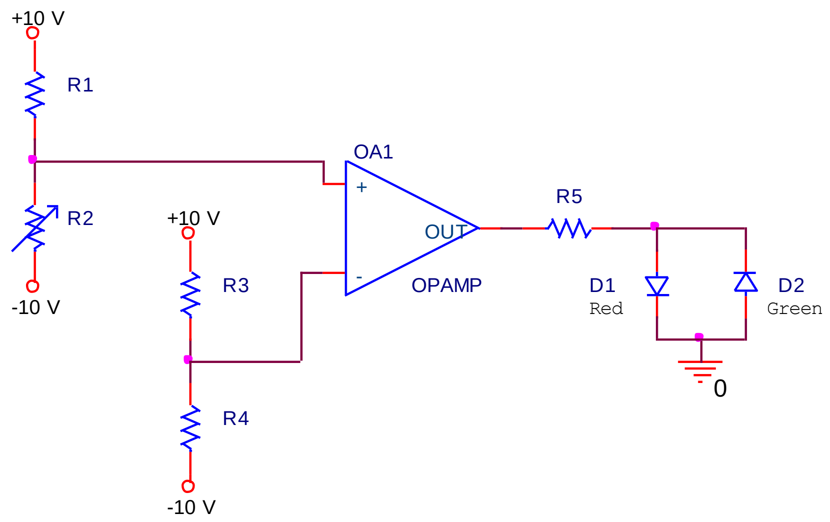
OA_1 funciona como comparador com tensões de saturação V_{sat}^+=12 V e V_{sat}^-=-12 V.

a. Considerando R_1=20 kΩ, R_2=10 kΩ e R_3=0,5 kΩ, calcule as gamas de valores de v_i para a condução dos díodos D_1 e D_2. Em cada situação calcule também a corrente que percorre o díodo.

b. Considere $v_i(t)=4{,}8+7\times\sin(2\pi\times10\times t)$ V. Dimensione um conjunto de valores para R_1 e R_2 de modo a que o intervalo de tempo em que o LED D_1 emite luz é igual ao intervalo de tempo em que o LED D_2 emite luz. Nesta situação, esboce o sinal $v_o(t)$. Calcule a duração do intervalo de tempo em que cada um dos LED emite luz.

8. O circuito seguinte contém um amplificador operacional OA_1 (OpAmp) a funcionar como comparador com $V_{SAT}^+=-V_{SAT}^-$=10 V, duas fontes de tensão de 10 V, cinco resistências R_1 a R_5, e dois díodos LED D_1 e D_2 de tensão em condução directa V_D=2 V (aproximada). R_2 é uma resistência variável.

As duas alíneas deste grupo correspondem a duas situações diferentes.



a.

R_2 é um termístor NTC com a variação ΔR=-100 Ω/°C, na gama de temperaturas de interesse, e de valor 13,5 kΩ à temperatura de 25 °C.

Considere R_1=5 kΩ, R_3=10 kΩ, R_4=30 kΩ e R_5=800 Ω.

Calcule o valor de temperatura, em Celsius, para a qual existe comutação no estado de condução dos díodos D_1 e D_2.

Calcule as gamas de valores de temperatura correspondentes à emissão de luz vermelha (red) e de luz verde (green).

Calcule as correntes que percorrem os díodos em cada caso de operação.

b.

R_2 é uma fotoresistência (LDR) de variação negativa do seu valor com a intensidade de luz incidente. R_2 é colocada de modo a receber luz do exterior de um edifício. Considere que os valores das resistências no circuito estão dimensionados de modo a um dos díodos emitir luz durante o dia e o outro díodo emitir luz durante a noite.

Qual o díodo que emite luz durante o dia, D_1 (vermelho) ou D_2 (verde)?

Atenção: justifique a sua resposta, não necessitando de calcular um conjunto de valores para as resistências.

R.: a.

Os dois divisores de tensão têm fontes de tensão iguais. Então a relação de valores de resistências deve ser igual para obter valores de tensão iguais nas duas entradas do OpAmp. Esta é a condição necessária para a situação de comutação no estado de condução dos díodos:

$v_p = v_m \quad \rightarrow \quad R_2/R_1 = R_4/R_3 = 3 \quad \rightarrow \quad R_2 = 15\ k\Omega$.

Calculamos agora a variação de resistência R_2 em relação a um valor conhecido de temperatura. De 13,5 kΩ (25 °C) para 15 kΩ, existe uma variação $\Delta R_2 = +1{,}5\ k\Omega$.

A partir do valor de variação do termístor $\Delta R_2 = -100\ \Omega/°\mathrm{C}$, calcula-se o valor de variação de temperatura $\Delta \mathrm{t} = \frac{1500\ \Omega}{-100\ \Omega/°\mathrm{C}} = -15\ °\mathrm{C}$.

Assim o valor de temperatura pedido é $\mathrm{t} = 25 + \Delta\mathrm{t} = 25 - 15 = 10\ °\mathrm{C}$.

Para temperaturas $\mathrm{t} > 10\ °\mathrm{C} \quad \rightarrow \quad v_p < v_m \quad \rightarrow \quad v_o = V_{Sat}^{-} = -10\ V \quad \rightarrow \quad D_2$ em condução e D_1 ao corte.

Para temperaturas $\mathrm{t} < 10\ °\mathrm{C} \quad \rightarrow \quad v_p > v_m \quad \rightarrow \quad v_o = V_{Sat}^{+} = +10\ V \quad \rightarrow \quad D_1$ em condução e D_2 ao corte.

Verifique que compreende bem o cálculo dos valores de tensão aos terminais de entrada do OpAmp, obtidos a partir dos valores dos divisores de tensão. Por exemplo para o primeiro caso, $\mathrm{t} > 10\ °\mathrm{C}$, a resistência $R_2 < 15\ k\Omega$ e a tensão v_p aproxima-se de -10 V, resultando $v_p < v_m$.

$I_D = \frac{v_o - V_D}{R_5} = 10\ mA$ é a corrente no díodo em condução. v_o é a tensão à saída do OpAmp.

b. Se compreendeu a alínea anterior, chegará facilmente à conclusão seguinte.

Durante o dia (maior intensidade de luz incidente) R_2 é menor, resultando $v_p < v_m$. É o díodo LED verde que está em condução.

Notas.

Tenha em atenção que a corrente nas duas entradas do OpAmp é nula e por isso pode considerar R_1/R_2 e R_3/R_4, em conjunto com as fontes DC de 10 V, como dois divisores de tensão. Recorde a função de comparação do OpAmp.

Recorde o cálculo destes divisores de tensão a partir do exercício B.8 do módulo "*Exercícios 1*".

As tensões v_p e v_m são as tensões nas entradas do OpAmp, não inversora e inversora respectivamente, referidas à massa. Este é o modo sistemático para a resolução do problema. Contudo, para o teste $v_p < v_m$ (ou $v_p > v_m$) pode considerar os cálculos das duas tensões para qualquer referência, desde que utilize a mesma referência nas duas tensões. Por exemplo neste exercício pode utilizar os valores das tensões nas resistências R_2 e R_4 para o teste, $v_p = v_{R_2}$ e $v_m = v_{R_4}$.

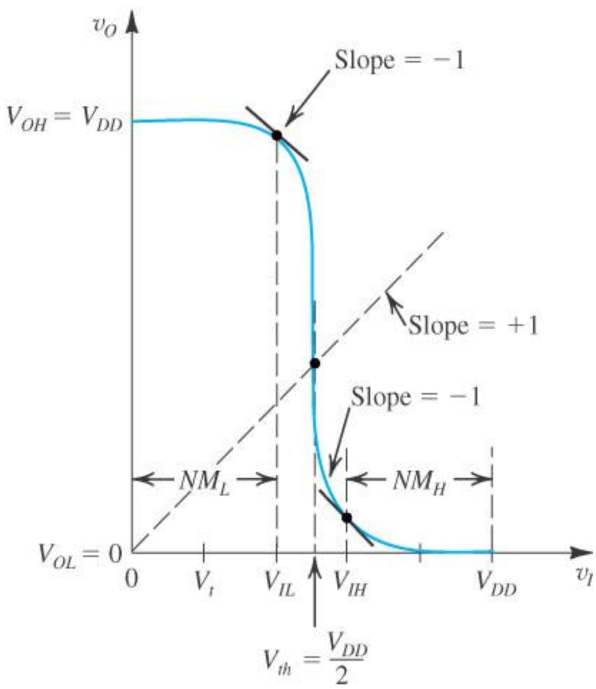
Tenha cuidado. Utilize uma convenção que compreenda bem.

P. MOSFET – tecnologia CMOS

Alguns símbolos utilizados para transístor canal N (NMOS) e transístor canal P (PMOS).

NMOS PMOS

No 1º símbolo identifica-se o terminal fonte (source) pela seta. No 2º símbolo não se distinguem os terminais fonte (source) e dreno (drain). O 3º símbolo inclui um 4º terminal, o substrato (body), e identifica-se o terminal fonte (source) pela proximidade do terminal porta (gate).



VTC

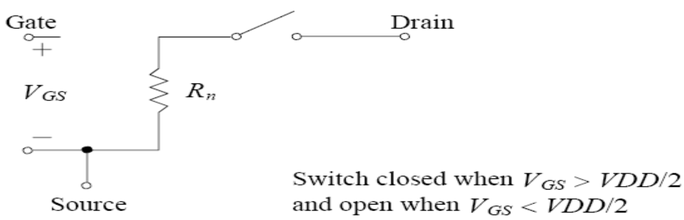
Característica de transferência de tensão de um inversor CMOS, $v_O = f(v_I)$

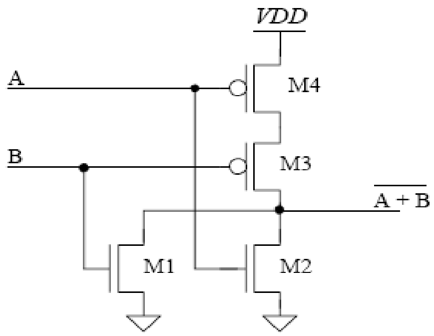
Caracterização da porta lógica:

- valores de saída high e low (V_{OH}, V_{OL})
- valores de entrada high e low (V_{IH}, V_{IL})
- margem de ruído para valores high ($NM_H = V_{OH} - V_{IH}$)
- margem de ruído para valores low ($NM_L = V_{IL}$-V_{OL})
- ponto de comutação V_{SP} (=V_{th})

Nota: o ponto de comutação do gráfico da figura ($V_{DD}/2$) é um caso exemplo ideal.

1. Considere modelos simples de comutação para os transístores MOSFET (NMOS e PMOS), constituídos por uma resistência (R_n e R_p) e um interruptor (*switch*). A figura seguinte exemplifica o circuito para um modelo de um transístor NMOS. O transístor PMOS opera com tensão V_{GS} negativa (V_{GS}<-V_{DD}/2 → interruptor aberto, com alimentação V_{DD} positiva).

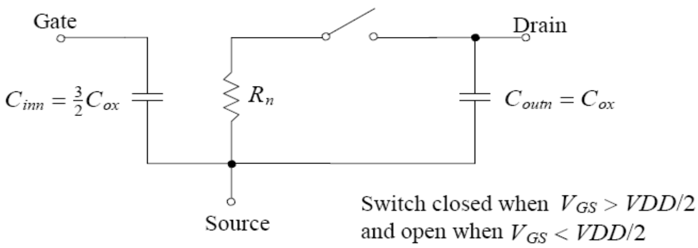




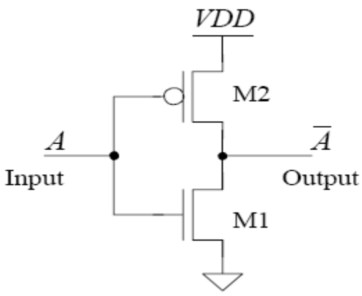
Considere V_{DD}=5 V e valores lógicos LOW=0 V e HIGH=V_{DD}=5 V. Considere o circuito seguinte com entradas A e B e saída no nó $\overline{A+B}$. Verifique esta função a partir dos modelos de comutação dos transístores descritos acima.

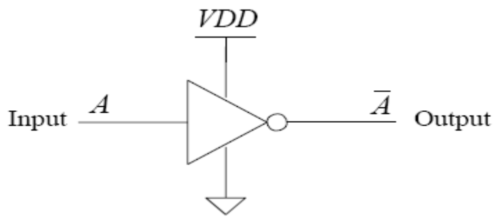
Nota ao esquema: nos NMOS (M_1 e M_2) a *source* é o terminal inferior, nos PMOS (M_3 e M_4) a *source* é o terminal superior, e a gate (NMOS e PMOS) é o terminal ligado a uma entrada.

2. Considere modelos (de comutação) para os transístores NMOS e PMOS constituídos por uma resistência (R_n e R_p), um interruptor (*switch*) e capacidades de entrada (C_{inn} e C_{inp}) e de saída (C_{outn} e C_{outp}). A figura seguinte exemplifica o circuito para um modelo simples do transístor NMOS.

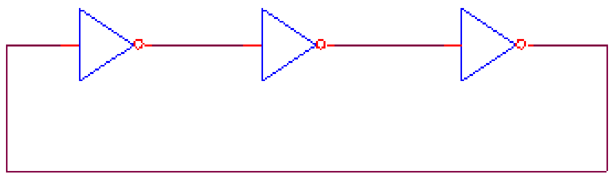


Considere um inversor CMOS, conforme a figura seguinte.





Considere um oscilador em anel com três inversores iguais ($n = 3$), conforme a figura seguinte.



Calcule a frequência de oscilação do circuito com os seguintes valores para os parâmetros dos modelos dos transístores: R_n=R_p=3,4 kΩ, C_{oxn}=600 aF, C_{oxp}=1,2 fF.

R.:

Capacidade à entrada ou saída de cada inversor:

$$C_{tot} = C_{out} + C_{in} = C_{oxp} + C_{oxn} + \frac{3}{2}\left(C_{oxp} + C_{oxn}\right) = \frac{5}{2}\left(C_{oxp} + C_{oxn}\right) = 4{,}5\,fF$$

Tempos de propagação (atraso):

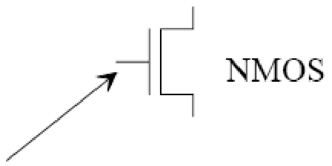
$$t_{PHL} + t_{PHL} = 0{,}7\left(R_n + R_p\right)C_{tot} = 21{,}4\,ps$$

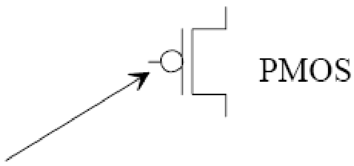
Frequência de oscilação:

$$f_{osc} = \frac{1}{n(t_{PHL} + t_{PLH})} = 15{,}6\,GHz$$

São consideradas apenas as capacidades intrínsecas dos inversores. São desprezadas as capacidades das interligações e outras cargas, como por exemplo a que é introduzida por um equipamento de medida.

Nos problemas seguintes considere o modelo de comutação constituído por um interruptor:





Valor lógico 1 activa (fecha) o interruptor
- MOSFET em condução

Valor lógico 0 desactiva (abre) o interruptor
- MOSFET ao corte

Valor lógico 0 activa (fecha) o interruptor
- MOSFET em condução

Valor lógico 1 desactiva (abre) o interruptor
- MOSFET ao corte

Tensões: Valor lógico 1, HIGH → V_{DD}
Valor lógico 0, LOW → V_{SS}=GND

3. Construa os circuitos estáticos CMOS para as expressões seguintes:

a. $Y = f(A,B) = \bar{A}B$ b. $Y = f(A,B,C,D) = \overline{A(B+CD)}$

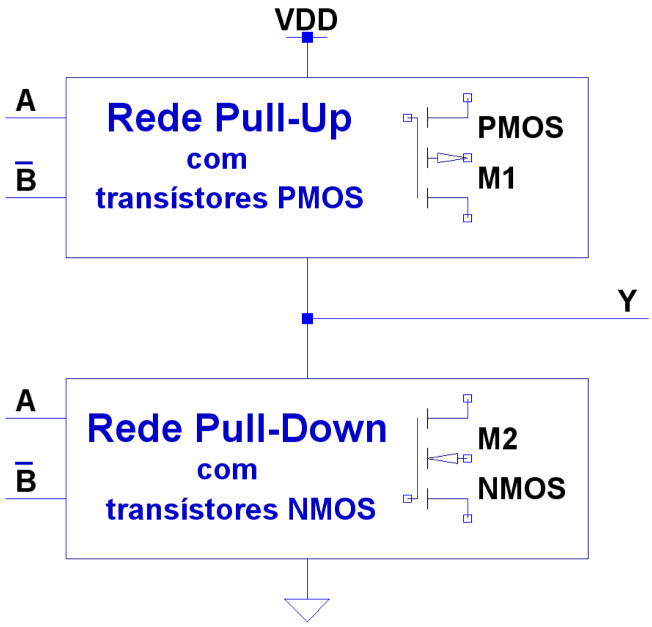
R.: a.

$Y = \bar{A}B$ para sintetizar a PUN – Rede $Pull-Up$

Para a rede pull-up de transístores PMOS (PUN), a expressão da saída não negada em função das entradas negadas. Se contém variáveis não negadas são necessários inversores adicionais para as gerar.

$\bar{Y} = A + \bar{B}$ para sintetizar a PDN – Rede $Pull-Down$

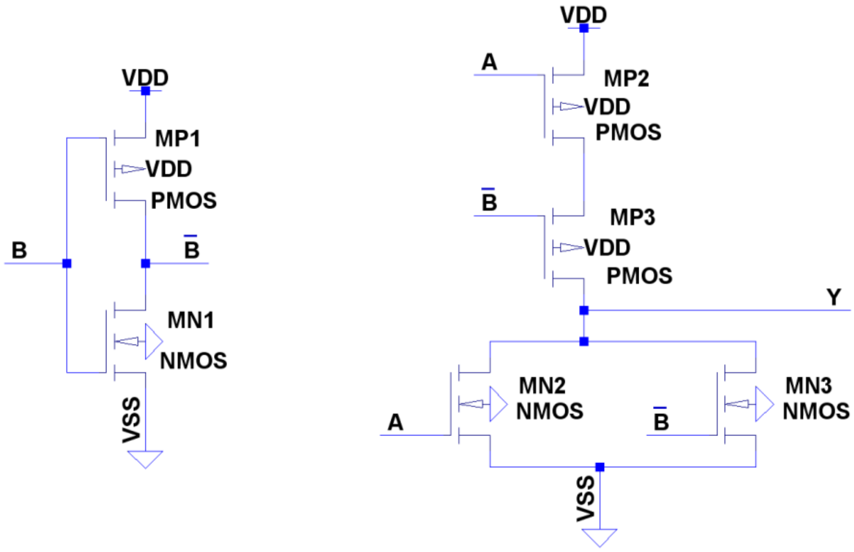
Para a rede pull-down de transístores NMOS (PDN), a expressão da saída negada em função das entradas não negadas. Se contém variáveis negadas são necessários inversores adicionais para as gerar.



As redes Pull-Up e Pull-Down utilizam transístores em paralelo para a função OR e transístores em série para a função AND.
Nota: esta notação OR e AND refere-se ao fluxo de corrente e à condução.

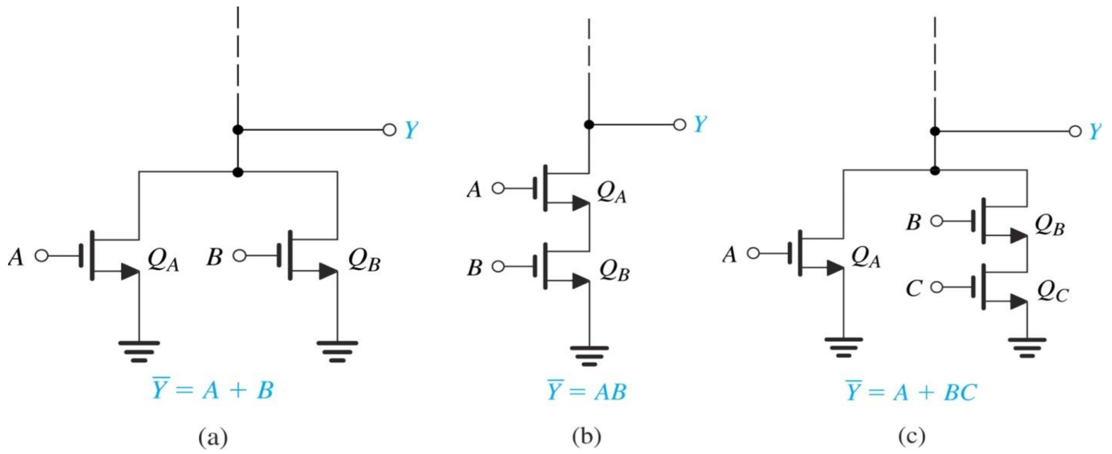
A rede Pull-Up pode ser obtida a partir da rede Pull-Down, e vice-versa, utilizando a propriedade da dualidade.

No nosso exemplo, é necessário um inversor para obter $\bar{B}$. O circuito seguinte apresenta a solução.

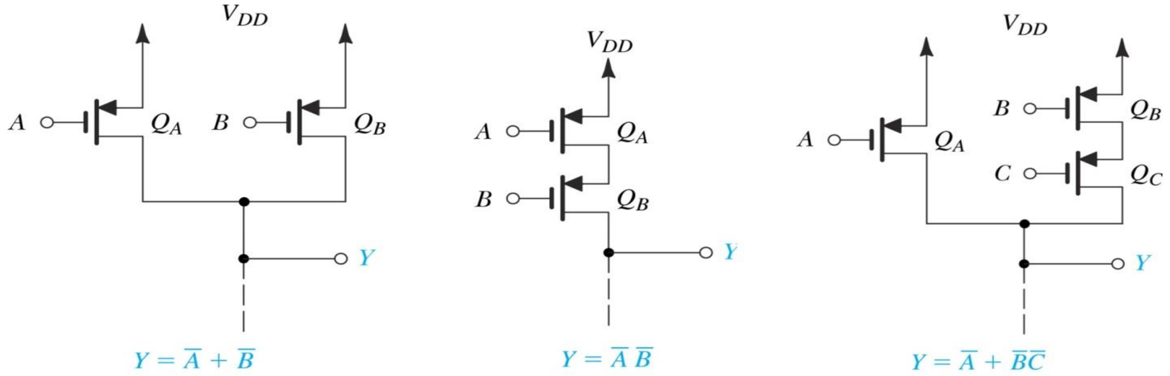


No circuito acima, a parte da esquerda é o inversor que obtém $\bar{B}$ a partir de B. A parte da direita corresponde ao esquema anterior com as redes $Pull - Up$ e $Pull - Down$.

4. Indique as expressões $Y = f(A, B)$ ou $Y = f(A, B, C)$ das redes pull-down seguintes:



5. Indique as expressões $Y = f(A,B)$ ou $Y = f(A,B,C)$ das redes pull-up seguintes:



(a) (b) (c)

6. Construa o circuito para a função $Y = XNOR(A,B)$: $Y = AB + \bar{A}\bar{B}$.

R.: Apresentam-se 3 soluções.

<u>Solução I</u>

$Y = A.B + \bar{A}.\bar{B}$ para a PUN

$\bar{Y} = A.\bar{B} + \bar{A}.B$ para a PDN

<u>Solução II</u>

$Y = A.B + \bar{A}.\bar{B}$ para a PUN

Rede dual da PUN para a PDN

[compare a PDN com a expressão $\bar{Y} = (\bar{A} + \bar{B}).(A + B) = A.\bar{B} + \bar{A}.B$]

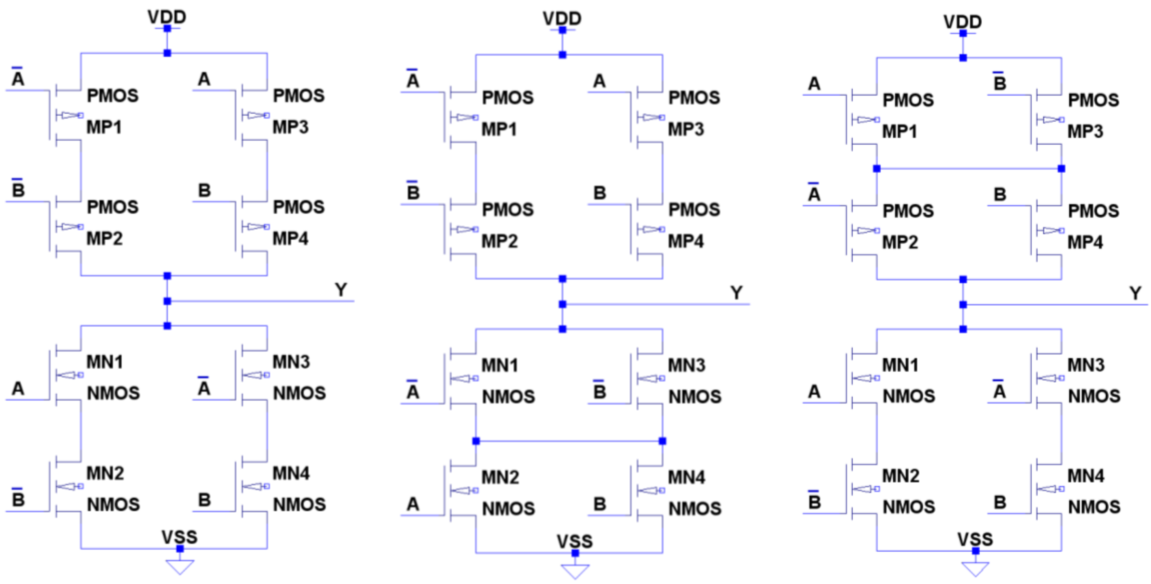
<u>Solução III</u>

$\bar{Y} = A.\bar{B} + \bar{A}.B$ para a PDN

Rede dual da PDN para a PUN

[compare a PUN com a expressão $Y = A.B + \bar{A}.\bar{B} = (A + \bar{B}).(\bar{A} + B)$]

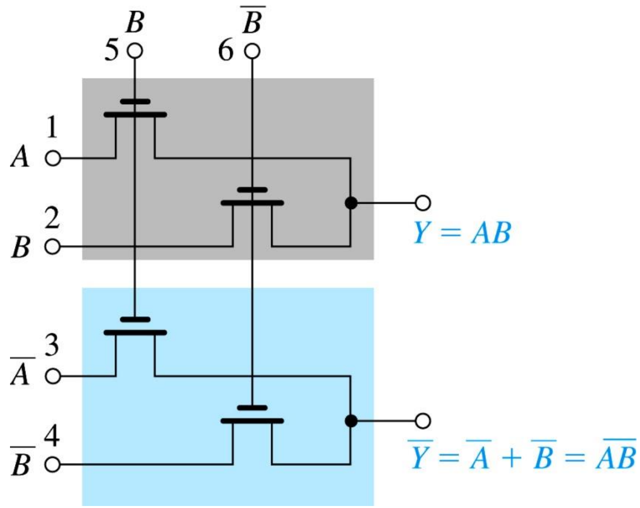
Esquema dos três circuitos:



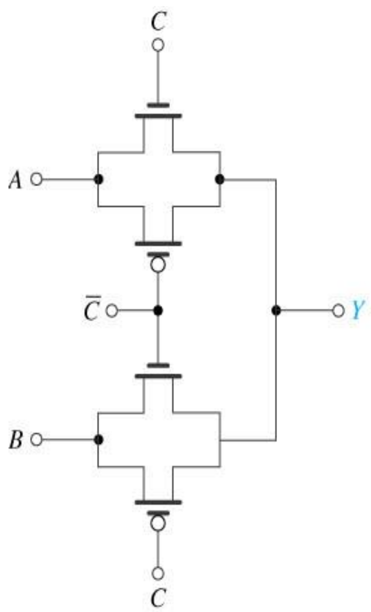
I II III

Nota: os esquemas não incluem as ligação dos substratos dos transístores e também não incluem os inversores necessários para gerar $\bar{A}$ e $\bar{B}$.

7. Verifique as expressões para os circuitos seguintes com portas de passagem.



8. Indique a expressão $Y = f(A, B, C)$ para o circuito seguinte com portas de transmissão. Explique como obtém a função XOR a partir deste circuito. Neste caso, considere que tem entradas disponíveis: $A,\ B,\ \bar{A}\ e\ \bar{B}$.



R.: $Y = f(A, B, C) = AC + B\bar{C}$, MUX 2→1.

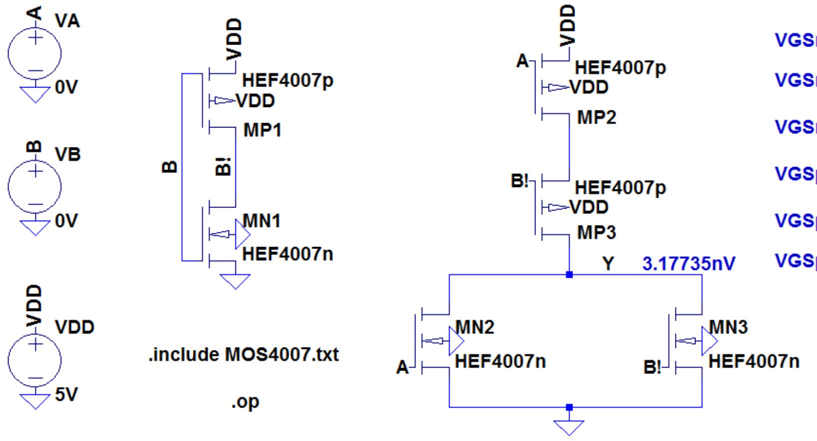
$Y = A\bar{B} + \bar{A}B\ \rightarrow$ substituir as entradas $A,\ B\ e\ C$: $A \rightarrow A,\ \ B \rightarrow \bar{A},\ \ C \rightarrow \bar{B},\ \ \bar{C} \rightarrow B$.

(CPL – *complementary pass-transistor logic*)

9. Para o circuito do exercício $3a$, efectue uma simulação para todas as entradas possíveis e obtenha os valores de tensão V_{GS} e V_{DS} de todos os transístores. A partir destes valores, conclua sobre o estado de funcionamento de cada transístor.

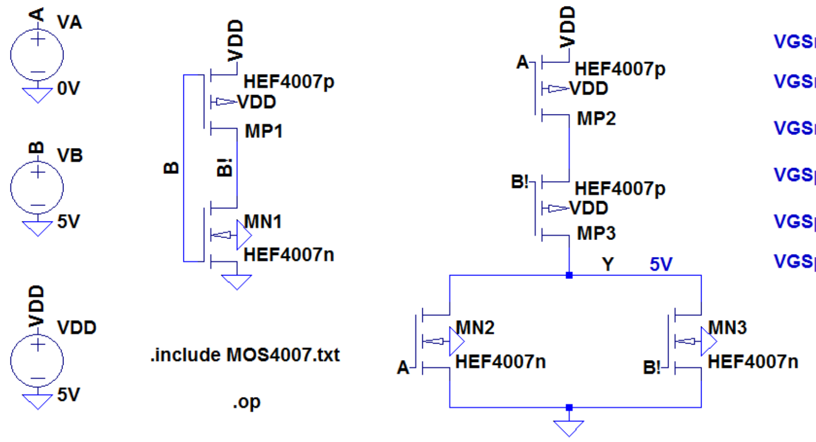
R.: Deduza o estado on/off dos MOSFET a partir dos resultados de simulação seguintes. Considere $unidades\ e\ dezenas\ de\ nV \approx 0V$.

$AB = 00 \;\rightarrow\; Y = 0$



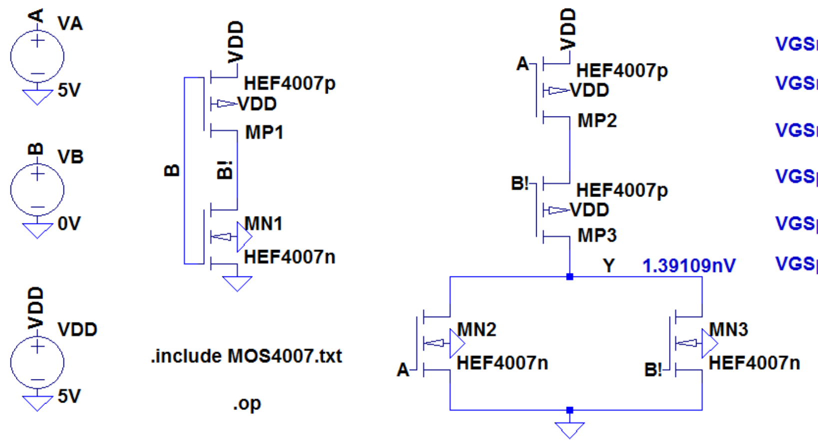
VGSn1=	0V	VDSn1=	5V
VGSn2=	0V	VDSn2=	3.17735nV
VGSn3=	5V	VDSn3=	3.17735nV
VGSp1=	-5V	VDSp1=	0V
VGSp2=	-5V	VDSp2=	-4.90196nV
VGSp3=	4.90196nV	VDSp3=	-5V

$AB = 01 \;\rightarrow\; Y = 1$



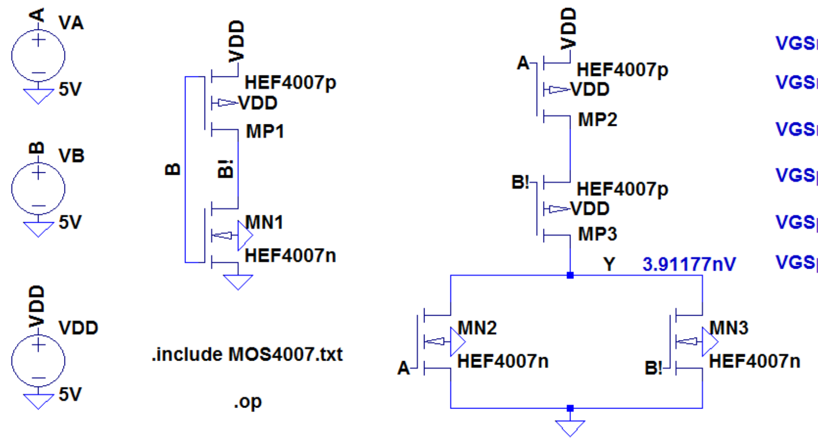
VGSn1=	5V	VDSn1=	3.17737nV
VGSn2=	0V	VDSn2=	5V
VGSn3=	3.17737nV	VDSn3=	5V
VGSp1=	0V	VDSp1=	-5V
VGSp2=	-5V	VDSp2=	-19.5501nV
VGSp3=	-5V	VDSp3=	19.5501nV

$AB = 10 \;\rightarrow\; Y = 0$



VGSn1=	0V	VDSn1=	5V
VGSn2=	5V	VDSn2=	1.39109nV
VGSn3=	5V	VDSn3=	1.39109nV
VGSp1=	-5V	VDSp1=	0V
VGSp2=	0V	VDSp2=	-1.245V
VGSp3=	1.245V	VDSp3=	-3.755V

$AB = 11 \;\rightarrow\; Y = 0$



VGSn1=	5V	VDSn1=	3.17737nV
VGSn2=	5V	VDSn2=	3.91177nV
VGSn3=	3.17737nV	VDSn3=	3.91177nV
VGSp1=	0V	VDSp1=	-5V
VGSp2=	0V	VDSp2=	-2.43121V
VGSp3=	-2.56879V	VDSp3=	-2.56879V