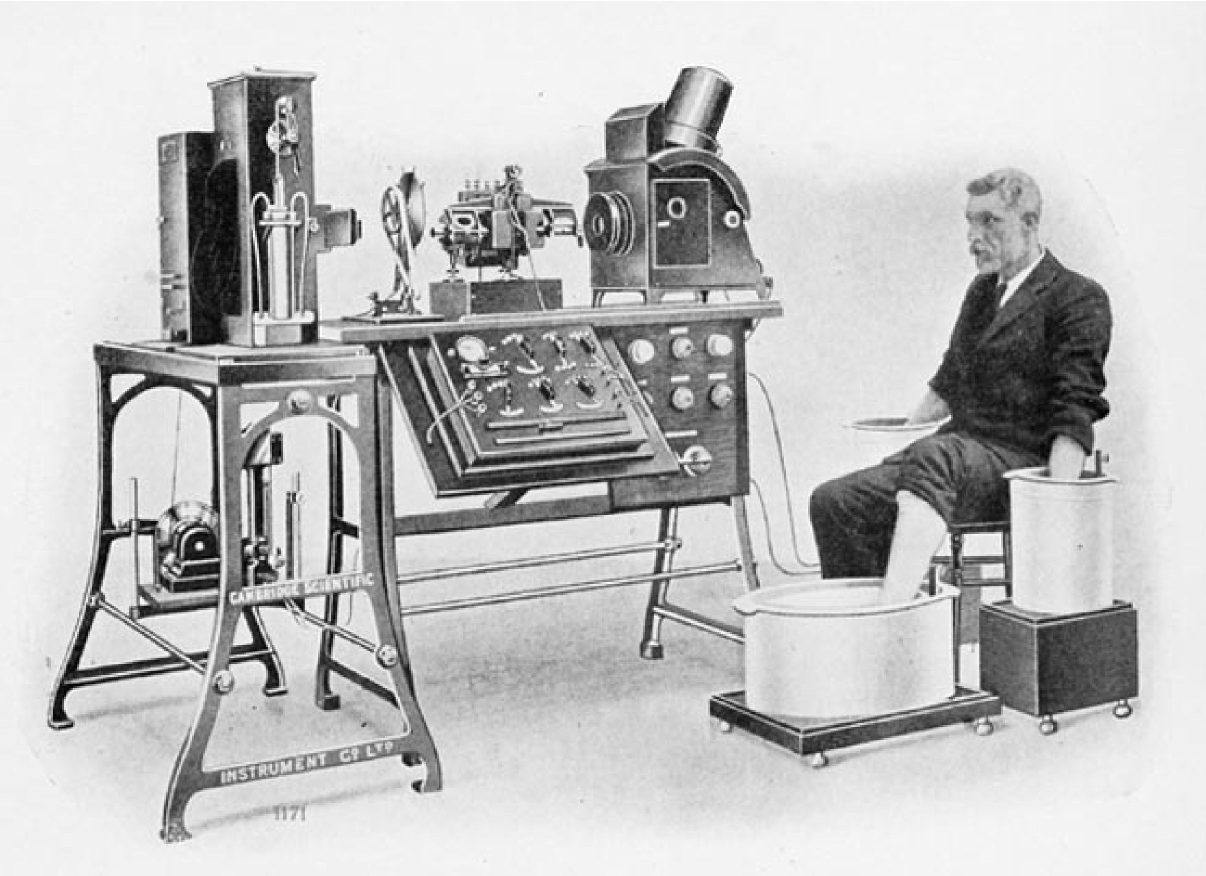
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Princípios de Instrumentação Biomédica – COB781

Módulo 3



PHOTOGRAPH OF A COMPLETE ELECTROCARDIOGRAPH, SHOWING THE MANNER IN WHICH THE ELECTRODES ARE ATTACHED TO THE PATIENT, IN THIS CASE THE HANDS AND ONE FOOT BEING IMMERSED IN JARS OF SALT SOLUTION

Conteúdo

3 Teoremas e análise sistemática de redes

3.1 Revisão de definições

Revisando os conceitos anteriores podemos classificar os circuitos como: Circuitos Lineares: cada elemento do circuito é linear ou uma fonte independente. Circuito Invariante: cada elemento do circuito é invariante ou uma fonte independente. Circuito Linear e Invariante: cada elemento do circuito é linear e invariante ou uma fonte independente. Circuitos Não Lineares ou Variantes: aqueles que não são lineares ou não são invariantes.

Nestas definições as fontes independentes precisam ser tratadas separadamente pois elas exercem um papel diferente do das outras variáveis de rede dos outros elementos. Além disto todas as fontes independentes são elementos não lineares (sua característica é uma linha reta que não passa pela origem).

3.2 Teoremas de rede e transformações de fontes

Apesar das leis de Kirchhoff se aplicarem a todas as classes de problemas que serão estudados nesta disciplina nem sempre seu uso é direto. Algumas vezes é necessário montar sistemas de equações para solucionar um determinado problema. Computacionalmente falando isto não representa um problema porém para análise manual de circuitos a solução de sistemas de equações com ordem superior a três pode se tornar bastante trabalhosa. Adicionalmente, durante o projeto de circuitos, estas técnicas podem não ser de muita utilidade.

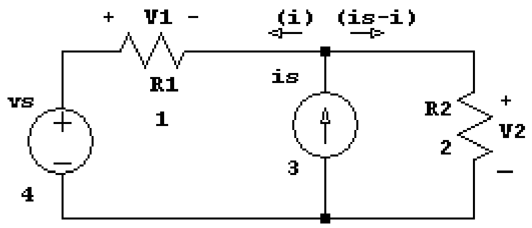
Para nossa sorte, muitas vezes é possível calcular uma determinada variável de rede simplificando a rede original. Isto pode ser realizado utilizando-se alguns teoremas, associações e transformações de elementos. Estas simplificações podem ser aplicadas sem medo desde que a resposta desejada não se encontre junto aos elementos simplificados. Quando as simplificações forem realizadas eliminando ou modificando a resposta desejada deve se ter o cuidado de retornar ao problema original para desfazer as simplificações iniciais.

3.2.1 Teorema da Superposição

Seja uma **rede linear**, que apresente apenas uma resposta para o conjunto de excitação (conjunto de **fontes independentes** que excita o circuito), independente dos elementos serem variáveis ou não com o tempo, então a resposta da rede causada por várias fontes independentes é a soma as respostas devidas a cada fonte independente agindo sozinha.

Em outras palavras, se desejarmos analisar um circuito que contenha muitas fontes independentes podemos analisar a resposta da rede (circuito) para cada fonte em separado (considerando que as demais fontes têm valor nulo – curto circuito para as fontes de tensão e circuito aberto para as fontes de corrente) e depois somar todas as respostas.

Exemplo: Calcular V_1 e V_2 .



Pela LTK temos que $v_2 = v_s - v_1$

logo $(3-i)\cdot 2 = 4 + i\cdot 1$, de onde se obtém $i = \frac{2}{3} A$

Então: $v_1 = \frac{-2}{3} V$ e $v_2 = 2\cdot(3-i) = \frac{14}{3} V$

Por superposição temos que $v_2 = v_2(v_s) + v_2(i_s)$ e $v_1 = v_1(v_s) + v_1(i_s)$

então $v_2 = \left[\frac{v_s}{R_1+R_2}\cdot R_2\right] + \left[i_s\cdot R_{EQ}\right] = \frac{4}{3}\cdot 2 + 3\cdot\frac{2}{3} = \frac{14}{3} V$ e

$$v_1 = \left[\frac{v_s}{R_1+R_2}\cdot R_1\right] + \left[-i_s\cdot R_{EQ}\right] = \frac{4}{3}\cdot 1 - 3\cdot\frac{2}{3} = \frac{-2}{3} V$$

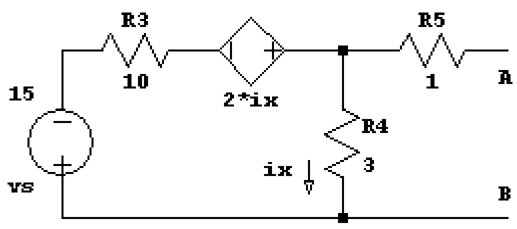
3.2.2 Teorema de Thévenin-Norton

Seja uma **rede linear** ligada a uma carga por dois de seus terminais de forma que a única interação entre rede e carga se dá através destes terminais, então o teorema de Thévenin-Norton afirma que as formas de onda de tensão e corrente nestes terminais não se afetam se a rede for substituída por uma rede Thévenin equivalente ou Norton equivalente.

Para se obter esta rede equivalente basta determinar a relação v x i nos terminais da rede. Isto pode ser realizado de forma genérica aplicando-se uma fonte de corrente de valor I_0 nos terminais da rede e determinando a equação da tensão sobre esta fonte.

Quando a rede em análise apresenta apenas elementos lineares e fontes independentes podemos obter os equivalentes Thévenin ou Norton da seguinte maneira: 1) A determinação da tensão de Thévenin corresponde a tensão entre os terminais para os quais estamos buscando o equivalente (os terminais devem ser mantidos em circuito aberto). 2) A determinação da corrente de Norton corresponde a corrente que circularia pelos terminais para os quais se deseja determinar o equivalente (curto circuitar os terminais). 3) A resistência pode ser obtida pela divisão da tensão de Thévenin pela corrente de Norton. Alternativamente a resistência pode ser calculada substituindo as fontes independentes pela sua resistência interna ($R=0$ para fonte de tensão e $R=\infty$ para fonte de corrente) e determinando a resistência equivalente nos terminais para os quais se deseja determinar o equivalente (neste caso não pode haver fontes dependentes no circuito).

Exemplo: Determinar os equivalentes Thévenin e Norton entre os terminais A e B da rede abaixo.



Thévenin – terminais A e B mantidos em aberto: $V_{TH}=V_{AB}$

$$V_{TH}=ix\cdot R_4=ix\cdot 3$$

$$v_s + R_3 \cdot ix - 2 \cdot ix + R_4 \cdot ix = 0$$

$$ix = \frac{-15}{10-2+3} = \frac{-15}{11}$$

$$V_{TH} = \frac{-15}{11} \cdot 3 = \frac{-45}{11} V$$

Norton – terminais *A* e *B* mantidos em curto circuito: $I_N = i_{R5}$ (da esquerda para a direita)

considerando $I_{Tot} = ix + i_{R5}$ e $G_{EQ} = G_4 + G_5$

então $ix = \frac{1}{4} \cdot i_T$ e $I_N = \frac{3}{4} \cdot i_T$ (divisor de corrente)

$$v_s + R_3 \cdot i_T - 2 \cdot ix + R_{EQ} \cdot i_T = 0$$

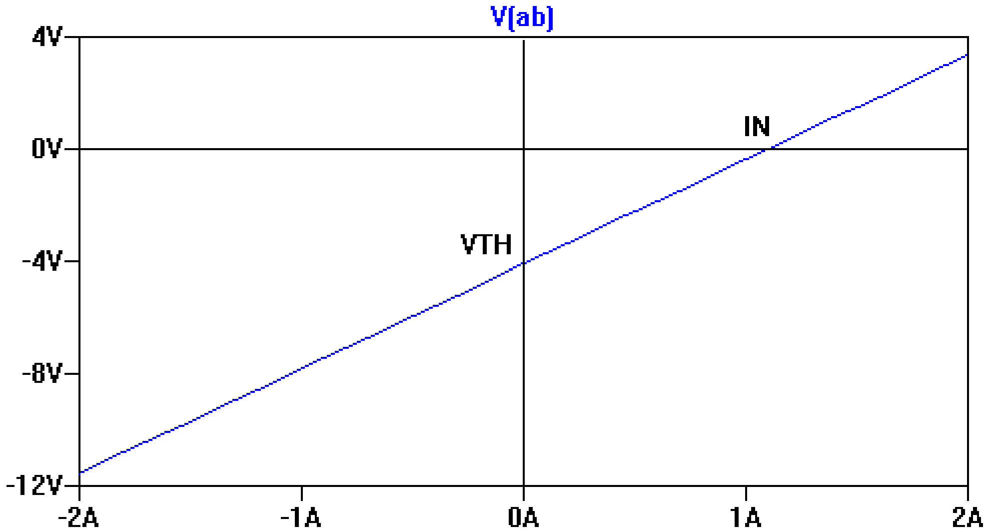
$$v_s + R_3 \cdot i_T - 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot i_T + R_{EQ} \cdot i_T = 0$$

$$i_T = \frac{-15}{10 - \frac{2}{4} + \frac{3}{4}} = \frac{-60}{41}$$

$$I_N = \frac{3}{4} \cdot \frac{-60}{41} = -\frac{45}{41} A$$

Com os sentidos estabelecidos para tensão e corrente

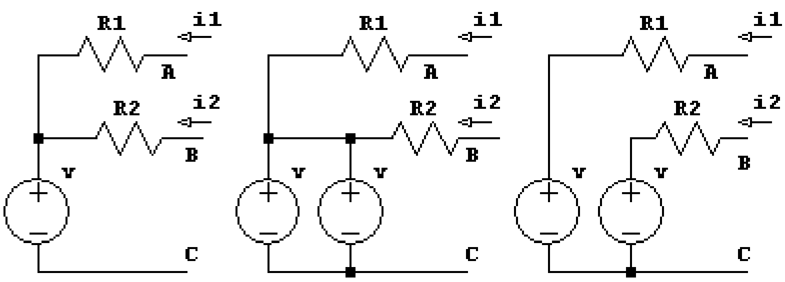
$$R = \frac{V_{TH}}{I_N} = \frac{41}{11} \Omega$$



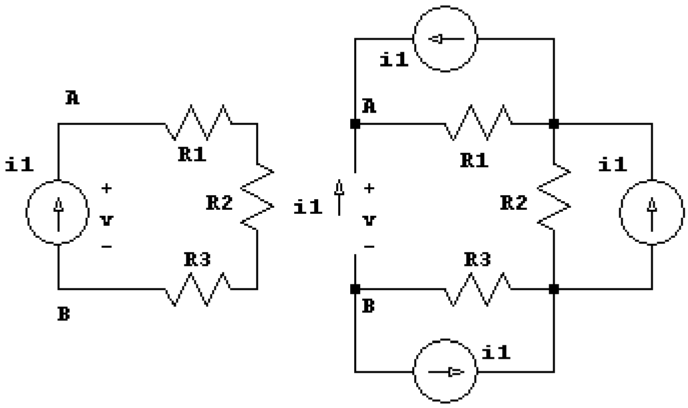
3.2.3 Explosão de fontes

Algumas vezes é interessante transformar uma fonte independente em muitas outras de forma a simplificar a análise do restante do circuito que permanece inalterado. Quando isto é feito chamamos de transformação, ou explosão, de fontes.

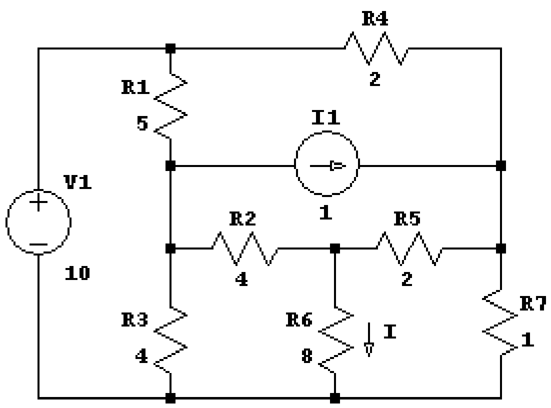
Uma fonte de tensão independente que tenha um de seus terminais ligados a mais de um elemento de circuito pode ser desmembrada, removendo este nó desde que cada elemento permaneça interligado em série com uma fonte de tensão de mesmo valor e polaridade. A figura abaixo ilustra o fato. Uma fonte *v* se conecta aos resistores R_1 e R_2. Ela pode ser desmembrada em duas fontes em paralelo de mesmo valor e polaridade e, finalmente, separadas de forma que cada uma fique em série com um dos resistores R_1 ou R_2. Do ponto de vista de circuito as formas de onda de tensão e corrente nos terminais A, B e C permanecem inalteradas.



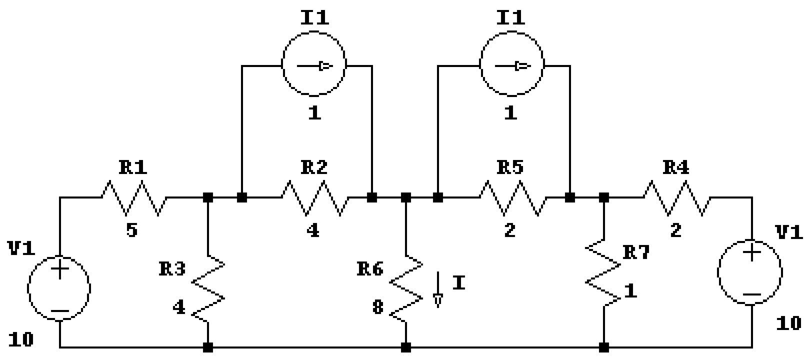
Um procedimento semelhante pode ser realizado com as fontes de corrente. Neste caso uma fonte que interligue dois pontos de um circuito pode ser substituída por outras tantas desde que percorram um outro caminho que uma os mesmos dois pontos unidos pela fonte original. A figura abaixo ilustra esta situação. Uma fonte de corrente faz circular uma corrente *i1* do nó B para o nó A. Em paralelo com esta fonte há um outro caminho, formado pelos resistores R_1, R_2 e R_3, interligando o nó B ao nó A. Então a fonte de corrente original pode ser removida e outras podem ser colocadas em paralelo com estes resistores. Observe que a corrente *i1* movimentada pela fonte em paralelo com R_3 e deslocada pela fonte em paralelo com R_2 e esta corrente é deslocada pela fonte em paralelo com R_1 de forma que toda a corrente que saiu do nó B chegou ao nó A sem alterar o restante do circuito.



Exemplo: No circuito abaixo deseja-se calcular o valor da corrente I mas sem montar um sistema de equações pela LCK nem LTK. Mostre uma forma de fazer.



Explodindo as fontes V_1 e I_1 e redesenhando o circuito obtemos



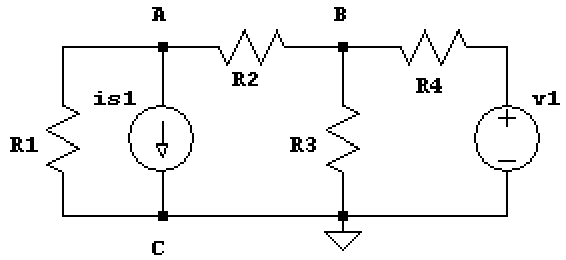
deste ponto em diante basta fazer transformações sucessivas de modelos Thévenin e Norton além de algumas associações de resistores. $I = 0{,}332\,A$

3.3 Análise de nós e malhas

Quando a simplificação de circuitos não é possível, ou se deseja resolvê-lo com auxilio de ferramentas computacionais a aplicação da LCK e da LTK é a maneira de resolver o problema. Para facilitar a análise é possível sistematizar o equacionamento da LCK e da LTK como segue.

3.3.1 Análise de nós

Para ilustrar esta técnica de resolução sistemática de circuitos considere a figura abaixo.



Contar os nós essenciais (nós A, B e C). Como as tensões V_{AC} V_{BC} e V_{AB} se relacionam pela lei das tensões de Kirchhoff, apenas duas destas tensões são independentes, a terceira é uma combinação linear das anteriores. Sendo assim é possível escrever duas equações de tensão de nós independentes. Quaisquer duas tensões podem ser utilizadas mas normalmente se escolhem as tensões com relação ao nó referência. Assim chamamos de tensão de nó a diferença de tensão entre o potencial de um nó com relação à referência. No exemplo abaixo as tensões de nó serão V_A e V_B. Assim, para cada *n* nós essenciais existe *n-1* equações de tensões de nós independentes. Resolvendo o problema para as tensões de nó todas as tensões de braço também ficam determinadas. As correntes de braço podem ser especificadas em função das equações de braço impostas por cada elemento.

Para escrever as equações de nó precisamos da lei das correntes de Kirchhoff. Assim para o problema da figura acima temos

para o nó A

$$i_1+i_2=is_1$$

$$\frac{v_A-0}{R_1}+\frac{v_A-v_B}{R_2}=-is_1$$

para o nó B

$$i_3+i_4+i_5=0$$

$$\frac{v_B-v_A}{R_2}+\frac{v_B-v_1}{R_4}+\frac{v_B-0}{R_3}=0$$

reescrevendo as equações para os nós A e B respectivamente temos

$$+v_A\cdot\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)-v_B\cdot\left(\frac{1}{R_2}\right)=-is_1$$

$$-v_A\cdot\left(\frac{1}{R_2}\right)+v_B\cdot\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)=v_1\cdot\left(\frac{1}{R_4}\right)$$

Desta forma obtemos um sistema de equações com duas incógnitas e duas equações que pode ser resolvido sem maiores problemas. Como solução para o problema obteremos as tensões em cada nó. As correntes de cada ramo ficam definidas pela tensão e pelo valor da resistência, ou pelo valor da fonte de corrente.

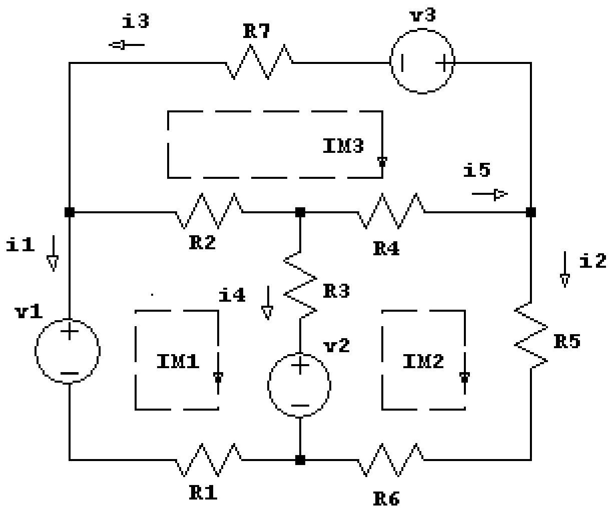
Observe que há uma lei de formação para o sistema de equações obtido, de forma que ele poderia ter sido obtido por inspeção da rede. Para um determinado nó *N* a equação é obtida da seguinte forma: A tensão do nó *N* multiplicada pelo somatório das condutâncias que vão do nó *N* aos nos *J*. Esta parcela é subtraída das tensões nos nós *J* multiplicadas pelas condutâncias que interligam os nós *J* ao nó *N*. O resultado é igual à soma das correntes (de fontes de corrente) que chegam ao nó *N*.

$$v_N \cdot \sum G_{NJ} - \sum \left(v_J \cdot G_{JN} \right) = \sum i_N$$

onde G_{XY} é a condutância que liga o nó *X* ao nó *Y*.

3.3.2 Análise de malhas

Um outro método de analisar uma rede genérica é o método das malhas. Para ilustrar sua aplicação considere a figura a seguir.



Inicialmente contamos o número de malhas essenciais (malhas M1, M2 e M3). Para cada malha estipula-se uma corrente com sentido de referência arbitrário (IM1, IM2 e IM3). A partir do sentido de referência arbitrado os sentidos das tensões de referência também ficam bem definidos. A partir dos sentidos de tensão e utilizando a lei das tensões de Kirchhoff podemos escrever as equações que regem as correntes de cada malha. Em elementos que pertencem a mais de uma malha, a corrente resultante será a soma algébrica das correntes de cada malha, levando-se em conta o sentido de cada corrente. Para o circuito acima temos para a malha 1

$$v_{R2}+v_{R3}+v2+v_{R1}-v1=0$$

$$R_2\cdot(IM1-IM3)+R_3\cdot(IM1-IM2)+v2+R_1\cdot(IM1)-v1=0$$

para a malha 2

$$v_{R4}+v_{R5}+v_{R6}-v2+v_{R3}=0$$

$$R_4\cdot(IM2-IM3)+R_5\cdot IM2+R_6\cdot IM2-v2+R_3\cdot(IM2-IM1)=0$$

para a malha 3

$$v_{R7}-v3+v_{R4}+v_{R2}=0$$

$$R_7\cdot(IM3)-v3+R_4\cdot(IM3-IM2)+R_2\cdot(IM3-IM1)=0$$

reescrevendo as equações temos

$$IM1\cdot(R_1+R_2+R_3)-IM2\cdot(R_3)-IM3\cdot(R_2)=v1-v2$$

$$-IM1\cdot(R_3)+IM2\cdot(R_3+R_4+R_5+R_6)-IM3\cdot(R_4)=v2$$

$$-IM1\cdot(R_2)-IM2\cdot(R_4)+IM3\cdot(R_2+R_4+R_7)=v3$$

Que resulta num sistema com três equações e três incógnitas que pode ser resolvido de forma simples. As correntes de ramo podem ser determinadas por uma simples relação algébrica entre correntes de malha.

$$i1=-IM1$$

$$i2=IM2$$

$$i3=-IM3$$

$$i4=IM1-IM2$$

$$i5=IM2-IM3$$

As tensões de ramo podem ser obtidas a partir dos valores das fontes de tensão e das quedas de tensão sobre os resistores. A tensão sobre as fontes de corrente deve ser determinada pela lei das tensões de Kirchhoff.

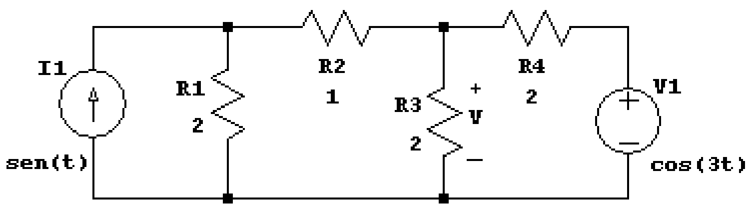
Observe que há uma lei de formação para o sistema de equações que determinam as correntes de malha de modo que ele poderia ter sido obtido por simples inspeção da rede. Para uma determinada malha *M* a equação é obtida da seguinte maneira: A corrente da malha *M* multiplica o somatório de todas as resistências que compõe a malha. Esta parcela deve ser subtraída das demais correntes de malha multiplicas as resistências em comum com a malha *M*. O resultado é igual ao somatório das tensões (de fontes de tensão) na malha com a polaridade que concorde com a da corrente de malha estabelecida.

$$i_M \cdot \sum R_{MJ} - \sum \left(i_J \cdot R_{JM} \right) = \sum v_M$$

onde R_{XY} é a resistência da malha X que também pertence à malha Y.

3.4 Exercícios

1) Para o circuito abaixo determine a tensão *V* sobre R_3 (use superposição).



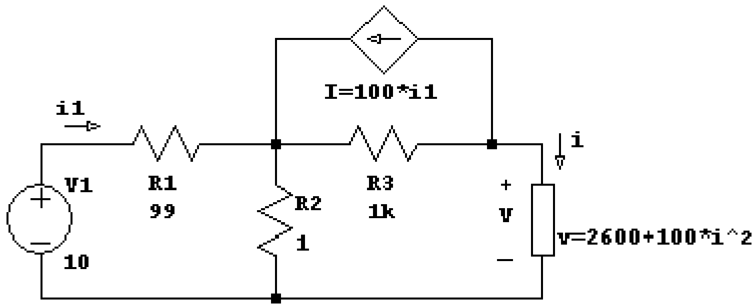
Por superposição (única solução possível)

Para I1: $$V_{I1} = \frac{I_1 \cdot G_{EQ}}{G1 + G_{EQ}} \cdot \frac{1}{G3 + G4} = \frac{I_1 \cdot \dfrac{G_2 \cdot (G3 + G4)}{G_2 + G_3 + G_4}}{G_1 + \dfrac{G_2 \cdot (G3 + G4)}{G_2 + G_3 + G_4}} \cdot \frac{1}{(G3 + G4)}$$

Para V1: $$V_{V1} = \frac{V_1 \cdot R_{EQ}}{R4 + R_{EQ}} = \frac{V_1 \cdot \dfrac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}}{R_4 + \dfrac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}}$$

$V = V_{I1} + V_{V1}$

2) A rede abaixo é o circuito equivalente de um amplificador transistorizado com emissor comum ligado a uma carga resistiva não linear. a) Determine a rede Thévenin equivalente do amplificador. b) Determine a tensão de saída sobre a carga.



a) Transformando o circuito Norton em Thévenin obtemos uma fonte $V_2 = I \cdot R3$ em série com *R3*. O positivo da fonte se conecta a *R1* e *R2*. Assim, $V_2 = 100\text{k} \cdot i_1$.

Substituindo a resistência dependente de tensão por uma fonte de tensão V ficamos com um circuito de duas malhas. Estipulando as correntes de malha em sentido horário:

Malha da esquerda: $-V_1 + R1 \cdot i_1 + R2 \cdot (i_1 - i) = 0$ (1)

Malha da direita: $R2 \cdot (i - i_1) + V_2 + R3 \cdot i + V = 0$ (2)

De 1: $i = \dfrac{V_1 + R2 \cdot i_2}{R1 + R2}$ (3)

Substituindo 3 em 2:

$$R2 \cdot \left(i - \frac{V_1 + R2 \cdot i_2}{R1 + R2} \right) + V_2 + R3 \cdot i + V = 0$$

$$V = \left(\frac{R2}{R1 + R2} - R2 - R3 \right) \cdot i + \left(\frac{R2 \cdot V_1}{R1 + R2} - V_2 \right) = -R_{TH} \cdot i + V_{TH}$$

$$R_{TH} = R2 + R3 - \frac{R2}{R1 + R2} \text{ , } V_{TH} = \frac{R2 \cdot V_1}{R1 + R2} - V_2$$

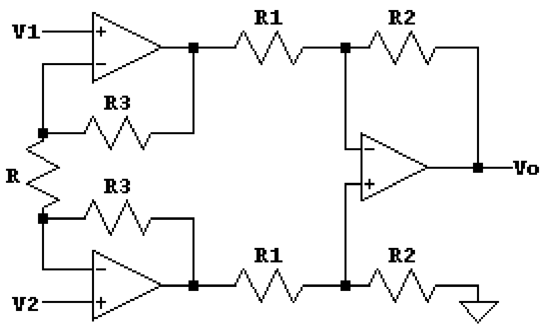
b) O somatório de tensões no circuito equivalente Thévenin em série com a resistência dependente de corrente é dado por

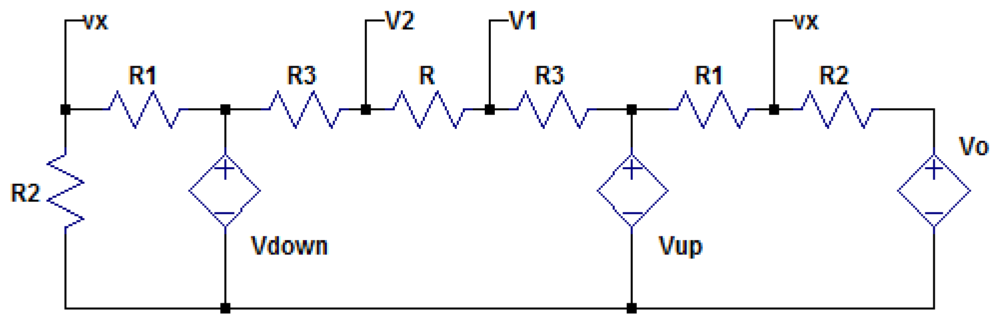
$$-V_{TH}+i\cdot R_{TH}+2600+100\cdot i^2=0\ .$$

Determinar a corrente do circuito, $100\cdot i^2+R_{TH}\cdot i+(2600-V_{TH})=0$

e $V=2600+100\cdot i^2$

3) Encontrar *Vo* em função de *V1*, *V2* e dos resistores. Para os cálculos, redesenhar o circuito substituindo cada amplificador operacional pelo seu modelo ideal.





Equacionando as 4 incógnitas (V_X , V_{DOWN} , V_{UP} e V_O) pelo método das tensões de nós, bastaria resolver o sistema de equações abaixo.

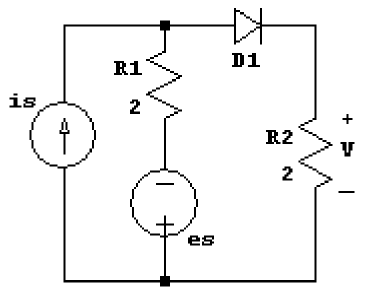
$$\frac{V_X}{R2}+\frac{V_X-V_{DOWN}}{R1}=0$$

$$\frac{V_2-V_{DOWN}}{R3}+\frac{V_2-V_1}{R}=0$$

$$\frac{V_1 - V_2}{R} + \frac{V_1 - V_{UP}}{R3} = 0$$

$$\frac{V_X - V_{UP}}{R1} + \frac{V_X - V_O}{R2} = 0$$

4) Determine a tensão V sobre o resistor R_2 para as seguintes situações: a) $i_S = 4\,A$ e $v_S = 10\,V$ e b) $i_S = 10\,A$ e $v_S = -10\,V$. É possível resolver este problema por superposição?



Transformando o circuito Thévenin em Norton obtemos uma fonte de corrente $I_{ES} = \frac{es}{R1}$ em paralelo com o resistor *R1*. O sentido da corrente I_{ES} é para baixo.

a) $i_S = 4\text{A}$ para cima e $I_{ES} = 5\text{A}$ para baixo. O diodo estará cortado pois as correntes por *R1* e *R2* só poderiam circular de baixo para cima. Logo, o diodo é uma chave aberta e $V = 0\text{V}$. Não é possível resolver por superposição pois, neste caso, o diodo conduziria para i_S.

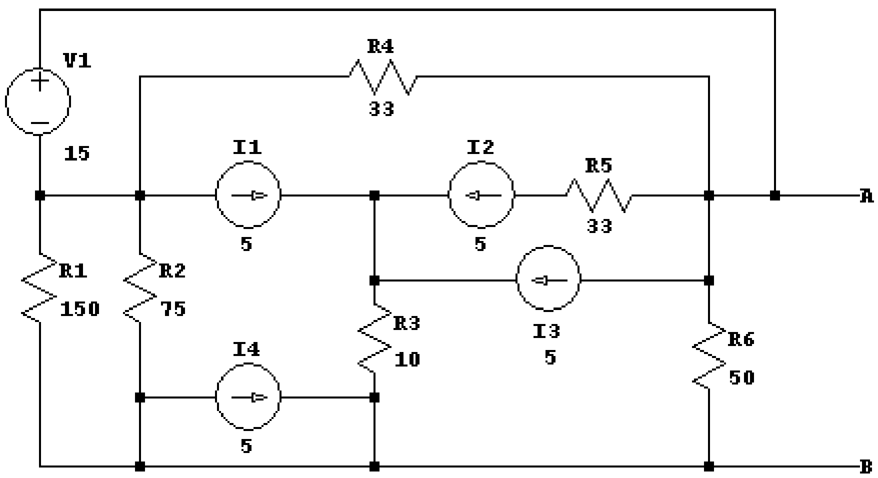
b) $i_S = 10\text{A}$ para cima e $I_{ES} = 5\text{A}$ para cima. O diodo estará conduzindo pois as correntes por *R1* e *R2* circulam de cima para baixo. Logo, o diodo é uma chave fechada e a corrente se divide entre as resistências.

$$V = i_{R2} \cdot R2 ,$$

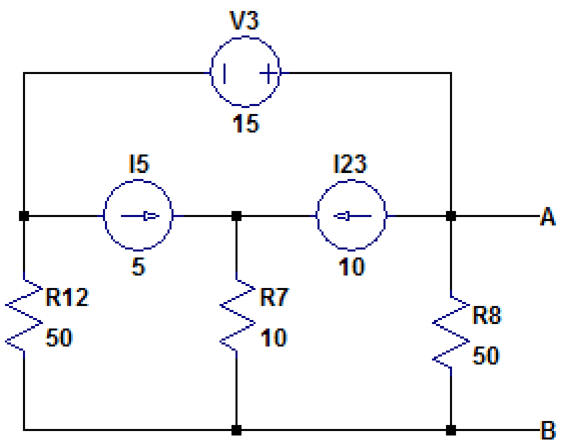
$$i_{R2} = \frac{i_{TOT}}{G1 + G2} \cdot G2 = \frac{15}{0{,}5 + 0{,}5} \cdot 0{,}5 = 7{,}5\,A ,$$

$$V = 15\text{V}$$

5) Encontre o equivalente Thévenin entre os terminais A e B da rede abaixo.



Simplificando o circuito:



a) R4 pode ser retirado pois está em paralelo com V1; b) R1 e R2 estão em paralelo; c)R5 pode ser retirado pois está em série com I2; d) I2 e I3 ficam em paralelo e podem ser associados; e) I4 está em curto e pode ser retirado.

Para calcular o equivalente Thévenin podemos colocar uma fonte de corrente I (sentido para cima) entre os terminais A e B. Equacionando as tensões de nós:

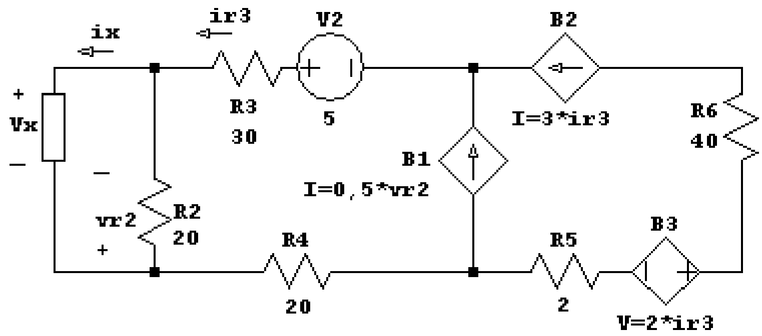
Nó A: $-I+\frac{V_A}{R8}+I_{23}+I_{V3}=0$

$$-I+\frac{V_A}{R8}+I_{23}+\left(I_5+\frac{V_A-V_3}{R12}\right)=0$$

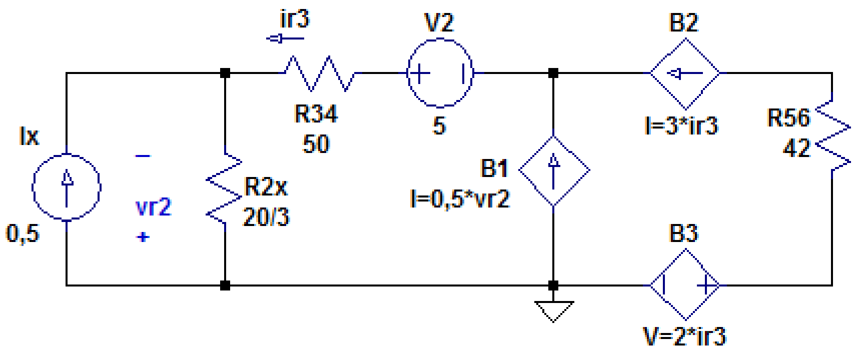
$$V_A=\frac{R8\cdot R12}{R8+R12}\cdot i+\frac{R8\cdot R12}{R8+R12}\cdot\left(\frac{V_3}{R12}-I_{23}-I_5\right)=R_{TH}\cdot i+V_{TH}$$

$$R_{TH}=\frac{R8\cdot R12}{R8+R12}\ ,\ \ V_{TH}=\frac{R8\cdot R12}{R8+R12}\cdot\left(\frac{V_3}{R12}-I_{23}-I_5\right)$$

6) No circuito abaixo, calcular as potências das fontes de corrente. O braço X apresenta uma característica $v_x=10\cdot i_x+5$.



O braço X corresponde a uma fonte de tensão de 5V em série com uma resistência de 10Ω ou uma fonte de corrente de 0,5A em paralelo com uma resistência de 10Ω. R4 e R3 estão em série e podem ser associados. R6 e R5 estão em série e podem ser associados.



Equacionando por tensões de nós:

Nó B1: $-I_{B1}-I_{B2}+\frac{(V_{B1}+V_2)-(-V_{R2})}{R34}=0$

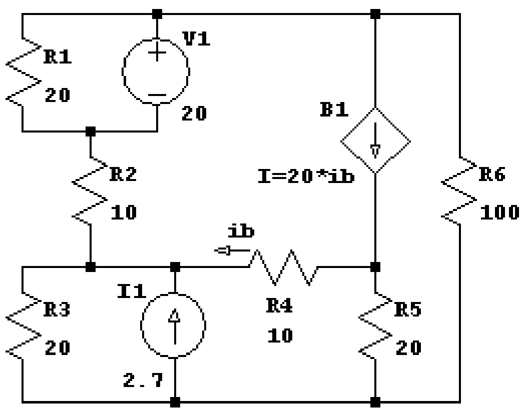
Nó R2x: $-I_X+\frac{(-V_{R2})}{R2x}+\frac{(-V_{R2})-(V_{B1}+V_2)}{R34}=0$

Sabendo que $I_{B1}=0{,}5\cdot V_{R2}$, $I_{B2}=3\cdot I_{R3}$ e $I_{R3}=\frac{(V_{B1}+V_2)-(-V_{R2})}{R34}$

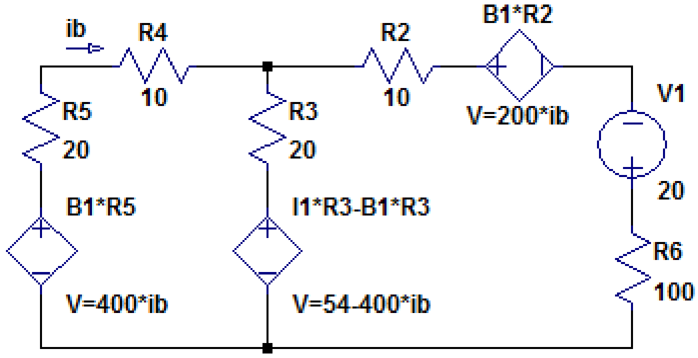
$$P_{B1}=-V_{B1}\cdot I_{B1}=-V_{B1}\cdot(0{,}5\cdot V_{R2})$$

$$P_{B2}=-V_{B2}\cdot I_{B2}=(V_{B1}-2\cdot I_{R3}+R56\cdot 3\cdot I_{R3})\cdot(3\cdot I_{R3})$$

7) No circuito abaixo determine a potência dissipada pelo resistor R_6. Para tanto, simplifique o circuito até obter apenas duas malhas. Após, resolva o problema utilizando o método das correntes de malha.



A fonte *B1* pode ser explodida sobre *V1*, *R2*, *R3* e *R5* (explosões menores sobre *R6* ou *R4* podem ser realizadas mas é necessário mais atenção para não errar as reais correntes sobre estes resistores). Após a explosão é possível converter todos os modelos Norton em Thévenin. Assim, a fonte *B1* e a resistência *R1* em paralelo com *V1* são simplificadas. *B1* em paralelo com *I1* podem ser somadas. O circuito final pode ser visto abaixo.



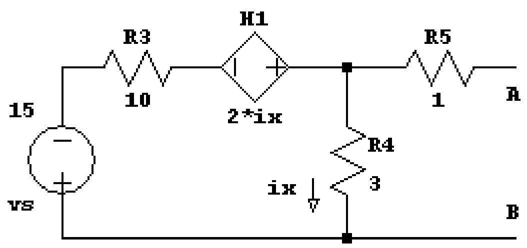
Equacionando por malhas e considerando as correntes em sentido horário:

Malha da esquerda: $-B_1 \cdot R5 + ib \cdot (R5 + R4) + (ib - i2) \cdot R3 + (I_1 \cdot R3 - B_1 \cdot R3) = 0$

Malha da direita: $-(I_1 \cdot R3 - B_1 \cdot R3) + (i2 - ib) \cdot R3 + i2 \cdot R2 + B_1 \cdot R2 - V_1 + i2 \cdot R6 = 0$

$P_{R6} = R6 \cdot |i2|^2$

8) Para o circuito abaixo aplique uma fonte de tensão de V Volts entre os terminais A e B. Equacione o problema utilizando malhas e isole a tensão V em função da corrente pela fonte. Compare com o resultado obtido no exemplo de Thévenin-Norton. Repita o processo com uma fonte de corrente de I Amperes.



Aplicando uma fonte de tensão entre A e B. Positivo para cima. Correntes de malha em sentido anti-horário.

Malha da esquerda: $i_1 \cdot (R3 + R4) - i_2 \cdot R4 + V_{H1} - V_S = 0$

Malha da direita: $-V_1 + i_2 \cdot (R4 + R5) - i_1 \cdot R4 = 0$

Sabendo que $V_{H1}=2\cdot i_X$, $i_X=i_2-i_1$ e $V_1=R_{TH}\cdot i_2+V_{TH}$, basta resolver o sistema de equações.

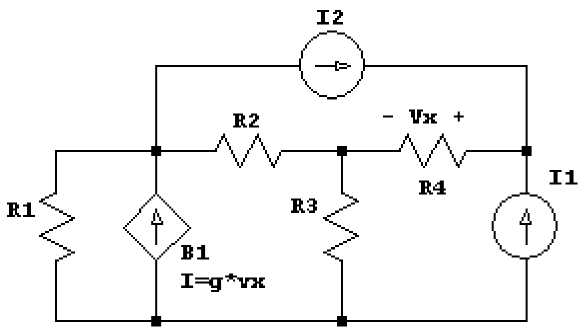
Aplicando uma fonte de corrente entre A e B. Corrente de baixo para cima.

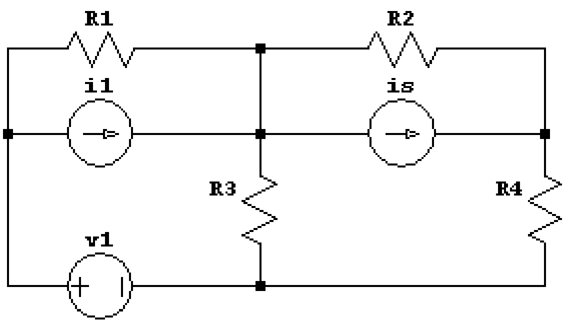
$$-i_2+\frac{V_{R4}}{R4}+\frac{V_{R4}-(V_{H1}-V_S)}{R3}=0$$

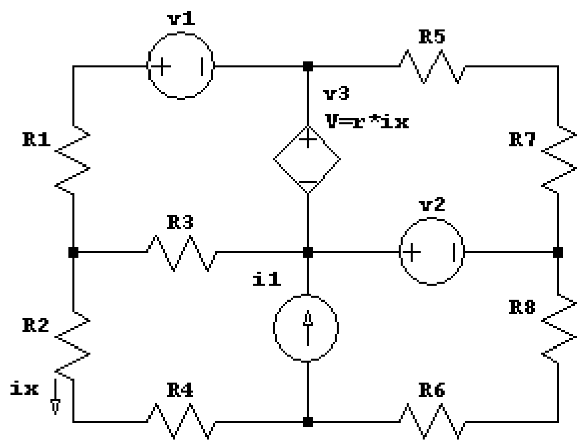
e $V_{H1}=2\cdot i_X=2\cdot\dfrac{V_{R4}}{R4}$

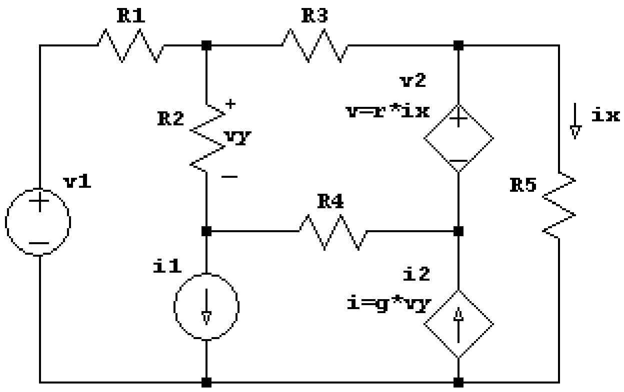
$$V_1=R5\cdot i_2+V_{R4}=R_{TH}\cdot i_2+V_{TH}$$

9) Escreva os sistemas de equações que resolvem os problemas abaixo pelos métodos das malhas e dos nós.






v1
R5
v3
V=r*ix
R1
R7
v2
R3
i1
R2
R8
ix
R4
R6


R1
R3
v2
v=r*ix
ix
R2
vy
v1
R5
R4
i1
i2
i=g*vy