CAPÍTULO 4

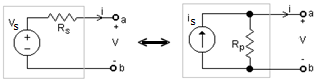
**TEOREMAS DE CIRCUITOS**

4.1 INTRODUÇÃO

Serão vistos neste capítulo alguns teoremas que auxiliam bastante a análise de circuitos. Entre eles destacam-se: a transformação de fontes, o teorema da superposição, os teoremas de Tévenin e de Norton e o teorema da máxima transferência de potência, entre outros.

4.2 TRANSFORMAÇÃO DE FONTES

Esse teorema permite se substituir uma fonte de tensão em série com um resistor por uma fonte de corrente em paralelo com um resistor ou vice-versa. Estas substituições não alteram as correntes e tensões do restante do circuito, isto é, nas duas configurações a característica *v×i* na porta *a-b* permanece a mesma. Estas transformações são ilustradas na figura 4-1.



(a) (b)

# Fig. 4-1: Equivalência entre fonte de tensão e fonte de corrente

Da figura 4-1(a) tira-se a característica *v× i* na porta *a-b* dada por:

*v = vs – Rs.i* (4-1)

Da figura 4-1(b) tira-se a característica *v× i* da mesma porta *a-b* dada por:

ou *v = is Rp – Rpi* (4-2)

Para que os dois circuitos sejam equivalentes, eles devem apresentar a mesma característica *v× i* nos terminais *a-b* de cada circuito, isto é, um bipolo é equivalente a outro quando a relação entre tensão e corrente em seus terminais é exatamente a mesma. Assim, comparando-se as equações (4-1) e (4-2), conclui-se que, a equivalência ocorre quando:

*Rs = Rp* e *vs = Rsis* ou

Estes resultados possibilitam a transformação de uma fonte de tensão em uma fonte de corrente ou de uma fonte de corrente em uma fonte de tensão, de acordo com a figura 4-1.

Exemplo 1: Encontre a corrente *i* no circuito da figura 4-2, usando transformação de fontes.

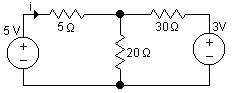
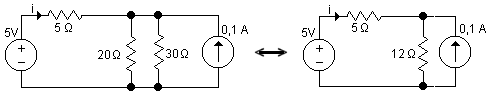


Fig. 4-2 Circuito para o exemplo 1

A figura 4-3 mostra uma seqüência de transformações efetuadas até se chegar numa única malha, a qual possibilita o cálculo da corrente *i* de forma simplificada.



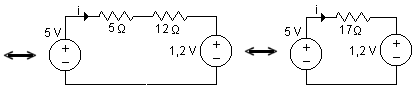


Fig. 4-3: Sequência de transformações de fontes

Logo, do último circuito tira-se:

*– 5 +17i +1,2 = 0* ou *i = 0,224 A*.

Exercício: Usando-se transformações de fontes encontre a corrente *i* no circuito da figura 4-4, onde *v1 =* – *e–t* V e *v2 = e–2t V*.

**Resposta:** *1/6(e–2t – e–t) A*

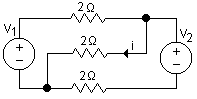


Fig. 4-4: Circuito para o exercício

4.3 SUPERPOSIÇÃO

Para um circuito linear e invariante no tempo, o efeito total de várias fontes independentes atuando simultaneamente, é igual à soma dos efeitos das fontes independentes individuais atuando uma de cada vez, com todas as outras nulas, exceto as fontes dependentes.

Exemplo 2: Encontre a corrente *i* no circuito da figura 4-5 usando-se superposição.

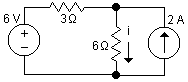


Fig. 4-5: Circuito para o exemplo 2

Solução: Anulando-se a fonte de corrente (o que equivale a substituí-la por um circuito aberto), obtém-se o circuito da figura 4-6 e encontra-se uma corrente *i1* devida somente à fonte de tensão. Assim:

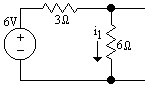


Fig. 4-6: Circuito da figura 4-5 com a fonte de corrente anulada

Em seguida, anulando a fonte de tensão (o que equivale a substituí-la por um curto-circuito), obtém-se o circuito da figura 4-7 e encontra-se uma corrente *i2* devida somente à fonte de corrente. Assim:

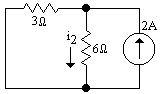


Fig. 4-7: Circuito da figura 4-5 com a fonte de tensão anulada

A corrente *i* será a soma dos efeitos individuais de cada uma das fontes, isto é:

*i = i1 + i2 =*.

Exemplo 3: Encontre a corrente *i* no circuito da figura 4-8 usando-se superposição.

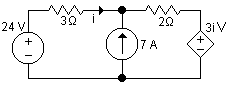


Fig. 4-8: Circuito do exemplo 3

Solução: Anulando-se a fonte de corrente obtém-se o circuito da figura 4-9 e encontra-se uma corrente *j1* devida somente à fonte de tensão. (Note-se que a fonte controlada não pode ser anulada). Assim:

*– 24 + 3j1 + 2j1 + 3j1 = 0* ou *j1 = 3 A*

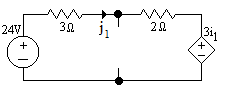


Fig. 4-9: Circuito da figura 4-8 com a fonte de corrente anulada

Em seguida, anulando-se a fonte de tensão obtém-se o circuito da figura 4-10 e encontra-se uma corrente *j2* devida somente à fonte de corrente. O novo circuito assim obtido fica constituído de duas malhas, com correntes *j2* e *j3*. Escrevendo-se a equação para o percurso externo deste circuito, tem-se:

*3j2 + 2j3 + 3j2 = 0* e como *j3 – j2 = 7*, então *j2 =*

Logo, a corrente procurada será:

*i = j1 + j2 =* .

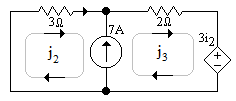


Fig. 4-10: Circuito da figura 4-8 com a fonte de tensão anulada

Exercício: Encontre *v*, no resistor de *10 Ω*, no circuito da figura 4-11 utilizando o teorema da superposição.

**Resposta:** *v = 1,82 V*.

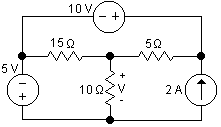
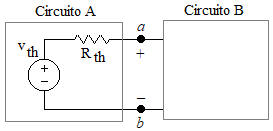


Fig. 4-11: Circuito para o exercício

4.4 TEOREMA DE THÉVENIN

O objetivo do teorema de Thévenin é se transformar um circuito, ou uma porção do circuito, numa forma mais simples, composta apenas de uma fonte de tensão em série com um resistor. Esta combinação passa a ser chamada de "equivalente de Thévenin". Pode-se resumir este teorema da seguinte forma:

*Dado um circuito linear arbitrário, dividido em dois circuitos, A e B, conectados pelo mesmo par de terminais a-b, então, o equivalente de Thévenin do circuito A é uma combinação série de uma fonte de tensão de valor vth e um resistor de resistência Rth, conforme mostra a* figura 4-12.



**Fig. 4-12: Equivalente de Thévenin**

A tensão de Thévenin, *vth*, é a tensão de circuito aberto, *voc*, do circuito *A*, medida nos terminais *a-b*, com o circuito *B* desconectado destes terminais e a resistência de Thévenin, *Rth*, é a resistência de saída do circuito *A* vista nos terminais *a-b* sem a presença do circuito *B.* Esta resistência de saída é calculada da seguinte maneira: se não houver fontes dependentes n circuito *A*, ela será a resistência equivalente medida nos terminais *a-b* quando todas as fontes independentes são anuladas, caso contrário, *Rth* será a razão entre a tensão de circuito aberto, *vth*, e a corrente de curto-circuito, *isc*, nos terminais *a-b*, assim:

*Rth =*

Exemplo 4: Determine a corrente *i* no circuito mostrado na figura 4-13, encontrando primeiro o equivalente de Thévenin do circuito à esquerda dos terminais *a-b*.

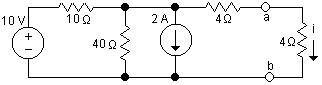
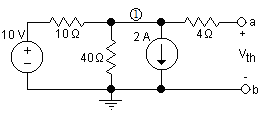


Fig. 4-13: Circuito do exemplo 4

Solução: A tensão de Thévenin, *vth*, será a tensão nos terminais *a-b*, sem a presença do resistor de *4*  à direita de *a-b*, conforme figura 4-14.



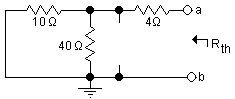
**Fig. 4-14: Circuito para a determinação de *vth***

Portanto, *vth = vab = e1*

Assim, escrevendo-se a equação para o nó *1* tem-se:

Donde se tira que: *vth = e1 = – 8 V.*

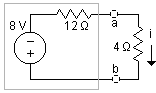
Como o circuito não tem fontes controladas, a resistência de Thévenin, *Rth*, será a resistência equivalente vista nos terminais *a-b*, anulando-se todas as fontes presentes, conforme mostra a figura 4-15.



**Fig. 4-15: Circuito para a determinação de *Rth***

Portanto:

Logo, o circuito original à esquerda de *a-b*, fica agora reduzido a uma fonte de tensão *vth* em série com um resistor de resistência *Rth*, conforme ilustrado na figura 4-16, onde foi colocado de volta o resistor de *4* , para o cálculo da corrente *i*.



**Fig. 4-16 – Equivalente de Thévenin do exemplo 4**.

Assim:

Exercício: Refaça o exemplo 4 usando transformações de fontes.

Exemplo 5: A figura 4-17 mostra agora um circuito com fontes dependentes onde o procedimento para o cálculo de *Rth* difere do anterior:

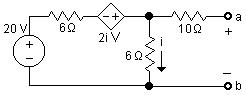


Fig. 4-17: Circuito do exemplo 5

Solução: A tensão *vth* será a tensão *vab* que é igual à tensão no resistor de *6*  mais à direita. Portanto, escrevendo a equação da malha esquerda tem-se:

*–20 + 6i* – *2i + 6i = 0*, donde se tira: *i = 2 A*

Logo: *vth = 6i = 6(2) = 12 V*.

Como as fontes dependentes não podem ser anuladas, a resistência *Rth* deve ser calculada dividindo-se a tensão de circuito aberto, *vth*, pela corrente de curto-circuito, *isc*, nos terminais *a-b*, conforme mostrado na figura 4-18, portanto, precisa-se calcular a corrente de curto-circuito *isc* como segue:

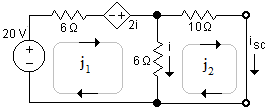


Fig. 4-18: Circuito para a determinação da corrente de curto circuito

Malha 1: *–20 + 6j1 – 2i + 6(j1 – j2) = 0, i = j1 – j2*

Malha 2: *6(j2 – j1) + 10j2 = 0*

Resolvendo-se o sistema tira-se:

*j2 = isc =*

Logo:

.

Então, o circuito estudado, pode ser substituído por um equivalente mais simples como mostrado na figura 4-19.

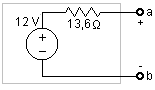
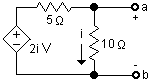


Fig. 4-19 – Equivalente de Thévenin do exemplo 5.

Exemplo 6: Circuito sem fontes independentes, conforme ilustrado na figura 4-20.

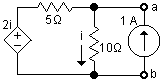


**Fig. 4-20: Circuito do exemplo 6**

Solução: como o circuito não contém fontes independentes, então *i = 0* quando a porta *a-b* está aberta. Logo:

*vth = 0*.

Para se encontrar *Rth*, opta-se por conectar uma fonte de corrente (poderia ser de tensão) de valor qualquer, por exemplo, *1A,* conforme mostra a figura 4-21.



**Fig. 4-21: Circuito para a determinação de *Rth***

No nó *a* tem-se:

Como *i = ,* então *va =*

Logo: .

4.5 TEOREMA DE NORTON

*O teorema de Norton estabelece que qualquer circuito linear com um par de terminais identificados a-b, pode ser substituído por uma combinação paralela de uma fonte de corrente de valor in, com um resistor de resistência Rn*.

A corrente, *in*, é a corrente de curto circuito nos terminais *a-b* e *Rn* é a Resistência de saída medida nos terminais livres *a-b*. É fácil se observar que o equivalente Norton é uma simples transformação de fonte do equivalente de Thévenin, ou seja, *in = vth / Rth* e *Rn = Rth*.

Exemplo 7: Encontre o equivalente Norton do circuito à esquerda dos terminais a-b da figura 4-22.

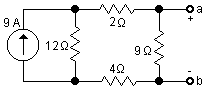
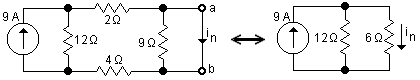


Fig. 4-22: Circuito para o exemplo 7

Solução: fazendo-se um curto-circuito nos terminais *a-b*, encontramos a corrente de curto-circuito, *in*, conforme ilustrado na figura 4-23:

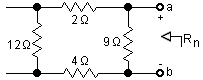


(a) (b)

# Fig. 4-23: Circuito para determinar a corrente de curto-circuito

Pelo divisor de corrente mostrado na figura 4-23(b), tem-se:

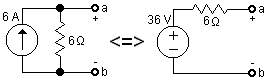
Como o circuito não tem fontes dependentes, a resistência *Rn* será a resistência equivalente *Rab*, com a fonte de corrente anulada conforme ilustrado na figura 4-24.



**Fig. 4-24: Circuito para determinar *Rth***

Assim: *Rn = Rab = 6 .*

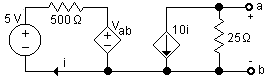
Portanto, o equivalente Norton será como mostrado na figura 4-25(a). Na figura 4-25(b) mostra-se o equivalente de Thévenin do mesmo circuito, obtido a partir da transformação de fonte do equivalente Norton.



(a) (b)

# Fig. 4-25: (a) Equivalente Norton; (b) Equivalente de Thévenin

Exemplo 8: Encontre o equivalente Norton para o circuito à esquerda de a-b da figura 4-26.



**Fig. 4-26: Circuito do exemplo 8**.

Fazendo um curto-circuito nos terminais *a-b*, obtém-se o circuito da figura 4-27.

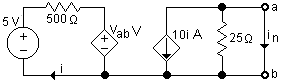


Fig. 4-27: Circuito para determinar a corrente de curto circuito

Deste circuito, escrevendo-se a equação da malha esquerda, sabendo que *vab = 0*, tem-se:

*–5 + 500i = 0*

Donde se tira: *i = 10mA*

Na malha direita: *in = –10i* então: *in = = –100 mA*.

Para encontrar a tensão de circuito aberto faz-se uso do circuito da figura 4-27. Assim:

Na malha esquerda: *–5 + 500i + vab = 0* ou *vab + 500i = 5*

Na malha direita: *vab = –250i* ou *vab + 250i = 0*

Do sistema formado tira-se que *vab =* *–5 V*, logo:

4.6 TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

Seja um circuito qualquer, linear e invariante no tempo, representado pelo seu equivalente de Thévenin, alimentando uma carga resistiva *RL*, conforme ilustra a figura 4-28. Então, a máxima potência transferida da fonte para a carga *RL* ocorrerá quando:

*RL = Rth*(4-3)

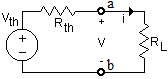


Fig. 4-28: Circuito equivalente de Thévenin com carga.

A demonstração é simples, conforme segue abaixo, tomando-se como referência a figura 4-28. Assim tem-se:

Potência na carga:

(4-4)

onde, pela figura 4-29, tira-se a corrente:

(4-5)

Substituindo-se (4-5) em (4-4), obtém-se:

(4-6)

Para maximizar *PL* em relação à *RL* se faz:

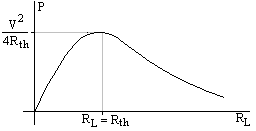
Donde se tira

*RL = Rth*

A potência máxima será obtida fazendo-se *RL = Rth* em (4-6). Assim:

(4-7)

A variação da potência com a carga, baseada na equação (4-6), pode ser observada no gráfico da figura 4-29.



**Fig. 4-29: Variação da potência com a carga resistiva *RL***

É interessante se analisar a eficiência nesta transferência de potência. Assim, definindo-se eficiência como a relação entre a potência fornecida à carga (potência útil) e a potência no gerador (potência total) ter-se-á:

Potência na carga:

Potência no gerador:

Logo, a eficiência nessa transferência será:

(4-8)

No caso de transferência máxima (*RL = Rth*) tem-se, pela equação (4-8): *η = 1/2*, ou seja, uma eficiência relativamente baixa. Embora muitas vezes seja esta a situação buscada (por exemplo, quando se deseja fazer casamento de impedâncias), nem sempre ela é desejável, pois, no caso de fornecimento de energia elétrica, por exemplo, igual potência será dissipada no interior do gerador, que poderá não suportar o aquecimento produzido.

Exemplo 9: Encontre a resistência de carga *RL* que absorve máxima potência do restante do circuito, mostrado na figura 4-30. Calcule a máxima potência absorvida pela carga *RL*.

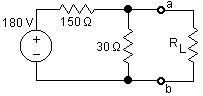


Fig. 4-30: Circuito do exemplo 9

Solução: Achando o equivalente de Thévenin do circuito à esquerda de *a-b*, obtém-se o circuito da figura 4-31, donde se tira:

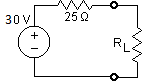


Fig. 4-31: Equivalente de Thévenin do exemplo 9

*RL = Rth = 25 .*

Exemplo 10: Encontre o equivalente de Thévenin para o circuito à esquerda de *a-b* da figura 4-32, bem como o valor de *RL* para que esta absorva máxima potência.

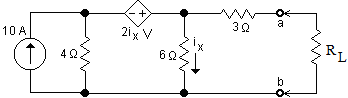


Fig. 4-32: Circuito para do exemplo 10

Solução: O equivalente de Thévenin à esquerda de *a-b* pode ser encontrado, tomando-se como base o circuito da figura 4-33.

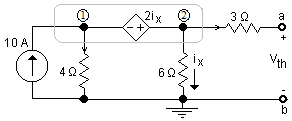


Fig. 4-33: Circuito para o cálculo de vth

Nesta figura observa-se que *vth = vab = e2*

Portanto, escrevendo-se a equação do super nó tem-se:

Como *e2 – e1 = 2ix = 2*(), então se encontra:

*vth = e2 = 30 V*

Para calcular *Rth*, toma-se como base o circuito da figura 4-34.

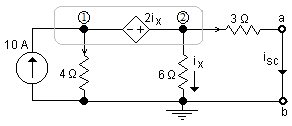


Fig. 4-34: Circuito para o cálculo de Rth

No super nó desta figura tem-se:

Como *e2 – e1 = 2ix = 2*(), encontra-se:

*e2 = 15V, isc = = 5A* e, portanto:

Portanto, o equivalente de Thévenin será como mostrado na figura 4-35.

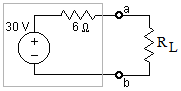


Fig. 4-35: Equivalente de Thévenin do exemplo 10

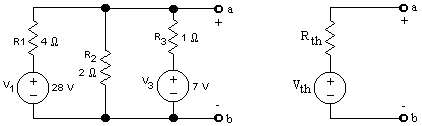
Desta forma, o valor de *RL* será:

*RL = Rth = 6 Ω*.

4.7 TEOREMA DE MILLMAN

O teorema de Millman visto no capítulo 2, equação (2-16), pode ser aplicado para a simplificação de circuitos que possam ser traçados como uma combinação paralela de vários ramos, cada um contendo uma fonte de tensão em série com um resistor, conforme exemplo 11. Na verdade, ele é apenas um caso especial da aplicação do teorema de Thévenin.

Exemplo 11: Encontre a tensão *Vab* nos terminais *a-b* do circuito mostrado na figura 4-36(a).



(a) (b)

# Fig. 4-36: Circuito para o exemplo 11

Solução: Observa-se que os ramos formados por *R1* em série com *V1, R2* em série com uma fonte nula e *R3* em série com *V3,* estão em paralelo, dando portanto uma tensão resultante nos terminais *a-b*, dada pelo teorema de Millman equação (2-16), ou seja:

*vab = 8 V*.

Se observa na figura 4-36(b) o equivalente de Thévenin deste circuito onde se verifica facilmente que:

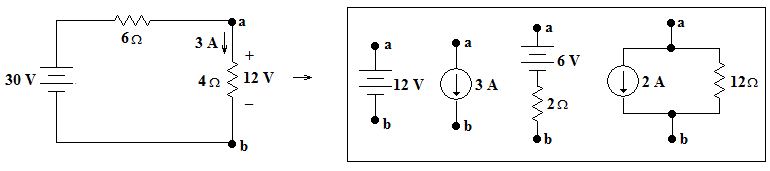
*Vth = vab = 8 V*

(\*) 4.8 TEOREMA DA SUBSTITUIÇÃO

O teorema da substituição afirma que:

*Se a corrente que atravessa um ramo qualquer de um circuito bilateral de corrente contínua e a tensão entre os terminais do mesmo ramo são conhecidas, este ramo pode ser substituído por qualquer combinação de componentes que mantenha inalteradas a tensão e a corrente associadas ao ramo escolhido*.

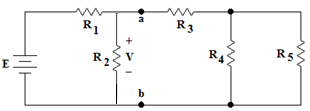
Exemplo 12: no circuito da figura 4-37(a), o ramo conectado aos terminais *ab* pode ser substituído, por exemplo, pelos seguintes componentes ou combinação de componentes mostrados na figura 4-37(b).



(a) (b)

**Fig. 4-37: Teorema da substituição**

Exercício: No circuito da figura 4-37, utilize o teorema da substituição para trocar a porção à esquerda da porta *ab* por um único componente.



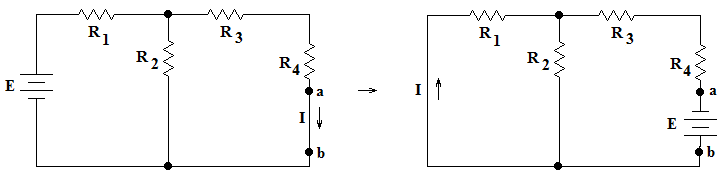
**Fig. 4-37.**

(\*) 4.9 TEOREMA DA RECIPROCIDADE

O teorema da reciprocidade é *aplicável somente* em circuitos com apenas uma fonte independente. Ele afirma que:

*A corrente I em qualquer ramo de um circuito, com uma única fonte, E, localizada em outro ramo qualquer do mesmo circuito, é igual à corrente no ramo em que se encontrava a fonte se ela for transferida para o ramo no qual a corrente I foi originalmente medida.*

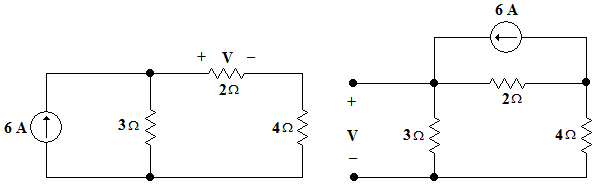
A figura 4-38 ilustra um exemplo deste teorema.



**Fig. 4-38: Exemplo do teorema da reciprocidade**

Exercício: Determine a tensão *V* para os dois circuitos mostrados na figura 4-39, para comprovar o teorema da reciprocidade.

**Resposta***: 4 V*



**Fig. 4-39.**

4.10 TEOREMA DE TELLEGEN

O teorema de Tellengen pode ser enunciado assim: *Se um circuito tem b bipolos e sendo vk e ik a tensão e a corrente no bipolo k, respectivamente, o teorema diz que:*

Como o produto *vkik* representa a potência do bipolo, então o teorema de Tellegen afirma que a potência total do circuito é nula, ou seja, se alguns bipolos recebem potência, outros devem fornecê-la.

Se as tensões e correntes forem agrupadas em vetores coluna, ***v*** e ***i***, respectivamente, a equação acima também pode ser expressa como:

***v****T****.i*** *= 0*

Ou seja, o produto escalar dos vetores ***v****T* e ***i*** é nulo. Em outras palavras, os vetores das tensões e das correntes de bipolos são ortogonais.

O teorema de Tellegen é uma consequência direta das leis de Kirchhoff. A equação anterior pode ser facilmente comprovada usando a matriz de incidência do circuito aplicada às equações das tensões de nó e correntes de malha vistas no capítulo 2, quais sejam:

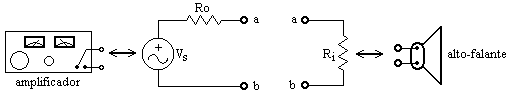
***v*** *= AT****e*** e *A****i*** *=* ***0***

Assim, destas equações escreve-se:

***v****T****i*** *= (AT****e****)T****i*** *=* ***e****TA****i*** *=* ***e****T****0*** *= 0*

4.11 APLICAÇÕES

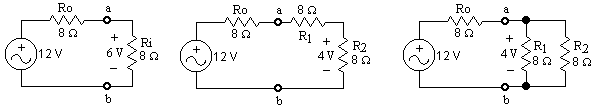
(1) Casamento de impedâncias: Uma aplicação muito comum do teorema da máxima transferência de potência é a ligação entre um amplificador de áudio e alto-falantes. Neste caso, é necessário que o amplificador entregue máxima potência para o alto-falante. Então, imaginando-se o amplificador representado pelo seu equivalente de Thévenin e o alto-falante por uma impedância de entrada, conforme mostra a figura 4-40, deve-se ter que a impedância de entrada do alto-falante, *Ri,* deve ser igual à impedância de saída do amplificador, *Ro*. O termo *impedância* será definido no *capítulo* 9; por enquanto entenda-se esse termo como sendo uma resistência. Na prática, existem alto-falantes disponíveis com impedâncias de *4 Ω, 8 Ω* e *16 Ω*.



(a) (b)

**Fig. 4-40 (a) Equivalente de Thévenin do amplificador; (b) Resistência de entrada do alto-falante**.

Seja agora supor as seguintes situações ilustradas na figura 4-41:



(a) (b) (c)

**Fig. 4-41: (a) Um alto-falante casado; (b) Dois alto-falantes em série; (c) Dois alto-falantes em paralelo**.

Na situação (a) tem-se um alto-falante casado com o amplificador, ou seja, *Ri = Ro*, portanto, a potência do alto-falante tem um valor máximo *P = V2/R = 62/8 = 4,5 W*. A situação (b) apresenta dois alto-falantes idênticos em série. Neste caso a potência em cada um deles será *P = I2.R = (500 mA)2.8 = 2 W*. Finalmente, na situação (c) têm-se dois alto-falantes idênticos ligados em paralelo. Neste caso, a potência em cada um deles será *P = V2/R = 42/8 = 2 W*. Note-se que, nestes dois últimos casos, a potência total, de *4 W*, fornecida aos alto-falantes não alcança a potência máxima do primeiro caso. Por quê?

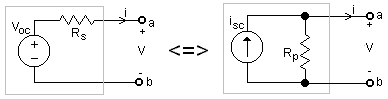
Quando mais de um alto-falante precisa ser ligado a um mesmo amplificador, a configuração escolhida quase sempre é em paralelo, por duas principais razões. Primeiro, quando os alto-falantes estão em paralelo, caso um deles seja desligado, os outros ainda continuarão funcionando. Caso estejam em série, todos deixarão de operar. Uma segunda razão é de ordem prática, que está relacionada à instalação das caixas de som ao amplificador.

Qualquer que seja a configuração usada tenta-se sempre igualar a resistência total dos alto-falantes com a resistência de saída do amplificador.

**CAIXA DE FERRAMENTAS**

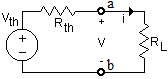


TRANSFORMAÇÃO DE FONTES:



, ,

TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA:



TEOREMA DE TELLENG:

Para um circuito com *b* bipolos:

Onde *vk* é a tensão no bipolo e *ik* é a corrente

**PROBLEMÁTICA**

1) Para o circuito mostrado na figura P4-1, encontre a corrente *i* e a potência absorvida pelo resistor de carga *RL = 2 ,* usando sucessivas transformações de fontes, até chegar em uma única malha.

**Resposta:** *i = 2 A* e *p = 8 W* .

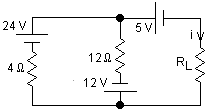
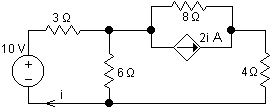


Fig. P4-1: Problema 1.

2) Encontre a corrente *i* no circuito da figura P4-2, usando transformações de fonte até chegar numa única malha.

**Resposta:** *6 A.*



**Fig. P4-2: Problema 2.**

3) Usando transformações de fontes até chegar numa única malha, encontre a corrente *i* no circuito da figura P4-3.

**Resposta:** *i = –5/4 A*.

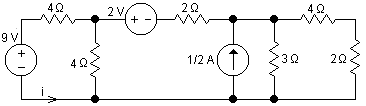


Fig. P4-3: Problema 3.

4) Use o teorema da superposição para encontrar a tensão *v* no circuito da figura P4-4.

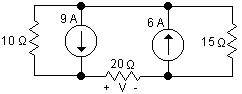


Fig. P4-4: Problema 4.

5) Use superposição para encontrar a tensão *vx* no circuito da figura P4-5.

**Resposta:** *26 V.*

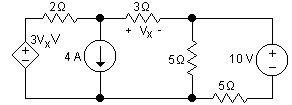


Fig. P4-5: Problema 5.

6) Encontre o equivalente de Thévenin nos terminais *a-b* do circuito da figura P4-6.

**Resposta:** *–24 V; 10 .*

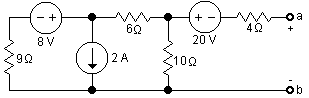


Fig. P4-6: Problema 6.

7) Encontre o equivalente de Thévenin nos terminais *a-b* do circuito da figura P4-7.

**Resposta:** *–90 V; 8 Ω*

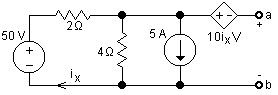


Fig. P4-7: Problema 7.

8) Encontre o equivalente de Thévenin nos terminais *a-b* do circuito da figura P4-8.

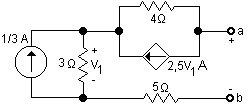


Fig. P4-8: Problema 8.

9) Encontre o equivalente de Norton dos circuitos dos problemas *6, 7* e *8*, sem utilizar o equivalente de Thévenin.

10) Calcule a máxima potência que cada um dos circuitos dos problemas *6, 7* e *8* pode fornecer à uma carga ligada nos terminais *a-b*.

11) Determine o valor da resistência *R* no circuito da figura P4-9 para o qual a transferência de potência do circuito para os terminais *a-b* é máxima. Nesta situação, determine o valor da potência máxima transferida.

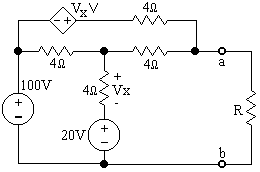


Fig. P4-9: Problema 11.

12) Mostre que a resistência equivalente vista por qualquer uma das fontes de tensão (com as demais nulas) do circuito da figura P4-10 é *3R*.

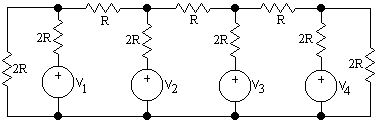


Fig. P4-10: Problema 12.

13) Para o circuito mostrado na figura P4-11, encontre o equivalente de Thevenin nos terminais *a-b*. “Plote” a curva *v × i* para os terminais *a-b*.

Diagrama, Esquemático

Descrição gerada automaticamente

Fig.P4-11: Problema 13.

14) Para o circuito mostrado na figura P4-12, encontre: (a) o equivalente de Thèvenin na porta *a-b*, (b) a corrente de curto circuito na porta *a-b*.

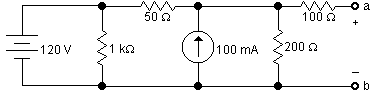


Fig. P4-12: Problema 14.

15) Para cada um dos circuitos mostrados na figura P4-13: (a) determinar a característica *v × i* da porta *a-b* plotando-a em seguida.

Gráfico, Diagrama

Descrição gerada automaticamente com confiança média

Fig. P4-13: Problema 15.

16) Suponha que os dois circuitos da figura P4-13 tenham os terminais de mesmo nome das portas *a-b* conectados. Encontre a tensão resultante na nova porta *a-b* obtida, bem como o equivalente de Thèvenin nessa porta.

17) No circuito da figura P4-14, o *LED* é visto como uma carga. Encontre o equivalente de Thévenin nos terminais do *LED* para o restante do circuito. Segundo a curva característica *v × i* mostrada na mesma figura, o *LED* estará aceso ou apagado?

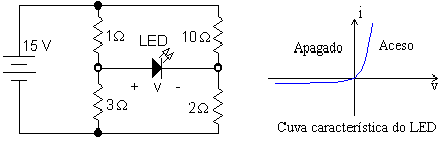


Fig. P4-14: Problema 17.

18) Suponha que as seguintes medidas tenham sido realizadas nos terminais *a-b* do circuito da figura P4-15:

1. Com um resistor de *15 kΩ* ligado nos terminais *a-b*, a tensão medida entre estes terminais foi *vab = 45 V*;
2. Com um resistor de *5 kΩ* ligado aos terminais *a-b*, a tensão medida foi de *25 V*.

Determine o circuito equivalente de Thévenin do circuito dentro da caixa, do ponto de vista dos terminais *a-b*.

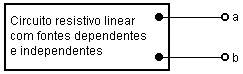


Fig. P4-15: Problema 18.

19) Use o teorema de Millman para encontrar o equivalente de Thévenin nos terminais *a-b* do circuito mostrado na figura P4-16.

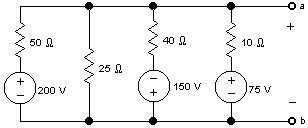


Fig. P4-16: Problema 19.

20) Use o teorema de Millman para encontrar a corrente *I* no circuito mostrado na figura P4-17.

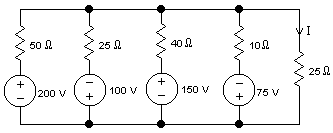


Fig. P4-17: Problema 20.

21) Um método padrão para se analisar um circuito contendo um elemento não-linear, como no circuito mostrado na figura P4-18, é achar o equivalente de Thévenin da parte linear do circuito nos terminais do elemento não-linear. Isto simplifica o circuito para três elementos em série. Depois, algum sistema numérico é aplicado ao circuito simplificado. Achar *I* no circuito mostrado na figura P4-18, que contém um elemento não-linear com uma relação *V × I* de *V = 3I2*.

**Resposta***: I = 2 A.*

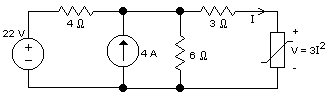
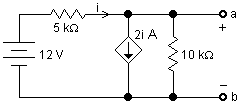


Fig. P4-18: Problema 21.

22) Determine o equivalente de Thévenin, visto pelos terminais *a-b*, para o circuito mostrado na figura P4-19.



**Fig. P4-19: Problema 22.**

23) Usando o teorema da substituição, desenhe três ramos equivalentes ao ramo *ab*, formado pelos resistores de 8 K e 7K que estão em série, no circuito mostrado na figura P4-20.

Diagrama, Esquemático

Descrição gerada automaticamente

**Fig. P4-20: Problema 23.**

24) Calcule a corrente *I* nos dois circuitos mostrados na figura P4-21 para comprovar o teorema da reciprocidade.

Diagrama, Esquemático

Descrição gerada automaticamente

**Fig. P4-21: Problema 24.**