II – Conceitos Preliminares

Este capítulo apresenta diversos tópicos teóricos básicos, que servem de instrumentos para os projetos constantes nos capítulos seguintes.

II.1 – Elementos Básicos

Os elementos situam-se em duas categorias, passivos e ativos. Os elementos passivos encontrados em eletrônica são constituídos por basicamente 3 componentes, o resistor, o capacitor e o indutor. Suas utilizações são fundamentadas na característica elétrica individual, ou seja, a relação entre a tensão ou corrente aplicada e a corrente ou tensão respectivamente produzida. Já os elementos ativos são apenas dois, a fonte de tensão e a fonte de corrente.

Na figura II.1 – 1 são mostrados formalmente os três componentes passivos e os dois elementos ativos.

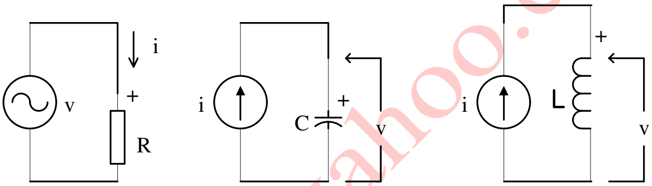

Figura II.1 – Símbolo elétrico dos componentes passivos usados em eletrônica. O resistor “R”, o capacitor “C” e o indutor “L”. Elementos ativos usados em eletrônica. A fonte de tensão “v” e a fonte de corrente “i”.

Os componentes passivos possuem suas características elétricas identificadas pela “Lei de Ohm”. Para o resistor, a relação pode assumir qualquer uma das três maneiras de se apresentar a mesma equação:

$$\boxed{R = \frac{v}{i}} \quad \boxed{v = R \cdot i} \quad \boxed{i = \frac{v}{R}} \qquad \text{(II.1)}$$

Para o capacitor e indutor, a relação fundamental não é algébrica e sim diferencial e integral, as quais não serão apresentadas neste livro. Para se poder trabalhar com capacitores e indutores com relações algébricas, é necessário realizar a transformada de Laplace [1], o que vem a facilitar bastante o projeto de circuitos eletrônicos. A seguir encontram-se tais relações:

$$\boxed{v(s) = \frac{i(s)}{sC}} \quad \boxed{i(s) = v(s) \cdot sC} \quad \boxed{sC = \frac{i(s)}{v(s)}} \qquad \text{(II.2)}$$

(1) Transformada de Laplace. Pierre Simon, Marquês de Laplace. Matemático, astrônomo e físico francês.

Onde:
i(s) – Corrente aplicada ao capacitor C.
v(s) – Tensão presente nos terminais do capacitor, quando é aplicada a corrente i(s).
s – Fator que leva em conta a frequência existente em i(s).

$$\boxed{v(s) = sL \cdot i(s)} \quad \boxed{i(s) = \frac{v(s)}{sL}} \quad \boxed{sL = \frac{v(s)}{i(s)}} \qquad \text{(II.3)}$$

Onde:
v(s) – Tensão aplicada nos terminais do indutor L.
i(s) – Corrente presente no indutor L, quando é aplicada a tensão v(s).
s – Fator que leva em conta a frequência existente em v(s).

Por enquanto basta saber que a resistência do resistor não é função da frequência, mas que a resistência do capacitor e do indutor são funções da frequência. Neste último caso, a resistência do capacitor é conhecida como reatância capacitiva e a do indutor é conhecida como reatância indutiva.

O termo impedância é a designação de uma combinação de resistência, independente da frequência, e reatância capacitiva ou indutiva, dependente da frequência. A impedância não precisa conter necessariamente os dois componentes (resistivo e reativo). Na verdade o termo impedância é usado genericamente para designar a relação ente a tensão e a corrente em um componente ou circuito. Este fato leva a concluir que a impedância não precisa ser composta exclusivamente de uma resistência e uma reatância. Em um circuito por vezes é necessário conhecer-se a impedância entre dois pontos elétricos, onde podem estar conectados diversos resistores, capacitores e indutores. Pode-se conhecer a impedância entre estes dois pontos e substituir todos estes componentes por um ou dois. Mais adiante, após a introdução das leis que regem os circuitos elétricos, constam exemplos aplicativos.

Dá-se o nome de circuito elétrico (ou eletrônico) à conexão de dois ou mais componentes elétricos. As figuras II.1 e II.2 contêm alguns exemplos de circuitos elétricos.

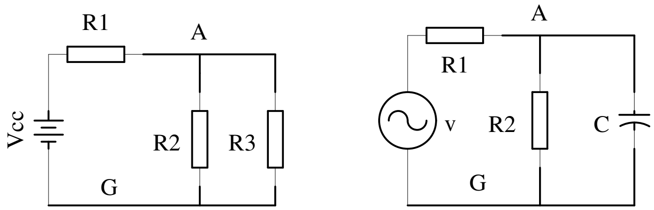

Figura II.2 – Exemplos de circuitos elétricos.

Um circuito elétrico possui nós, ramos e malhas. Os nós são os pontos de mesma tensão elétrica onde convergem os componentes do circuito. Por exemplo, na figura II.2 identificam-se os nós A e G nos dois circuitos. O nó A do circuito da esquerda é composto pela conexão dos resistores R1, R2 e R3. O nó G do mesmo circuito é composto pela conexão dos resistores R2 e R3 com o negativo da bateria. No circuito da direita da mesma figura, tem-se para o nó A, a conexão dos resistores R1 e R2 com o capacitor C. Já o nó G do mesmo circuito, é composto pela conexão do gerador de tensão alternada com o resistor R2 e o capacitor C.

Ramo é a denominação de um caminho para a corrente que passa por um ou mais componentes. Por exemplo, no circuito da esquerda da figura II.2, o resistor R2 forma um dos ramos entre os nós A e G. Outro ramo, no mesmo circuito, é formado pela bateria Vcc e pelo resistor R1.

Malha é a denominação de um caminho fechado (*loop*) para a corrente. Por exemplo, no circuito da esquerda na figura II.2 pode-se distinguir três malhas, a formada pela bateria, R1 e R2, a formada pela bateria, R1 e R3, e a formada pelos resistores R2 e R3.

II.2 – Lei de Kircchoff das Tensões e Correntes.

Para se poder projetar um circuito eletrônico, é necessário conhecer as leis que o regem. Tais leis são apresentadas a seguir.

Lei de Kircchoff das Tensões

A lei de Kircchoff[1] das tensões estabelece que a soma algébrica das tensões ao longo de uma malha é zero. A figura II.3 contém um exemplo.

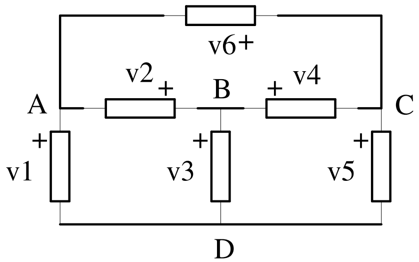

Figura II.3 – Exemplo de circuito com as referências positivas estimadas das tensões.

(1) – Gustav Robert Kircchoff. Físico alemão, nascido na Rússia.

Há uma convenção para escreverem-se as equações da lei de Kircchoff das tensões. Ao se percorrer a malha com uma corrente através dos componentes, as tensões com sinal positivo na saída da corrente no componente são consideradas positivas, já as tensões com sinal positivo na entrada da corrente no componente são consideradas negativas.

Do circuito da figura II.3 pode-se escrever as seguintes equações baseadas na lei de Kircchoff das tensões:

$$(1) \rightarrow +v1 + v2 - v3 = 0$$
$$(2) \rightarrow +v3 - v4 - v5 = 0$$
$$(3) \rightarrow +v6 + v4 - v2 = 0$$
$$(4) \rightarrow +v1 + v6 - v5 = 0$$
$$(5) \rightarrow +v1 + v6 + v4 - v3 = 0$$
$$(6) \rightarrow +v3 - v2 + v6 - v5 = 0$$

Normalmente não é necessário escrever-se todas as combinações possíveis de equações de malha do circuito para calculá-lo totalmente. A regra geral é que se forem traçadas as malhas no circuito, todos os componentes devem ter sido percorridos. O ideal é fazer isso com o menor número de malhas possível. As seguintes combinações de equações de malha poderiam ser adotadas:

(1), (2) e (3); (1), (2) e (4); (1), (2) e (6); (1), (2) e (5)

Lei de Kircchoff das Correntes

A lei de Kircchoff das correntes estabelece que a soma algébrica das correntes que entram ou saem de um nó é zero. A figura II.4 contém alguns exemplos.

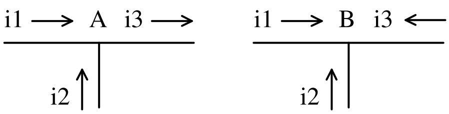

Figura II.4 – Alguns exemplos de correntes que concorrem à nós.

Costuma-se estimar o sentido da corrente da maior tensão para a menor tensão, como estimado nos nós A e B da figura II.4. Porém pode ocorrer que a estimativa não esteja correta. O sentido correto da corrente é determinado pelo cálculo do circuito. Se, por exemplo, calculou-se que a corrente i1 do nó A é de -3 ampères, isso significa que a na verdade a corrente I1 está saindo do nó A e não entrando. Ou seja, quando se calcula uma corrente e seu valor der negativo, significa que o sentido real desta corrente é o contrário do estimado.

Para relacionar a lei de Kircchoff com o cálculo das correntes em um nó, convenciona-se que as correntes que entram no nó são consideradas negativas e as que saem são consideradas positivas. Fazendo-se assim, tem-se para os nós A e B da figura II.4:

$$A \rightarrow -i1 - i2 + i3 = 0$$
$$B \rightarrow -i1 - i2 - i3 = 0$$

Obviamente que, observando-se tanto as correntes do nó B como a equação de Kircchoff para o mesmo nó, conclui-se que pelo menos alguma delas se encontra invertida, pois sempre a quantidade de corrente que entra em um nó é igual à quantidade de corrente que sai deste nó. O exemplo a seguir contém uma aplicação para firmar o conceito do exposto até aqui.

Exemplo II.2.1

Calcule a tensão e corrente em todos os componentes do circuito da figura II.4 à esquerda, usando a lei de Kircchoff das tensões e correntes.

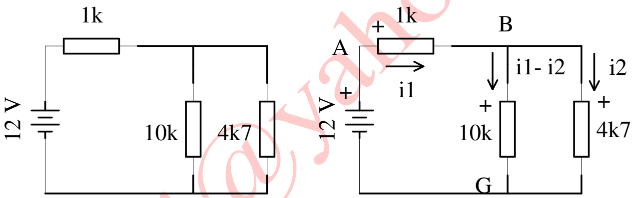

Figura II.4 – Circuito do exemplo II.2.1

Solução II.2.1

Considerando-se a lei de Kircchoff das correntes, escolhem-se convenientemente duas correntes i1 e i2, conforme o circuito da direita, na figura II.4. Tem-se:

$$-i1 + (i1 - i2) + i2 = 0$$

Observar que esta equação não contém mais nenhuma informação sobre o circuito. Ela simplesmente confirma que a escolha das correntes está correta, uma vez que satisfaz à lei de Kircchoff das correntes. Esta escolha foi possível devido ao fato de haverem apenas três ramos no nó. Se o valor de uma for i1 e da outra for i2, só sobrará, para o terceiro ramo, uma corrente que é formada pela soma algébrica dos outros dois ramos. O valor do sinal será determinado pelo sentido escolhido para as correntes.
Aplicando-se agora a lei de Kircchoff das tensões, têm-se as duas seguintes equações de malha:

$$+12 - 1k \cdot i1 - 10k \cdot (i1 - i2) = 0 \rightarrow 12 - 11k \cdot i1 + 10k \cdot i2 = 0 \quad (1)$$

$$10k \cdot (i1 - i2) - 4k7 \cdot i2 = 0 \rightarrow 10k \cdot i1 - 14k7 \cdot i2 = 0 \quad (2)$$

Da equação (1) explicita-se i1 em função de i2.

$$12 - 11k \cdot i1 + 10k \cdot i2 = 0 \rightarrow i1 = \frac{12 + 10k \cdot i2}{11k} \quad (1.1)$$

Substituindo-se i1 da equação (1.1) na equação (2), retira-se i2.

$$10k \cdot \frac{12 + 10k \cdot i2}{11k} - 14k7 \cdot i2 = 0 \rightarrow \frac{120k + 100k \cdot i2}{11k} - 14k7 \cdot i2 = 0$$

$$\frac{120}{11} + \frac{100k}{11} \cdot i2 - 14k7 \cdot i2 = 0 \rightarrow 10,9090 - 5609,09 \cdot i2 = 0 \rightarrow \boxed{i2 = 1,9445\,mA}$$

Da equação (1.1) retira-se i1.

$$i1 = \frac{12 + 10k \cdot 1,9445 \cdot 10^{-3}}{11k} \rightarrow \boxed{i1 = 2,8586\,mA}$$

A corrente através do resistor de 10k vale:

$$i1 - i2 = 2,8586 \cdot 10^{-3} - 1,9445 \cdot 10^{-3} \rightarrow \boxed{i1 - i2 = 0,9141\,mA}$$

Calculando-se as tensões nos componentes usando a lei de Ohm, equação (II.1).

$$V_{AB} = i1 \cdot 1k \rightarrow \boxed{V_{AB} = 2,8586\,V} \quad (3)$$

$$V_{BG} = i2 \cdot 4k7 \rightarrow \boxed{V_{BG} = 9,1392\,V} \quad (4)$$

$$V_{BG} = (i1 - i2) \cdot 10k \rightarrow \boxed{V_{BG} = 9,141\,V} \quad (5)$$

Somando-se as tensões $V_{AB} + V_{BG}$ (equações (3) + (4) ou (3) + (5)) tem que se obter o valor da tensão da bateria, a menos das aproximações realizadas nos cálculos numéricos.

$$12 = V_{AB} + V_{BG} \simeq 2,8586 + 9,1392 = 11,9978 \quad (6)$$

$$12 = V_{AB} + V_{BG} \simeq 2,8586 + 9,141 = 11,9996 \quad (7)$$

O erro relativo percentual da equação (6), devido às aproximações numéricas, é de:

$$e_r(\%) = \frac{\text{Valor Real} - \text{Valor Calculado}}{\text{Valor Real}} \cdot 100 = \frac{12 - 11{,}9978}{12} \cdot 100 \rightarrow \boxed{e_r = 0{,}018\,\%}$$

E o erro relativo percentual da equação (7), devido às aproximações numéricas é de:

$$e_r(\%) = \frac{\text{Valor Real} - \text{Valor Calculado}}{\text{Valor Real}} \cdot 100 = \frac{12 - 11{,}9996}{12} \cdot 100 \rightarrow \boxed{e_r = 0{,}003\,\%}$$

Equivalente Thévenin

Às vezes, quando se está projetando um circuito, é necessário substituir algum componente ativo qualquer, como um transistor, um amplificador operacional etc., pelo seu circuito equivalente. É comum, nesses casos, que o circuito fique com tantos componentes, que apenas utilizando as leis de Kirchchoff, o cálculo dos valores dos componentes fique expresso por um número de equações cuja solução seja demasiadamente trabalhosa. Para simplificar o circuito em tais situações, existe uma técnica baseada no teorema de Thévenin. O emprego deste teorema não reduz o número das equações do circuito e sim reduz a sua complexidade. O teorema de Thévenin afirma que qualquer combinação de resistores e fontes controladas (encontradas, por exemplo, em transistores, fets, mosfets e amplificadores operacionais), que possuam apenas dois terminais, podem ser substituídas por uma fonte de tensão equivalente (Veq) e uma resistência equivalente (Req).

No circuito (A), da figura II.5, é mostrado um exemplo. A tensão Veq é obtida isolando-se o trecho do circuito que se deseja aplicar o teorema. Neste caso o indicado pela seta. O trecho isolado se encontra no circuito (B). Após isolá-lo, calcula-se o valor de Veq. Esta será a tensão Thévenin.

Para identificar-se a resistência equivalente Req, curto-circuitam-se todas as fontes de tensão e retiram-se todas as fontes de corrente, porém, deixando suas conexões abertas. (figura II.5, circuito (C)). O novo trecho de circuito fica como mostrado em (D). Em (E) tem-se o circuito simplificado, no caso de Vcc = 12V, R1 = 1kΩ, R2 = 10kΩ e R3 = 4k7Ω.

O exemplo a seguir contém uma aplicação deste teorema.

Exemplo II.2.2

Considere o circuito à esquerda da figura II.5.

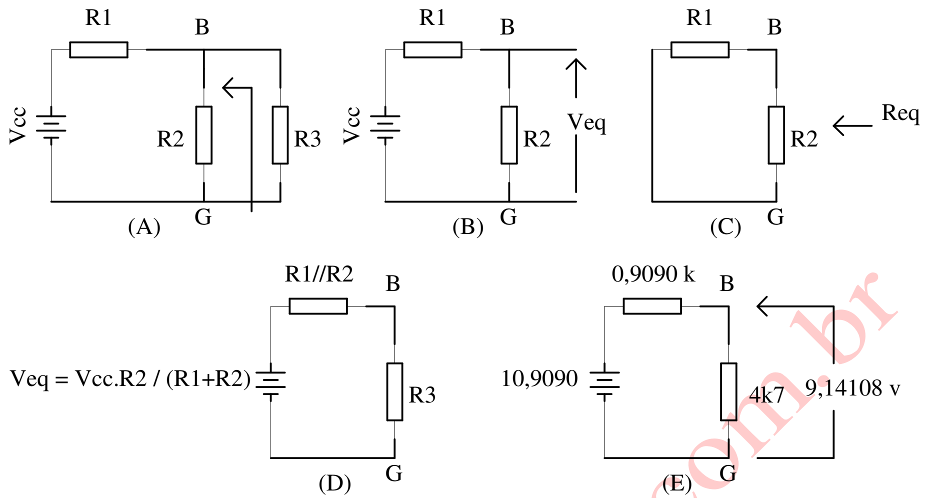

Figura II.5 – Diversas etapas da aplicação do teorema de Thévenin até a solução do valor da tensão e impedância de saída.

a) Qual é o circuito equivalente Thévenin nos pontos B e G, entre os resistores R2 e R3, "olhando-se" para a esquerda?
b) Qual é a tensão sobre o resistor R3, para Vcc = 12 volts, R1 = 1kΩ, R2 = 10kΩ e R3 = 4k7Ω (os mesmos valores do exemplo anterior)?
c) Se o conjunto Vcc, R1 e R2 formasse a etapa de saída de um amplificador e R3 a carga do amplificador, qual seria a impedância de saída deste amplificador?

Solução II.2.2

a) Qual é o circuito equivalente Thévenin nos pontos B e G, entre os resistores R2 e R3, "olhando-se" para a esquerda?
Resposta: Isola-se o circuito do trecho desejado, como mostrado na Figura II.5, (B).

b) Qual é a tensão sobre o resistor R3, para Vcc = 12 volts, R1 = 1kΩ, R2 = 10kΩ e R3 = 4k7Ω (os mesmos valores do exemplo anterior)?
Resposta:
Calcula-se a tensão equivalente Thévenin (Veq).

$$Veq = R2 \cdot i = R2 \cdot \frac{Vcc}{R1 + R2} \rightarrow \boxed{Veq = Vcc \cdot \frac{R2}{R1 + R2}},$$ que para os valores fornecidos, tem-se:

$$Veq = 12 \cdot \frac{10k}{1k + 10k} \rightarrow \boxed{Veq = 10{,}9090\,V}$$

Calcula-se a resistência equivalente Thévenin (Req). Do circuito em (C), tem-se:

$$Req = R1//R2 = \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}} \rightarrow \boxed{Req = 0{,}9090\,k}$$

De posse destas informações, substitui-se o trecho considerado pelos dois elementos e completa-se o circuito original. Vide circuito (E) na figura II.5. A tensão sobre o resistor R3 será:

$$V_{R3} = R3 \cdot i = 4k7 \cdot \frac{10{,}9090}{0{,}9090k + 4k7} \rightarrow \boxed{V_{R3} = 12{,}001\,V}$$

O erro percentual relativo, devido às aproximações numéricas, será:

$$e_r(\%) = \frac{\text{Valor Real} - \text{Valor Calculado}}{\text{Valor Real}} \cdot 100 = \frac{12 - 12{,}001}{12} \cdot 100 \rightarrow \boxed{e_r = -0{,}008\,\%}$$

c) Se o conjunto Vcc, R1 e R2 formasse a etapa de saída de um amplificador e R3 a carga do amplificador, qual seria a impedância de saída deste amplificador?
Resposta:
A resistência de saída do amplificador seria a resistência equivalente Req, ou 909Ω.

O emprego do teorema de Thévenin reduziu o trabalho para se calcular a solução do circuito. Compare este exemplo com o exemplo anterior.

Exemplo II.2.3

Dispõe-se de uma fonte de alimentação de 5 volts e precisa-se projetar uma fonte de tensão de referência com 3,5 volts e uma resistência interna de 1000 Ω. Qual seria um possível circuito?

Solução II.2.3

A figura II.6 mostra o circuito da fonte de referência e seu circuito equivalente Thévenin. Este circuito equivalente, representado por uma fonte de tensão em série com uma resistência, possui as mesmas propriedades elétricas do circuito original.

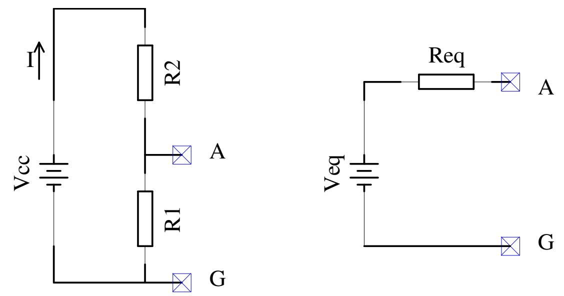

Figura II.6 – Esquerda. Circuito de uma fonte de tensão de referência e seu equivalente Thévenin à direita.

A tensão V_{AG}, equivalente à tensão Veq da figura II.6, vale:

$$V_{AG} = I \cdot R1 = \frac{Vcc}{R1 + R2} \cdot R1 = Vcc \cdot \frac{R1}{R1 + R2} \quad (1)$$

Substituindo-se os valores conhecidos na equação (1), tem-se:

$$3,5 = 5 \cdot \frac{R1}{R1 + R2} \rightarrow 3,5 \cdot (R1 + R2) = 5 \cdot R1 \rightarrow R2 = \frac{(5 - 3,5) \cdot R1}{3,5} = 0,429 \cdot R1 \quad (1.1)$$

A resistência equivalente, vista pelos terminais AG é obtida curto-circuitando-se a fonte Vcc. A resistência equivalente Req vale o paralelo das duas resistências ou R1//R2.

$$\frac{1}{Req} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \quad (2)$$

Substituindo o valor de Req pelo valor desejado 1000Ω na equação (2), tem-se:

$$10^{-3} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \quad (2.1)$$

Substituindo R2 da equação (1.1) na equação (2.1), tem-se:

$$10^{-3} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{0,429 \cdot R1} = \frac{1 + 1/0,429}{R1} = \frac{3,331}{R1} \rightarrow \boxed{R1 = 3331\Omega}$$

Substituindo R1 na equação (2.1), tem-se R2:

$$10^{-3} = \frac{1}{3331} + \frac{1}{R2} \rightarrow \frac{1}{R2} = 10^{-3} - \frac{1}{3331} \rightarrow \boxed{R2 = 1429\Omega}$$

Substituindo-se os valores de R1 e R2 na equação (1), que fornece V_{AG}, encontra-se o valor desejado de 3,5V. Substituindo os valores dos resistores calculados na equação (2), encontra-se o valor de 1000Ω para Req.

Equivalente Norton

- Regra associativa das tensões e correntes dos circuitos lineares. Colocar na teoria.
- Conceito de frequência de corte inferior e superior.