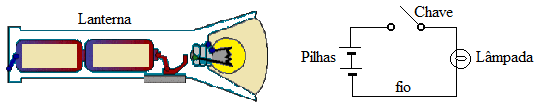
CAPÍTULO 1

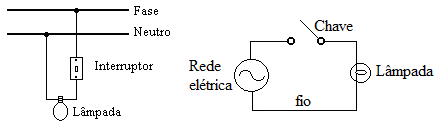
**VARIÁVEIS E ELEMENTOS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS**

1.1 INTRODUÇÃO

Circuito elétrico é uma *interconexão de dispositivos elétricos* ligados de tal maneira a formarem um caminho fechado por onde deve passar um fluxo de cargas elétricas. Um exemplo simples de um circuito elétrico é o de uma lâmpada em uma lanterna ou na rede elétrica, que é ilustrado na figura 1-1(a) e (b) com seus respectivos *esquemas elétricos*. O primeiro é um circuito de corrente contínua e o segundo, um circuito de corrente alternada senoidal. Em qualquer um destes casos observam-se três elementos básicos: (1) um dispositivo que fornece energia, genericamente chamado de gerador ou *fonte*; (2) um dispositivo de controle, neste caso uma chave para acionar a lâmpada e (3) um dispositivo consumidor de energia, genericamente chamado de *carga*, neste caso, a lâmpada.



(a)



(b)

Fig. 1-1: (a) Circuito de uma lanterna; (b) Circuito de uma lâmpada na rede elétrica.

**CIRCUITOS CONCENTRADOS**

As leis básicas da teoria de circuitos podem ser deduzidas das equações de Maxwell, através de simplificações convenientes, geralmente demonstradas no estudo do eletromagnetismo. A *principal simplificação* adotada é considerar o sistema elétrico como sendo de *elementos concentrados*, isto é, considerar que sua maior dimensão física é muito inferior a *λ/8*, onde *λ* é o comprimento de onda, no vácuo, da onda eletromagnética de maior frequência a ser considerada no sistema.

Lembrando que frequência (*f*) e comprimento de onda (*λ*) estão relacionados pela equação:

onde *C = 3×108 m/*s, é a velocidade da luz no vácuo, podemos elucidar nossa simplificação com os exemplos seguintes:

Exemplo 1: Suponha-se uma rede elétrica operando em *60 Hz*, onde podem estar presentes frequências até a 10a harmônica, ou seja, a frequência mais elevada é *f = 10(60) = 600 Hz*. Então se tem:

🡪  *≈ 62500 m* ou

Portanto, um circuito com dimensões bem menor que *62,50 km*, pode ser considerado concentrado e se aplicar a teoria dos circuitos de forma simplificada com bons resultados.

Exemplo 2: Vamos considerar agora um receptor de *FM* operando em frequências próximas de *100 MHz*. Então se tem:

🡪 *λ/8 = 0,37 m*

Assim, se o circuito em questão tiver dimensão maior do que *0,37 m*, já não pode ser analisado precisamente pela teoria simplificada dos circuitos.

Para *circuitos digitais* as dimensões se tornam ainda bem menores. Por exemplo, supondo um circuito digital trabalhando com pulsos cujo chaveamento dura em torno de *1 ns*, as dimensões teriam que ser menores que *37,5 mm*.

1.2 CARGA ELÉTRICA, TENSÃO ELÉTRICA E CORRENTE ELÉTRICA

**CARGA ELÉTRICA**

É a *quantidade de eletricidade* responsável por todos os fenômenos elétricos. A natureza provê dois tipos de cargas elétricas: *positivas* e *negativas*. Estas cargas são *quantificadas* (ou *quantizadas*), isto é, todas as cargas elétricas são múltiplos inteiros da carga de um elétron, que vale aproximadamente *1,602×10-19 C*. Seus principais efeitos observáveis são: a *corrente elétrica* causada pelo movimento das cargas, e a *tensão elétrica* causada pela separação de cargas.

**CORRENTE ELÉTRICA**

Uma quantidade de cargas elétricas atravessando uma seção transversal de um fio, num intervalo de tempo , fornece uma *corrente média* nesse intervalo. Com mais precisão, define-se a *corrente instantânea* como a taxa de variação da carga com o tempo.

Estas duas definições podem ser expressas matematicamente por:

*(corrente média)* (1-1)

*(corrente instantânea)*  (1-2)

onde *i* é a corrente em Ampères [*A*], *q* é a carga em Coulombs [*C*] e *t* é o tempo em segundos [*s*]

Estas definições de corrente elétrica levam em conta apenas a sua *magnitude*. Porém, como ela representa um movimento de cargas positivas ou negativas, há de se considerar também o sentido dela. Entretanto, quando se fala em sentido, não implica dizer que a corrente elétrica seja uma grandeza vetorial. Ela é uma *grandeza escalar*.

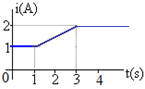
A *natureza da corrente* elétrica depende do material por onde ela flui. Nos condutores metálicos, por exemplo, ela consiste no movimento de *elétrons livres* presente em grande quantidade nesses materiais; nos semicondutores, são *elétrons e lacunas*; nos líquidos, são *elétrons e íons*; e nos gases, são apenas *íons*.

Para uma dada corrente elétrica variante com o tempo, *i(t)*, pode-se calcular a carga elétrica que atravessa um circuito, em função do tempo, a partir da equação (1-2), aplicando-se conhecimentos de cálculo, resultando em:

 (1-3)

onde *q(to)* é a carga inicial existente até o instante *to*

Exemplo 3: Encontre a carga *q(t)* quando a corrente que entra no terminal positivo de um elemento, em função do tempo, varia conforme mostrada na figura 1-2. Supõe-se que até o instante zero o elemento estava desligado, não havendo nenhuma carga presente, ou seja, *q(0) = 0*.



**Fig. 1-2: Corrente variante com o tempo do exemplo 3.**

Solução: analiticamente esta corrente pode ser expressa por:

*i(t) =*

Usando a equação (1-3) encontra-se:

**TENSÃO ELÉTRICA**

É a energia (ou trabalho) por unidade de carga usada para separar ou transportar cargas. Matematicamente escreve-se:

(1-4)

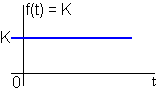
onde *v* é a tensão em volts [*V*], *w* é a energia em Joules [*J*] e *q* é a carga em Coulomb [*C*].

Alguns livros fazem distinção entre tensão elétrica como sendo uma *diferença de potencial elétrica* entre dois pontos quaisquer de um circuito e *força eletromotriz* como sendo o trabalho por unidade de carga, produzido por um campo elétrico interno ao gerador de energia. Por exemplo, numa bateria de carro, de *12 V*, a reação química dentro da bateria resulta numa força eletromotriz de *12 V* que faz surgir cargas elétricas de sinais opostos nos bornes da bateria. O campo elétrico gerado por essas cargas estáticas presentes nos bornes é que dá origem à tensão elétrica ou diferença de potencial no circuito ligado a ela. Quando não há nada ligada aos bornes da bateria, a diferença de potencial é igual à força eletromotriz.

Correntes e tensões podem variar ou não com o tempo, o que pode resultar em diversas formas de tensão ou corrente, como visto a seguir.

**CORRENTE OU TENSÃO CONTÍNUA**

É a corrente ou tensão constante para todo o intervalo de tempo, mantendo sempre a polaridade (no caso da tensão) e o mesmo sentido (no caso da corrente), conforme mostra a figura 1-3, onde *K* representa o valor constante de tensão ou corrente.

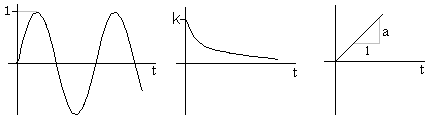


**Fig. 1-3: Corrente ou tensão DC em função do tempo**

Como exemplo prático de tensão ou corrente contínua se pode citar aquelas provenientes de *baterias*, *pilhas*, *dínamos* e *painéis solares*.

**CORRENTE OU TENSÃO VARIANTE COM O TEMPO**

Neste caso podemos ter diversas formas de onda conforme exemplos mostrados na figura 1-4, onde se tem alguns casos típicos de tensão ou de corrente assumindo a forma de funções matemáticas conhecidas.



(a) *f(t) = sen(ωt)* (b) *f(t) = Ke–bt* (c) *f(t) = at*

### Fig. 1-4: (a) Função senoidal; (b) Função exponencial; (c) Função rampa

Um exemplo de corrente ou tensão senoidal são aquelas provenientes das *tomadas elétricas* de nossas residências; a função exponencial pode ser observada durante a carga ou descarga de um capacitor ou indutor e a função rampa é encontrada nos geradores de ondas triangulares.

**POLARIDADES E SENTIDOS DE REFERÊNCIA PARA TENSÕES E CORRENTES ELÉTRICAS**

Quando se começa a analisar pela primeira vez um circuito, a tendência é a de se preocupar com a polaridade real da tensão ou o sentido real da corrente num determinado elemento do circuito. Esta preocupação, entretanto, não deve existir, pois a escolha da polaridade de referência para as tensões e o sentido de referência para as correntes em um elemento de dois terminais (denominados *bipolos*) é arbitrária. O importante é que, uma vez feita esta escolha, todas as equações devem ser escritas obedecendo a convenção escolhida.

A convenção mais adotada é chamada *convenção passiva* para tensão e corrente, em que, o sentido da corrente positiva, indicado por uma seta, vai do terminal positivo, de maior potencial (indicado pelo sinal "+"), para o terminal negativo, de menor potencial (indicado pelo sinal "–"), do bipolo, conforme mostra a figura 1-5. A tensão supostamente positiva é dada por *v12* (ou simplesmente *v*) e a tensão supostamente negativa é dada por *v21* (ou simplesmente *–v*). Já a corrente supostamente positiva é dada por *i12* (ou simplesmente *i*) e a corrente supostamente negativa é dada por *i21* (ou simplesmente –*i*). Note-se que *v12 =* –*v21* e *i12 =* –*i21*.



**Fig. 1-5: Convenção passiva para um bipolo.**

1.3 POTÊNCIA ELÉTRICA E ENERGIA ELÉTRICA

**ENERGIA**

É a capacidade de realização de um trabalho, sendo numericamente igual a este trabalho realizado, isto é, quando se realiza certa quantidade de trabalho, se gasta a mesma quantidade de energia para realizar este trabalho.

Tanto a energia quanto o trabalho são medidos em Joule (*J*) no sistema *SI*.

**POTÊNCIA**

É a taxa de variação da energia, ou do trabalho por ela produzido, com o tempo, isto é, a potência está associada a velocidade (taxa de variação) com que um trabalho é realizado ou uma energia é gasta. Esta taxa de variação é dada por:

(1-5)

Da equação (1-5), multiplicando e dividindo o segundo membro por *dq*, deduz-se uma fórmula mais adequada para a análise de circuitos, dada por:

*p(t) = v(t)i(t)* (1-6)

onde *v* é a tensão em volt [*V*], *i* é a corrente em ampère [*A*] e *p* é a potência em watt [*W*]. A equação (1-6) fornece a *potência instantânea*, que é válida sempre, independente da forma de onda da tensão ou da corrente.

OBSERVAÇÃO: Existem duas unidades de potência muito utilizadas, principalmente em máquinas e motores, para indicar a potência máxima que eles podem desenvolver, chamada de *potência útil*, dadas em *HP* (Horse Power) ou *CV* (Cavalo Vapor). Esta potência também é chamada de *potência mecânica*. A correspondência destas potências com o Watt é:

*1 HP = 746 W* (aproximadamente) e *1 CV = 735 W* (aproximadamente)

É costume expressar o rendimento destas como sendo a relação entre a potência útil que o dispositivo desenvolve para realizar certo trabalho e a potência que ele consome que, obviamente, é maior que a potência útil. Chamando de *η* (*eta*) este rendimento, *pu* a potência útil e *pT* a potência total consumida, pode-se expressar o rendimento assim:

ou em termos percentuais:

**POTÊNCIA ABSORVIDA E POTÊNCIA FORNECIDA**

Na convenção passiva, a *potência* será *absorvida* por um elemento quando o sentido da corrente positiva for do ponto de maior potencial (indicado por "+") para o ponto de menor potencial (indicado por "–"). Caso contrário, a potência será fornecida pelo elemento. A figura 1-6 ilustra as duas situações.



**Fig. 1-6: Convenção para a potência.**

Observe que:

# *Potência absorvida = – Potência fornecida*

A energia em função da potência pode ser calculada em qualquer instante pela equação (1-7), advinda da equação (1-5). Aplicando-se conhecimentos de cálculo, tem-se:

 (1-7)

Onde *w(to)* é a energia inicial existente até o instante *to*.

OBSERVAÇÃO: quando o consumo de energia é grande, a energia costuma ser medida em *quilowatt-hora (KWh)*, como, por exemplo, nos medidores residenciais.

Exercício: A corrente e a tensão variam sobre um elemento conforme figura 1-7. Esboce a potência, em função do tempo, entregue ao elemento para *t > 0*. Qual é a energia total entregue entre *t = 0* e *t = 25 s*?

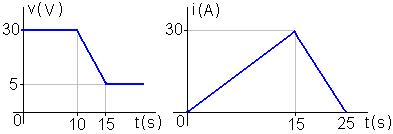
**Resposta:** *p(t) = 60t, 0 t < 10*

*= –10t2 + 160t, 10 t < 15*

*= –15t + 375, 15 t < 25*

*= 0, t 25*

*w0-25 = 5,83 kJ*



**Fig. 1-7: Tensão e corrente em função do tempo.**

Exercício: um motor de *120 V* consome *12 A* e desenvolve uma potência de saída de *1,6 hp*. Determine: (a) a eficiência do motor; (b) a quantidade de potência desperdiçada.

1.4 INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Medidas de corrente e tensão são feitas por medidores analógicos (*com ponteiro*) ou digitais (com "display").

Um *amperímetro ideal* mede a intensidade de corrente através de seus terminais conforme mostra a figura 1-8(a) e tem tensão *vm* nula entre seus terminais (isso significa dizer que o amperímetro ideal tem resistência interna nula).

Um *voltímetro ideal* mede a tensão entre seus terminais, como mostra a figura 1-8(b), e tem corrente *im* nula através de seus terminais (isso significa dizer que um voltímetro ideal tem resistência interna infinita).

O *wattímetro* mede a potência dissipada, tendo três terminais para sua conexão em série-paralelo, conforme mostra a figura 1-8(c).

Observe que o amperímetro é sempre ligado em série (nunca em paralelo!) com o elemento ou circuito onde se deseja medir a corrente. Por outro lado, o voltímetro é sempre conectado em paralelo com o elemento ou circuito. A polaridade desses medidores também deve ser observada para a correta leitura. Na figura 1-8(a), a corrente indicada no amperímetro teria o sentido convencionado para *i*, bem como a tensão indicada pelo voltímetro, teria a polaridade convencionada para *v*, na figura 1-8(b)

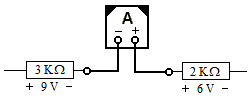
Uma imagem contendo relógio

Descrição gerada automaticamente

(a) (b) (c)

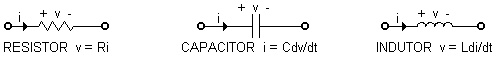
**Fig. 1-8: (a) Amperímetro em série; (b) Voltímetro em paralelo; (c) Wattímetro em série-paralelo.**

Exercício: Que leitura de corrente é fornecida pelo amperímetro da figura abaixo?



1.5 ELEMENTOS DE CIRCUITOS

Elementos de circuitos são *modelos simplificados*, quase sempre *ideais*, usados para representar dispositivos físicos que compõem um circuito. Normalmente são representados por um símbolo e uma equação como mostra a figura 1-9.



**Fig. 1-9: Símbolos de alguns elementos de circuitos**

Os elementos ou circuitos, objetos deste estudo, serão considerados lineares ou aproximados por um modelo linear e invariantes no tempo. É importante, portanto, definir o que é linearidade e invariância no tempo.

**LINEARIDADE**

Diz-se que um elemento ou sistema é linear se ele satisfaz simultaneamente às propriedades da homogeneidade e da aditividade. Ou seja, a resposta a uma soma ponderada de sinais de entrada é igual à soma de sinais de saída com a mesma ponderação, sendo cada sinal de saída associado a um sinal de entrada agindo isoladamente. Se, por exemplo, *y1(t)* for a resposta de um circuito a uma entrada particular *x1(t)* e *y2(t)* for a resposta deste mesmo circuito a uma entrada *x2(t)*, então este circuito será linear se sua resposta a entrada *a1x1(t) + a2x2(t)* for *a1y1(t) + a2y2(t)*, onde *a1* e *a2* são constantes.

Exemplo de sistemas lineares:

*y(t) = ax(t)*

*y(t) = adx/dt*

onde *x(t)* é a entrada (excitação), *y(t)* é a saída (resposta) e *a* é uma constante.

Exemplos de sistemas não lineares:

*y(t) = ax2(t)*

*y(t) = ax(t) + b*

Exercício: Um elemento tem uma tensão e uma corrente, relacionadas da seguinte forma:

*v(t) = Ri(t)* para *i > 0* e *v(t) = 0* para *i < 0*, onde *R* é uma constante

Pergunta-se: o elemento é linear? Por quê?

**INVARIÂNCIA NO TEMPO**

Diz-se que um elemento ou um circuito é invariante no tempo se um deslocamento de tempo na sua excitação leva a um deslocamento de tempo idêntico na sua resposta, ou seja, a resposta do sistema independe do instante em que a excitação é aplicada. Se, por exemplo, *x(t)* é a excitação de um sistema e *y(t)* é a sua resposta, então o sistema será invariante no tempo se a entrada *x(t + t0)* produzir a saída *y(t + t0)*.

1.6 ELEMENTOS PASSIVOS E ATIVOS

Um elemento é dito passivo se, ao adotar-se o sentido associado para corrente e tensão, a energia entregue a ele pelo restante do circuito é sempre *não negativa* em qualquer instante, isto é:

*w(t) ≥ 0*, para todo *t*

Se essa condição não é satisfeita, o elemento é dito ativo.

Não se deve entender como elemento passivo aquele que recebe energia e como elemento ativo aquele que fornece energia. Veja, por exemplo, o caso de uma bateria que recebe energia quando está sendo carregada e, no entanto, ela é um elemento ativo. Por outro lado, um capacitor pode fornecer energia quando está sendo descarregado e, no entanto, ele é um elemento passivo.

Exemplo 4: A corrente entrando no terminal positivo de um elemento é *i = 2sen(t) A* para *t ≥ 0* e *i = 0* para *t < 0*, enquanto que a tensão sobre o elemento é *v = 2di/dt V*. Determine se o elemento é passivo ou ativo.

Solução: como *i(t) = 2sen(t)*, então:

Portanto a energia será:



Como esta energia é sempre não negativa (*w(t) ≥ 0*), então o elemento é passivo.

1.7 RESISTOR

É o elemento para o qual sua tensão, *v(t)*, e sua corrente, *i(t)*, em qualquer instante, satisfazem uma relação definida por um gráfico no plano *v×i*, chamado de *curva característica* do resistor. Ou seja:

*v(t) = Ri(t)* ou *i(t) = Gv(t),* com (1-8)

Onde *R* é a resistência elétrica do resistor dada em *Ohm (Ω)* e *G* é a sua condutância dada em *Siemen (S)*. Se *R* for constante, ou seja, não depender de *v* e *i*, diz-se que o resistor é linear. A equação (1-8) foi escrita adotando-se a convenção passiva, ou seja, supondo-se que a corrente positiva está entrando no terminal positivo do elemento. Esta equação é uma das *leis de Ohm*.

Para uma dada temperatura, a resistência de um resistor depende: das dimensões físicas do dispositivo, da geometria e do material de que é feito. Para um dispositivo de comprimento *l*, área de seção transversal uniforme *A* e material de resistividade *ρ*, a resistência elétrica pode ser calculada pela *lei de Ohm*:

(1-9)

Por exemplo, a resistência de um cabo comum de TV, de *10 m* de comprimento é em torno de *2 mΩ*.

A tabela 1-1 mostra o valor da resistividade de alguns materiais, à temperatura ambiente.

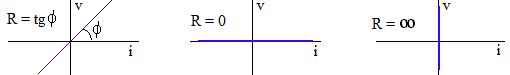
## **Tabela 1-1 Resistividade de alguns materiais**

|  |  |
| --- | --- |
| MATERIAL | RESISTIVIDADE *ρ (ohm×cm)* |
| Poliestireno | *1,0×1018* |
| Silício | *2,3×105* |
| Carbono | *4,0×10–3* |
| Alumínio | *2,7×10–6* |
| Cobre | *1,7×10–6* |

OBSERVAÇÃO: a resistência de um fio condutor em corrente contínua é diferente da resistência em corrente alternada senoidal, por causa do efeito *“skin” (efeito pelicular)* que ocorre na corrente alternada, onde a corrente procura a periferia do condutor fazendo com que a área *A* se torne apenas uma coroa periférica, e, assim, a resistência do fio aumenta. Este fenômeno, entretanto, só é considerado em transmissão de alta tensão.

**CURVA CARACTERÍSTICA DO RESISTOR**

A *curva característica* de um resistor linear é uma reta passando na origem conforme mostra a figura 1-10(a). A inclinação da reta representa a resistência do resistor. Se a inclinação for nula temos um resistor de resistência zero que equivale a um *curto-circuito* conforme mostra a figura 1-10(b). Se a inclinação for de 90º, temos um resistor de resistência infinita que equivale a um *circuito aberto* conforme figura 1-10(c). Portanto, um curto-circuito ocorre quando a tensão é nula para qualquer valor de corrente enquanto um circuito aberto representa uma situação onde a corrente é nula para qualquer valor de tensão.



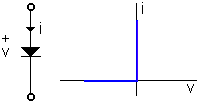
(a) (b) (c)

#### Fig. 1-10: Curva característica de um resistor linear

Exercício: Um cabo cilíndrico de cobre muito utilizado em instalações elétricas é o cabo de seção circular *4 mm2*. Encontre a resistência elétrica de *10 Km* desse fio. Obs: para o cobre, *ρ = 1,7×10–8 Ωm.*

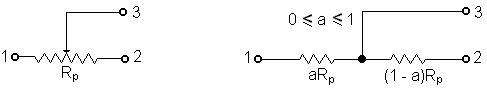
**Resposta:** *42,50 Ω*

Um resistor não linear é aquele que não satisfaz o requisito de homogeneidade ou de aditividade. Por exemplo, um diodo, cuja curva característica para o caso ideal é mostrada na figura 1-11, pode ser visto como um resistor não linear.



**Fig. 1-11: Diodo ideal e sua curva característica**

Um resistor variante com o tempo tem sua resistência variável com o tempo de forma contínua ou mesmo discreta. Um potenciômetro, por exemplo, é um resistor cuja resistência pode ser ajustada, a qualquer instante entre o valor zero e um valor máximo, *Rp*, conforme mostra a figura 1-12(a), onde o terminal *3* é móvel (chamado de cursor). Para facilidade de análise, o potenciômetro pode ser modelado conforme esquematizado na figura 1-12(b). Neste modelo, quando *a = 0*, o cursor estará conectado ao terminal *1*e quando *a = 1*, o cursor estará conectado ao terminal *2*



(a) (b)

**Fig. 1-12: (a) Símbolo de um potenciômetro; (b) Modelo para o potenciômetro de resistência máxima *Rp***.

Exercício: O potenciômetro da figura 1-12 tem resistência máxima igual a *10 KΩ*. Encontre as resistências *R13* e *R23* quando: (a) o cursor estiver no terminal *1*; (b) o cursor estiver no terminal *2*; (c) o cursor estiver exatamente no centro, entre os terminais *1* e *2.*

**POTÊNCIA DISSIPADA NO RESISTOR**

Embora a finalidade de um resistor nem sempre seja a de produzir calor, a potência dissipada por ele é sempre em forma de calor. Essa potência pode ser calculada, como já vimos, pela equação (1-6):

*p(t) = v(t)i(t)*

No caso de o resistor ser linear, onde: *v(t) = Ri(t)* ou *i(t) = v(t)/R*. Então, substituindo-se estas expressões na equação (1-6), pode-se escrever:

*p(t) = Ri2(t)* (1-10)

ou (1-11)

Analisando-se as equações (1-10) e (1-11), é comum surgir a seguinte dúvida: a potência aumenta ou diminui com o aumento da resistência? Na primeira equação a potência parece aumentar enquanto na segunda, parece diminuir. A resposta correta depende de qual quantidade (*v* ou *i*) permanece constante.

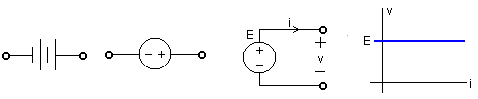
Exemplos práticos de resistores são encontrados em ferro de passar, secador de cabelos, chuveiro elétrico, ferro de solda, e na maioria dos circuitos eletrônicos. Neste ú

1.8 FONTES INDEPENDENTES

Fonte independente é aquela que estabelece uma tensão ou corrente em um circuito, independentemente dos valores de tensão ou corrente em outros pontos do circuito. O valor da tensão ou corrente fornecida depende apenas da capacidade de geração da fonte. Como exemplo de fontes de tensão independente pode-se citar a bateria de um carro, a pilha de um rádio, a tomada de energia elétrica de uma residência, o dínamo usado em bicicletas etc. Existem dois tipos de fontes independentes:

**FONTE DE TENSÃO**

Na *forma ideal*, é aquela que consegue manter uma tensão especificada nos terminais de um circuito arbitrário, para qualquer corrente solicitada pelo circuito. Seus símbolos são mostrados na figura 1-13. O símbolo da figura 1-13(a) normalmente é usado quando se trata de uma bateria ou pilha. O da figura 1-13(b) pode ser usado indistintamente para qualquer tipo de fonte de tensão. As figuras 1-13(c) e (d) mostram uma fonte de tensão constante, ideal, de valor *E* e sua curva característica, respectivamente.



(a) (b) (c) (d)

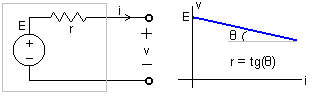
Fig. 1-13: (a) Bateria ideal; (b) Fonte ideal de tensão; (c) Fonte de tensão constante *E*; (d) Curva característica.

Uma *fonte de tensão real* consegue manter uma tensão especificada praticamente invariável até certo limite de corrente solicitada, limite este imposto pelos elementos não ideais que compõem a fonte. Na verdade, a tensão fornecida ao circuito sofre uma queda gradativa à medida que a corrente vai aumentando; é o chamado *efeito de carga*. Podemos então visualizar uma fonte real como sendo uma fonte ideal em série com uma pequena resistência *r*, chamada de *resistência interna* da fonte conforme mostra a figura 1-14(a). Portanto, a tensão nos terminais da fonte real será dada pela equação da reta mostrada na figura 1-14(b):

*v = E – ri* (1-12)

Onde *r* é a resistência interna da fonte. No caso ideal, *r = 0*

A figura 1-14(b) mostra o gráfico da reta, que é a curva característica desta fonte real. Note que a inclinação da reta é a própria resistência interna da fonte.



(a) (b)

**Fig. 1-14: Fonte real e sua curva característica**.

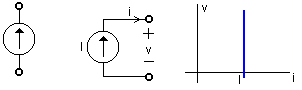
Sendo muito pequena a resistência interna de uma fonte de tensão, os terminais da fonte nunca devem ser colocados em curto-circuito, pois a corrente na resistência interna será muito alta, provocando o superaquecimento e consequente dano à fonte.

Especificamente no caso de baterias, o limite de corrente está vinculado ao seu tempo de uso, sendo o produto da corrente pelo tempo, definido como a *capacidade da bateria*, dada em *Ampère-hora (Ah)*. Para uma bateria nova, o fabricante dela costuma estimar e especificar uma capacidade nominal*,* em *Ah*, que pode ser retirada da bateria para valores especificados de corrente e temperatura. Por exemplo, uma bateria de *12 V* com capacidade nominal de *50 Ah*, pode fornecer *50 A* em *1 hora*, ou *5 A* em *10 horas*, ou *0,5 A* em *100 horas* e assim por diante, mantendo os *12 V*, pelo menos teoricamente.

No caso da rede elétrica domiciliar o limite é especificado pela potência total requerida para consumo, como segue: se a potência não ultrapassar *12 KW*, pode-se usar uma rede monofásica; se a potência estiver entre *12 KW* e *25 KW*, deve-se usar uma rede bifásica; e se a potência estiver entre *25 KW* e *75 KW*, a rede tem que ser trifásica. Estes valores podem variar, dependendo da concessionária.

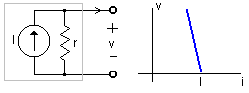
**FONTE DE CORRENTE**

É aquela que consegue manter uma corrente especificada através de um circuito arbitrário, para qualquer tensão solicitada. Seu símbolo e sua curva característica, para o caso ideal, são mostrados na figura 1-15.



**Fig. 1-15: Símbolo e curva característica de uma fonte de corrente ideal**

Uma *fonte de corrente real* pode ser vista como uma fonte de corrente ideal em paralelo com uma resistência muito alta, que é a sua resistência interna, conforme mostrado na figura 1-16, onde se mostra também a sua curva característica. Note que uma fonte de corrente não deve ser mantida em aberto (por quê?).



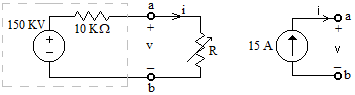
**Fig. 1-16: Fonte de corrente real e sua curva característica**

Sendo *r* sua resistência interna, a corrente fornecida por ela pode ser dada por:

(1-13)

As fontes de corrente não são tão óbvias na nossa experiência diária. Todas as fontes de energia que se conhece, tais como: pilhas, baterias, geradores eletromagnéticos etc., se comportam como fontes de tensão. Mas a eletrônica fez surgir as fontes de correntes, não como fontes de energia, mas como circuitos que utilizam dispositivos semicondutores, tais como o transistor que, sob certas circunstâncias, se comportam como fontes de corrente. Os painéis solares são vistos também como fontes de corrente, aproximadamente. Porém, o conceito de fonte de corrente muitas vezes facilita a análise de circuitos.

Para melhor compreender o significado de uma fonte de corrente, o exemplo ilustrado na figura 1-17(a) mostra uma fonte de tensão em série com uma resistência interna muito alta. Essa configuração funciona como uma fonte de corrente quando alimenta uma carga resistiva variando entre *1* e *100* . Note que a corrente permanece praticamente constante enquanto a tensão varia entre *14,99* *V* a *1408,5 V*, simulando assim uma fonte de corrente de 15 A, aproximadamente, nos terminais *a-b*, conforme mostra a figura 1-17(b).

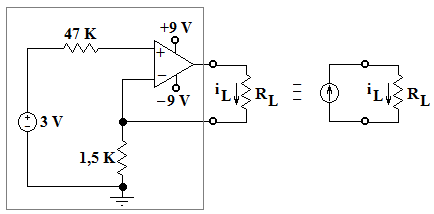


(a) (b)

*R =* [*1 – 100*] *Ω i =* [*14,99 – 14,85*] *A v =* [*14,99 – 1408,5*] *V*

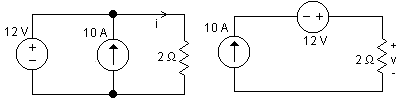
**Fig. 1-17: Fonte de tensão com resistência interna muito alta simulando uma fonte de corrente**.

Outro exemplo pode ser visto na figura 1-18, onde o circuito contendo um amplificador operacional se comporta como uma fonte de corrente de *2 mA*, contanto que a resistência *RL* não exceda o valor de *3 KΩ*. No capítulo 5 se verá como resolver este circuito.



**Fig. 1-18: Fonte de corrente usando um amplificador operacional**

Exemplo 5: Nos circuitos da figura 1-19, onde as fontes são ideais, encontre a variável desconhecida (*i* e *v*).



(a) (b)

### Fig. 1-19: (a) Fonte de tensão em paralelo com uma fonte de corrente; (b) Fonte de tensão em série com uma fonte de corrente

Solução: Em 1-19(a), a tensão no resistor vale obrigatoriamente *12 V*, portanto:

Em 1-19(b), a corrente no resistor vale obrigatoriamente *10 A*, portanto

*v = 2(10) = 20 V*.

Exercício: Para cada um dos circuitos do exemplo 5 calcule as potências em cada um dos elementos e indique se ela está sendo absorvida ou fornecida.

1.9 FONTES DEPENDENTES.

As fontes dependentes, embora não sejam fontes de energia e nem tão óbvias na experiência diária, serão úteis para construção de modelos de transistores e outros dispositivos semicondutores, ou mesmo de dispositivos eletromecânicos, como máquinas elétricas.

Pode-se ter fontes de tensão ou de corrente, controladas (dependentes) por outras tensões ou correntes. Existem, portanto, quatro possibilidades distintas, conforme mostrado na figura 1-20. Observe-se que o símbolo utilizado para representar essas fontes é um losango, para diferenciá-las das fontes independentes.

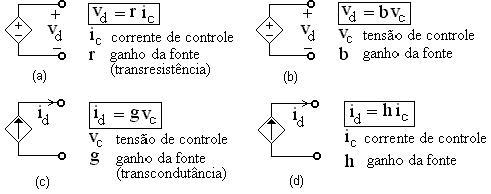
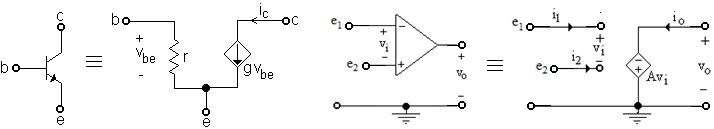


Fig. 1-20: (a) Fonte de tensão controlada por corrente; (b) Fonte de tensão controlada por tensão; (c) Fonte de corrente controlada por tensão; (d) Fonte de corrente controlada por corrente.

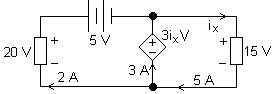
Exemplo 6: Em certas circunstâncias o comportamento de um transistor, como mostrado na figura 1-21(a) pode ser representado usando o modelo mostrado na figura 1-21(b). Neste modelo se observa que foi usada uma fonte de corrente controlada por tensão para expressar o fato de que a corrente no coletor do transistor depende da tensão que aparece entre a base e o emissor do mesmo transistor. A figura 1-21(c) mostra um amplificador operacional ideal, em malha aberta, modelado pelo circuito da figura 1-21(d), contendo uma fonte de tensão controlada por tensão.



(a) (b) (c) (d)

##### Fig. 1-21: Transistor e amplificador operacional com seus respectivos modelos.

Exercício: Determine a potência absorvida ou fornecida por cada um dos elementos do circuito mostrado na figura 1-22.



**Fig. 1-22: circuito com diversos tipos de fontes.**

**CAIXA DE FERRAMENTAS**



CORRENTE INSTANTÂNEA: *i(t) = dq/dt*

TENSÃO: *v = dw/dq*

POTÊNCIA INSTANTÂNEA: *p(t) = dw/dt ou p(t) = v(t)i(t)*

ENERGIA OU TRABALHO: *w(t) = p(t)Δt* ou

LEIS DE OHM: *v = Ri* e *R = ρl/A*

POTÊNCIA DISSIPADA NO RESISTOR: *p = Ri2* ou *p = v2/R*

**PROBLEMÁTICA**

1) O fabricante de uma bateria de lanterna de *6 V* afirma que a bateria pode fornecer uma corrente de *15 mA* durante *6 h* de funcionamento contínuo. Durante este tempo, a tensão cai de *6 V* para *4 V* linearmente com o tempo. Qual é a energia fornecida pela bateria durante as *6 h*?

**Resposta:** *1620 J*

2) A tensão e a corrente nos terminais de um elemento, usando a convenção passiva, são:

*v = 36sen(200πt) V* e *i = 25cos(200πt) A*.

(a) Calcule o valor máximo da potência fornecida ao elemento.

(b) Calcule o valor médio dessa potência no intervalo *0 < t < 5 ms*.

**Resposta:** *Pmax = 450 W, Pmed = 0*

3) Quando uma bateria de *10 V* está sendo carregada, a corrente entrando no terminal positivo varia linearmente de *3* a *9 mA* entre *t = 0* e *t = 15 min*. (a) Que quantidade de carga passa pela bateria durante os *10* primeiros minutos? (b) Qual é a potência absorvida pela bateria em *t = 5 min* e *t = 10 min*? (c) Quanta energia é fornecida para a bateria durante os *15 min*?

**Resposta:** *3,0 C; 50 mW e 70 mW; 54 J*.

4) A carga elétrica que atravessa um dado trecho de um circuito varia com o tempo segundo a equação: *q(t) = (2k1t + k2t2) C*, onde *t* é dado em segundos. Calcule os valores das constantes *K1* e *K2*, sabendo que *i(0) = 4 A* e *i(3) = –4 A*.

**Resposta:** *k1 = 2 e k2 = –4/3*.

5) A corrente entrando no terminal positivo de um elemento é dada por *i(t) = 10e–t A*, enquanto a tensão é *v(t) = 12e–t V*, para t > 0. Esboce os gráficos da potência e da energia em função do tempo.

**Resposta:** *p(t) = 120e–2t, w(t) = –60e–2t*

6) Algumas baterias alcalinas de *1,5 V* conseguem armazenar *50 J* de energia. Por quantos dias ela pode fornecer potência a uma calculadora que requer uma corrente de *1,2 mA* para funcionar?

**Resposta:** *1,60 dias aproximadamente.*

7) A corrente entrando no terminal positivo de um elemento é dada por *i(t) = 2cos(2t) A,* enquanto a tensão é *v(t) = 4cos(2t)*. Encontre a potência consumida por esse elemento em função do tempo e esboce-a para um ciclo completo. Encontre o valor máximo e o valor mínimo dessa potência.

**Resposta:** *p(t) = 4 + 4cos(4t) W, Pmax = 8 W, Pmin = 0 W*

8) Uma descarga elétrica atmosférica transfere *1020* elétrons em *0,1 s*. Determine a potência gerada quando a tensão entre nuvem e terra é de *100 KV*.

**Resposta:** *1024 W*

9) A corrente e a tensão de um elemento aderem a convenção passiva. Usando dispositivos de medidas encontrou-se que *i(t) = 4e–50t mA* e *v(t) = 10 – 20e–50t V*, para *t 0*. (a) Quanta potência é absorvida pelo elemento em *t = 10 ms*? (b) Quanta energia é absorvida pelo elemento no intervalo *0 t <* ?

**Resposta:** *p = –5,168 mW, w = 2/5 mJ*.

10) Elétrons passam pela seção transversal de um fio numa velocidade de *6,4×1021 elétrons por minuto*. Qual é a corrente média no fio?

**Resposta:** *17, 09 A*

11) Encontre o fator que relaciona quilowatt-hora com Joule.

**Resposta:** *1 KWh = (1000 W)(3600 s) = 36(105) J ou 1 J = 2,77(10–7) KWh*

12) A corrente entrando no terminal positivo de um elemento é *i(t) = 2sen(t – ) A*, e a tensão entre os terminais do elemento é *v(t) = 2sen(t) V*. Determine se o elemento é ativo ou passivo.

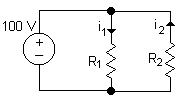
**Resposta:** *w = –2t + sen(2t), elemento ativo*.

13) Uma corrente de *2A* passa por um fio de cobre de *300 m* de comprimento cuja resistência distribuída é de *5 m/m.* Calcule a tensão sobre esse resistor, a potência dissipada por ele e a área da seção transversal. Dado: *ρcobre = 1,72×10–8 m*.

**Resposta***: V = 3 V, P = 6 W, A = 3,44 mm2*

14) No circuito mostrado na figura P1-1 encontre a corrente em cada resistor e a potência absorvida por cada um deles. Suponha *R1 = 50 e R2 = 25* .

**Resposta:** *I1 = 2 A, I2 = –4 A, P1 = 200 W, P2 = –400 W*

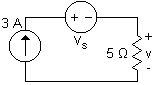


**Fig. P1-1: Problema 14.**

15) No circuito da figura P1-2 encontre a potência em cada um dos elementos, indicando quem absorve e quem fornece, supondo (a) *vs = 10 V*; (b) *vs = 5 V*.

**Resposta:** *a) P3A = 75 W (Fornecendo), PVs = 30 W (Absorvendo), P5Ω = 45 W (Absorvendo)*

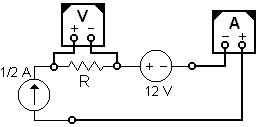
*b) P3A = 60 W (Fornecendo), PVs = 15 W (Absorvendo), P5Ω = 45 W (Absorvendo)*



**Fig. P1-2: Problema 15.**

16) Para o circuito da figura P1-3 qual é o valor da resistência *R* quando o voltímetro ideal indica *5 V* e o amperímetro ideal indica –0,5 A? Qual é a potência na fonte de tensão?

**Resposta:** *R = 10 Ω, P12V = 6 W*



**Fig. P1-3: Problema16.**

17) Se uma bateria de *12 V* de um carro tem uma resistência interna de *0,04* , qual é a tensão nos terminais da bateria quando esta fornece *40 A*?

**Resposta:** *1,60 V*

18) Se uma bateria de *12 V* de um carro tem uma resistência interna de *0,1* , qual é a tensão nos seus terminais que faz entrar uma corrente de *4 A* no borne positivo? (Observe que a bateria está sendo carregada!).

**Resposta:** *12,4 V*

19) A corrente de curto-circuito sobre uma fonte de corrente é de *15 A*. Se um resistor de *10*  ligado à fonte solicita *13 A*. Qual é a resistência interna da fonte?

**Resposta:** *65*

20) A corrente de curto-circuito sobre uma fonte de corrente é de *20 A*. Quando a fonte está em aberto, a tensão nos seus terminais é de *600 V*. Achar a resistência interna da fonte.

**Resposta:** *30*

21) Um determinado fio de alumínio tem uma resistência de *5* . Qual é a resistência de um fio de cobre de mesmas dimensões e formato do fio de alumínio? Dado: *ρcobre = 1,72×10–8 m* e *ρalumínio = 2,83×10–8 m*.

**Resposta:** *3,04*

22) Um resistor é feito de fio cilíndrico de constantana com *0,2 mm* de diâmetro enrolado em torno de um cilindro de *1 cm* de diâmetro. Quantas espiras do fio são necessárias para se obter uma resistência de *50* ? Suponha que não haja espaçamento entre as espiras. Dado: *ρconstantana = 49×10–8 m*.

**Resposta:** *102 espiras aproximadamente*

23) Qual é a resistividade da platina se um cubo desse material com *1 cm* de aresta tem uma resistência de *10 μ* medida entre faces opostas?

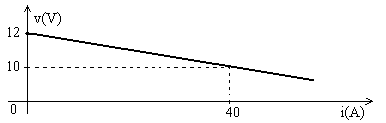
**Resposta:** *10–7 m*

24) A tensão de uma instalação elétrica de uma casa é de *110 V*. A bomba d’água ligada durante *3 h* consome *0,15 KWh*. Pede-se: (a) a corrente no motor da bomba; (b) a resistência equivalente do motor.

**Resposta:** *I = 0,45 A, R = 244,44*

25) A característica *v × i* de uma bateria, é mostrada no gráfico da figura P1-4. Encontre: (a) a resistência interna da bateria; (b) a tensão quando a corrente for *1 A*; (c) a corrente de curto-circuito, admitindo-se que a tensão continue caindo conforme a reta do gráfico.

**Resposta:** *r = 1/20 , v = 11,95 V, isc = 240 A*.



**Fig. P1-4: Problema 25.**

26) A carga total que uma bateria pode desenvolver pode ser especificada em ampère-hora (*Ah*). Um *ampère-hora* é a quantidade de carga que corresponde ao fluxo de corrente de *1 A* durante *1 hora*. Achar o número de Coulombs correspondentes a *1 Ah*.

**Resposta:** *3600 C*

27) Quanta energia química uma bateria de *12 V* deve consumir ao deslocar *8,93×1020* elétrons de seu terminal positivo para seu terminal negativo em 1 segundo?

**Resposta:** *1716,72 J*

28) Achar a potência absorvida por um motor de *5 HP (potência útil)*, completamente carregado, que opera com um rendimento de *80%*.

**Resposta:** *4662,50 W*

29) A máxima potência solar recebida é de aproximadamente *1 kW/m2*. Se os painéis solares que transformam a energia solar em energia elétrica têm *13%* de eficiência, quantos metros quadrados de painéis solares são necessários para fornecerem a potência de uma torradeira de *1600 W*?

**Resposta:** *12,30 m2*.

30) Um motor elétrico desenvolve *5 HP* de potência enquanto está operando com rendimento de *85%*. Achar o custo para operá-lo continuamente durante um dia, se o custo da energia elétrica é de *60* centavos por quilowatt-hora.

**Resposta:** *R$63,22*

31) Um forno de micro-ondas desenvolve uma potência de *800 W* para assar uma pizza em *3 min*. A potência elétrica consumida por ele é de *1200 W*. Encontre a eficiência desse forno bem como a energia elétrica gasta para assar a pizza em *KWh*.

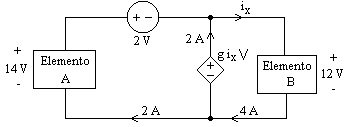
**Resposta:** *67%, 0,06 KWh*

32) Um equipamento de iluminação de uma mina está localizado a *100 m* de sua fonte de tensão dc. As luzes da mina consomem um total de *5 KW* de potência e operam em *120 V*. Determine a área da seção transversal dos fios de cobre usados para conectar a fonte ao equipamento de iluminação se a perda de potência no fio deve ser no máximo igual a *5%* da potência consumida pelas luzes. [Dado: *Resistividade do Cobre = 1,7×10–6 Ωcm*].

**Resposta:** *24,28 mm2*

33) No circuito da figura P1-5 determine o valor da constante *g*, levando-se em conta que a potência fornecida deve ser igual à potência absorvida.

**Resposta:** *g = 3 Ω.*



**Fig. P1-5: Problema 33.**