



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

ABC DOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS EM CORRENTE CONTÍNUA

Mário Ferreira Alves (malves@dee.isep.ipp.pt)

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Fevereiro de 1999

Prefácio

Pretende-se com esta sebenta fornecer um conhecimento básico dos circuitos em corrente contínua. A *Lei de Ohm*, os diversos tipos de associação de resistências, as *Leis de Kirchoff* (dos nós e das malhas) e o *Teorema de Thévenin* (simplificação de circuitos) são alguns dos temas abordados.

Este texto foi produzido referenciando-se principalmente em [Kni, 78] e [Mor, 87].

Índice

1. CORRENTE CONTÍNUA?	7
1.1. Formas da Corrente Eléctrica	7
1.2. Onde se Utiliza?	8
2. SÍMBOLOS ELÉCTRICOS.	9
3. LEI DE OHM	10
4. ASSOCIAÇÃO DE RESISTÊNCIAS EM SÉRIE	11
5. DIVISOR DE TENSÃO.	12
6. ASSOCIAÇÃO DE RESISTÊNCIAS EM PARALELO	13
7. DIVISOR DE CORRENTE.	15
8. ASSOCIAÇÃO DE RESISTÊNCIAS EM SÉRIE-PARALELO	16
9. RESISTÊNCIA INTERNA DE UMA FONTE DE TENSÃO.	17
10. ASSOCIAÇÃO DE BATERIAS	19
11. POTÊNCIA E ENERGIA	20
12. CAPACIDADE DE UMA BATERIA.	21
13. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (<i>LEIS DE KIRCHOFF</i>)	22
13.1. Lei das Malhas	23
13.2. Lei dos Nós.	23
14. SIMPLIFICAÇÃO DE CIRCUITOS	24
14.1. Teorema de Thévenin	24
14.2. Linearidade dos Circuitos	26
14.3. Teorema da Sobreposição	27
15. O CONDENSADOR.	28
15.1. Capacidade de um Condensador	28
15.2. Tipos de Condensadores	28
15.3. Associação de Condensadores.	29
15.4. Rigidez Dielétrica.	30
15.5. Relação entre Tensão e Corrente num Condensador	30
16. REFERÊNCIAS	31

1. CORRENTE CONTÍNUA?

1.1. Formas da Corrente Eléctrica

A energia eléctrica, sendo utilizada de múltiplas maneiras, pode apresentar-se nos circuitos em diferentes formas:

Contínua O fluxo de electrões dá-se apenas num sentido	Constante A tensão/corrente é constante	Obtém-se a partir de pilhas, baterias, dínamos, fontes de tensão, rectificação de corrente alternada	
	Variável A tensão/corrente varia	Obtém-se a partir de fontes de tensão	
Descontínua O fluxo de electrões dá-se nos dois sentidos	Periódica A tensão/corrente varia sempre da mesma maneira, repetindo-se ao longo do tempo	Sinusoidal A variação da corrente é sinusoidal	Obtém-se a partir de alternadores, geradores de sinal
		Quadrada/Triangular A variação da corrente é rectangular/triangular	Obtém-se a partir de geradores de sinal
	Não periódica A tensão/corrente não se repete no tempo	Sinais de rádio e televisão, ruído (electromagnético)	

São de salientar as duas formas de corrente eléctrica mais utilizadas:

- Corrente contínua constante - conhecida por **corrente contínua (CC)**, em Português, ou **DC** em Inglês)
- Corrente descontínua periódica sinusoidal - conhecida por **corrente alternada (CA)**, em Português, ou **AC** em Inglês)

1.2. Onde se Utiliza?

A corrente contínua e a corrente alternada sinusoidal são as mais utilizadas para alimentar os diversos receptores que utilizamos no nosso dia-a-dia. A corrente contínua é utilizada tanto em sistemas de potência elevada, tais como na tracção eléctrica (“eléctricos”, automóveis eléctricos, “trolley-carros”, etc.) e os receptores eléctricos no automóvel (luzes, motor de arranque, buzina, etc.), como em sistemas de potência reduzida, tais como todos os sistemas que utilizam circuitos integrados (multímetros, telemóveis, unidades electrónicas de controlo em automóveis, computadores, etc.).

Além do próprio interesse do estudo dos circuitos eléctricos em corrente contínua, acrescenta-se o facto de que o conhecimento dos componentes e fenómenos eléctricos neste tipo de circuitos é fundamental à compreensão de circuitos com outras formas de tensão e corrente, nomeadamente dos circuitos em corrente alternada.

2. SÍMBOLOS ELÉCTRICOS

A representação gráfica dos circuitos eléctricos implica que se convencionem símbolos para os vários elementos constituintes de um circuito eléctrico. Alguns dos mais utilizados são:

Fonte de tensão contínua		Fonte de tensão alternada	
Fio de ligação		Bateria (fonte de tensão contínua)	
Junção de condutores		Terra, Massa	
Interruptor		Fusível	
Resistência		Amperímetro, Voltímetro, Ohmímetro	
Lâmpada		Resistência variável (reóstato, "potenciómetro")	
Condensador (capacidade)		Condensador variável (capacidade variável)	
Bobina (indutância)		Transformador	
Díodo		LED (díodo emissor de luz)	
Díodo Zener		Transistor (nnp)	

3. LEI DE OHM

A corrente eléctrica (I) que percorre um circuito (*Figura 1*) depende da tensão aplicada (U) e da resistência do circuito (R). Estas grandezas eléctricas relacionam-se pela *Lei de Ohm*, que se expressa da seguinte maneira:

A corrente que percorre um circuito é directamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à resistência @ $I = U / R$.

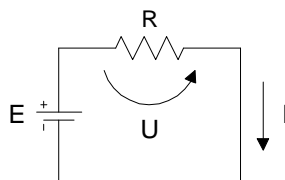


Figura 1: Circuito eléctrico básico

Exemplo:

Uma bateria de 12 V fornece uma corrente de 1 A a uma lâmpada. Qual a resistência dessa lâmpada?

Resposta:

$$R = U / I = 12 / 1 = 12 \, \Omega$$

Apesar das unidades fundamentais de corrente, tensão e resistência serem o *Ampère* (A), *Volt* (V) e o *Ohm* (Ω), é frequente a utilização de múltiplos e submúltiplos destas unidades. Os mais utilizados são:

Múltiplo/Submúltiplo	Símbolo	Valor
Giga	G	10^9
Mega	M	10^6
Kilo	K	10^3
Mili	m	10^{-3}
Micro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}

No domínio da electrónica, onde se lida, normalmente, com resistências muito altas e correntes muito baixas, chegam até a utilizar-se a corrente em mA e a resistência em $K\Omega$, directamente na *Lei de Ohm*, resultando a multiplicação da corrente e da resistência na tensão em *Volt* (V). Ex: $1 \, K\Omega \times 10 \, \text{mA} = 10 \, \text{V}$.

4. ASSOCIAÇÃO DE RESISTÊNCIAS EM SÉRIE

Resistência é o termo utilizado, em termos genéricos, para representar qualquer receptor em circuitos de corrente contínua. Pode falar-se da resistência de lâmpadas, buzinas, motores, etc. Podem também existir resistências que, não tendo utilidade em termos de transformação de energia eléctrica em outra forma de energia, são úteis para conseguir determinados objectivos num circuito.

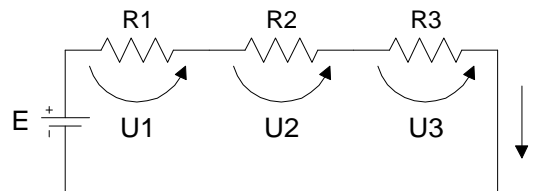


Figura 2: Associação de resistências em série

Se duas ou mais resistências se ligam em série (Figura 2), isto é, a corrente que sai de uma resistência entra directamente na seguinte, a sua resistência equivalente é a soma de todas as resistências:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3$$

Porquê?

Dado que a mesma corrente I atravessa as três resistências, as quedas de tensão em cada uma delas será IR_1 , IR_2 e IR_3 , respectivamente. Claramente, a soma das três quedas de tensão deve ser igual à tensão E aplicada, que em termos de uma única resistência equivalente seria IR_e . Então

$$IR_e = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

ou

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3$$

Estendendo-se este resultado a qualquer número de resistências ligadas em série.

Exemplo:

O circuito ilustrado na Figura consiste em três resistências de valor $84 \, \Omega$, $68 \, \Omega$ e $48 \, \Omega$, respectivamente, interligadas em série com uma bateria de $12 \, \text{V}$. Determine:

- Resistência equivalente
- Corrente que percorre o circuito
- Tensão aos terminais de cada resistência

Resolução:

$$R_e = 44 + 28 + 48 = 120 \, \Omega$$

$$I = U / R_e = 12 / 120 = 0.10 \, \text{A}$$

$$U_1 = IR_1 = 0.1 \times 44 = 4.4 \, \text{V}$$

$$U_2 = IR_2 = 0.1 \times 28 = 2.8 \, \text{V}$$

$$U_3 = IR_3 = 0.1 \times 48 = 4.8 \, \text{V}$$

← Total = 12 V

5. DIVISOR DE TENSÃO

A utilização de resistências em série pode ser utilizada para obter, a partir de uma fonte de tensão fixa, uma tensão de valor inferior (*Figura 3*).

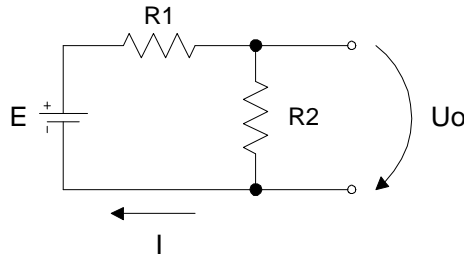


Figura 3: Divisor de tensão

Se obtivermos a tensão de saída U_o aos terminais de R_2 , temos que

$$U_o = IR_2$$

e sabendo que

$$I = E / R_e = E / (R_1 + R_2)$$

então

$$V_o = E.R_2 / (R_1 + R_2)$$

Esta expressão só é verdadeira quando a corrente retirada do circuito é muito menor do que I . De outra forma as resistências teriam correntes diferentes, o que seria contrário ao que se assumiu.

É muitas vezes útil obter uma tensão variável a partir de uma fonte de tensão constante. Neste caso, utiliza-se uma resistência com dois contactos fixos e um deslizante (variável). Estas resistências variáveis têm o nome de reóstatos (*Figura 4*).

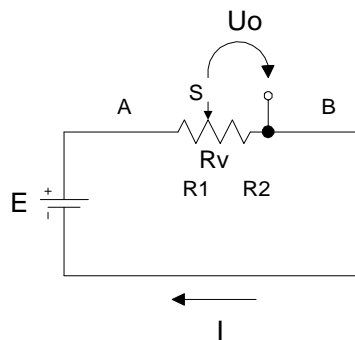


Figura 4: Divisor de tensão com reóstato

A posição do contacto móvel (S) determina a relação de resistências R_1 e R_2 e portanto a tensão de saída V_o .

Exemplo:

Um reóstato tem uma resistência total (entre A e B) de $50\ \Omega$ e está ligado a uma fonte de tensão de 20 V . Qual a resistência entre A e S quando se obtêm na saída tensões de 5 V , 12 V e 16 V ?

Resolução:

Para 5 V , a tensão de saída é igual a

$$5 = 20 \times R_1 / 30 \Rightarrow R_1 = 7.5\ \Omega$$

Para 12 V ,

$$12 = 20 \times R_1 / 30 \Rightarrow R_1 = 18\ \Omega$$

Para 16 V , a tensão de saída é igual a

$$16 = 20 \times R_1 / 30 \Rightarrow R_1 = 24\ \Omega$$

6. ASSOCIAÇÃO DE RESISTÊNCIAS EM PARALELO

Se duas ou mais resistências se associam de forma a que cada uma delas forma um caminho separado para a corrente total, elas estão ligadas em paralelo (*Figura 5*). Desta vez, a tensão aos terminais de cada resistência é a mesma e igual a E , em valor absoluto.

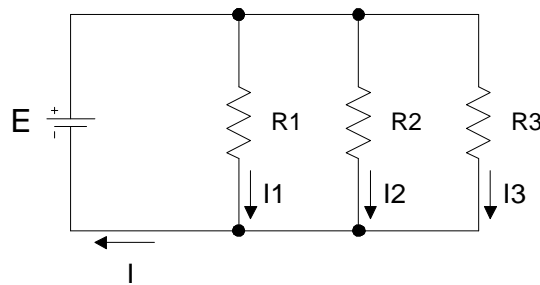


Figura 5: Associação de resistências em paralelo

Na *Figura 5*, a corrente total I deve ser a soma das correntes parcelares I_1 , I_2 e I_3 , isto é

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Se assumirmos que cada resistência tem uma tensão U (E) aos seus terminais, as correntes são

$$I_1 = U / R_1, I_2 = U / R_2, I_3 = U / R_3$$

Portanto, se R_e for a resistência equivalente, então $I = U / R_e$ e

$$U / R_e = U / R_1 + U / R_2 + U / R_3 \Rightarrow 1 / R_e = 1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3$$

Estendendo-se este resultado a qualquer número de resistências ligadas em paralelo.

Para o caso de duas (e apenas duas) resistências em paralelo,

$$R_e = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$

Exemplo:

Determine a resistência equivalente de duas resistências ligadas em paralelo, de valores $3.5 \, \Omega$ e $5.4 \, \Omega$.

Resolução:

$$R_e = 3.5 \times 5.4 / (3.5 + 5.4) = 2.1 \, \Omega$$

Refira-se ainda que a resistência equivalente de um paralelo é sempre menor ou igual à menor resistência desse paralelo.

7. DIVISOR DE CORRENTE

Nos circuitos série notamos que a tensão aplicada (pela fonte) era dividida por tantas partes quantas as resistências. Num circuito paralelo a corrente é dividida por tantas partes quantas as resistências.

É importante compreender como se divide a corrente, quando encontra resistências em paralelo. É de esperar que a resistência mais pequena fique com a maior parte da corrente e a resistência maior fique com a menor parte dessa corrente. É o que se chama uma relação inversa. As resistências intermédias ficam com correntes intermédias.

Consideremos o caso de uma resistência de $3\ \Omega$ em paralelo com uma de $8\ \Omega$, ligadas a uma fonte de 24 V . A corrente na resistência de $3\ \Omega$ será $24 / 3 = 8\text{ A}$ e a corrente na resistência de $8\ \Omega$ será $24 / 8 = 3\text{ A}$. Portanto, quando a relação de resistências é de 3:8, a relação de correntes é de 8:3.

Exemplo:

Três resistências de 3 , 9 e $12\ \Omega$ estão ligadas em paralelo e a corrente total do circuito é de 38 A . Determine a corrente em cada uma das resistências.

Resolução:

Primeiro calcular a resistência equivalente

$$1 / R_e = 1 / 3 + 1 / 9 + 1 / 12 \Rightarrow R_e = 36 / 19\ \Omega$$

A tensão aplicada que provoca que uma corrente de 38 A percorra esta resistência é de

$$U = IR_e = 38 \times 36 / 19 = 72\text{ V}$$

Aplicando a Lei de Ohm a cada ramo (derivação), fica

$$\text{Corrente na resistência de } 3\ \Omega = 72 / 3 = 24\text{ A}$$

$$\text{Corrente na resistência de } 9\ \Omega = 72 / 9 = 8\text{ A}$$

$$\text{Corrente na resistência de } 12\ \Omega = 72 / 12 = 6\text{ A}$$

← Total = 38 A

8. ASSOCIAÇÃO DE RESISTÊNCIAS EM SÉRIE-PARALELO

A resolução de problemas envolvendo circuitos constituídos por resistências em série e em paralelo pode ser efectuada substituindo todos os grupos de resistências em paralelo pela sua resistência equivalente. O circuito pode então ser reduzido a uma associação série (ou paralelo) simples que, por sua vez, pode ser reduzida à sua resistência equivalente R_e .

Exemplo:

Determine a resistência equivalente do circuito da *Figura 6*, bem como o valor da corrente em cada uma das resistências.

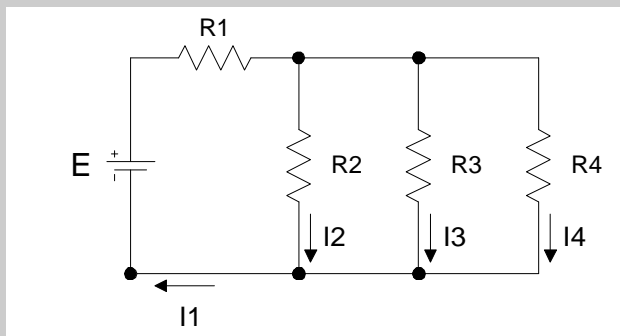


Figura 6: Circuito com resistências em série-paralelo

Sabe-se que

$$E = 10 \text{ V}, R_1 = 1.5 \, \Omega, R_2 = 4 \, \Omega, R_3 = 10 \, \Omega \text{ e } R_4 = 20 \, \Omega.$$

Resolução:

Primeiro calcular a resistência equivalente do grupo em paralelo

$$1 / R_{ep} = 1 / 4 + 1 / 10 + 1 / 20 \Rightarrow R_{ep} = 20 / 8 = 2.5 \, \Omega$$

Então, a resistência equivalente total é

$$R_e = 2.5 + 1.5 = 4 \, \Omega$$

e a corrente total (que passa em R_1)

$$I_1 = 10 / 4 = 2.5 \text{ A}$$

Então, a tensão aos terminais de R_1 é

$$U_1 = 1.5 \times 2.5 = 3.75 \text{ V}$$

“sobrando” $10 - 3.75 = 6.25 \text{ V}$ para o grupo em paralelo.

As correntes em cada resistência do paralelo são:

$$I_2 = 6.25 / 4 = 1.56 \text{ A}$$

$$I_3 = 6.25 / 10 = 0.625 \text{ A}$$

$$I_4 = 6.25 / 20 = 0.313 \text{ A}$$

← $Total = 2.5 \text{ A}$

9. RESISTÊNCIA INTERNA DE UMA FONTE DE TENSÃO

Qualquer fonte de tensão, nomeadamente as pilhas, as baterias ou os geradores, tem uma **resistência interna** cujo valor depende do tipo construtivo. A existência desta resistência interna provoca que o valor da força electromotriz fornecida pela fonte não seja igual à tensão aos seus terminais, isto é, provoca uma **perda de energia indesejável**.

Uma fonte de tensão (**real**) pode ser representada, esquematicamente, por uma fonte de tensão **ideal** (sem resistência interna) em série com uma resistência. Isto pode ser observado na figura seguinte:

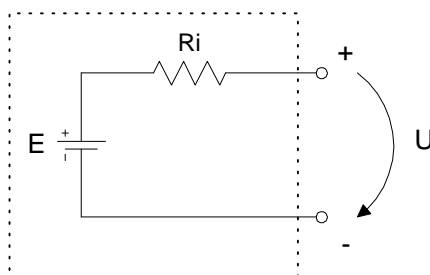


Figura 7: Fonte tensão real = fonte tensão ideal + resistência interna

A tensão U aos terminais da fonte vai depender da carga que vai alimentar, isto é, da resistência que a fonte alimenta:

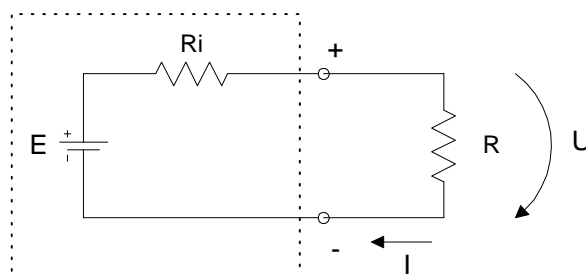


Figura 8: Fonte tensão real em carga

Quanto maior for a corrente I , maior será a queda de tensão dentro da fonte de tensão (IR_i), “sobrando” para o exterior a tensão:

$$U = E - IR_i$$

Nota: A força electromotriz (E) de uma bateria pode ser medida utilizando um voltímetro com alta resistência interna, sem a esta ter aplicada qualquer carga. Temos pois uma situação em a bateria está praticamente sem carga, implicando que a corrente I seja praticamente nula, logo com IR_i quase nulo pois. Se medirmos a tensão aos terminais da mesma bateria, mas agora em carga, o valor medido deverá ser inferior ao anterior, pois agora existe uma queda de tensão interna (IR_i) que poderá ser não desprezável, dependendo do valor da resistência interna da bateria e da corrente que ela está a fornecer ao circuito.

Exemplo:

A tensão em vazio (sem carga) de uma bateria é 6 V. Quando se alimenta uma resistência de 10 Ω , a tensão aos seus terminais passa para 5 V. Qual o valor da resistência interna da bateria?

Resolução:

Sendo a força electromotriz da bateria

$$E = 6 \text{ V}$$

e, quando se liga a resistência de $10\ \Omega$ a queda de tensão aos seus terminais passa para $5\ \text{V}$, que dizer que “cai” $1\ \text{V}$ na resistência interna da bateria. Podemos então dizer:

$$IR_i = 1\ \text{V}$$

Como,

$$I = 5 / 10 = 0.5\ \text{A}$$

então,

$$R_i = 1 / 0.5 = 2\ \Omega$$

10. ASSOCIAÇÃO DE BATERIAS

As baterias (ou pilhas) podem associar-se em série ou em paralelo, consoante o objectivo que se pretende atingir.

Se ligarmos, sucessivamente, o polo negativo de uma bateria ao polo positivo de outra, consegue-se um agrupamento com uma f.e.m. superior à de cada bateria e igual à soma de todas as f.e.m.:

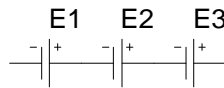


Figura 9: Associação de baterias em série

Ficando,

$$E_e = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

Chama-se a este agrupamento a **série** de baterias. Uma bateria de automóvel, por exemplo, é feita à custa da associação em série de vários elementos de menor f.e.m. A resistência equivalente da série de baterias é igual à soma de todas as resistências internas:

$$R_{ie} = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + \dots$$

Se pretendermos uma fonte CC que debite correntes mais elevadas do que uma só bateria, agrupamos várias baterias em **paralelo** (note-se que as baterias têm de ter f.e.m. iguais):

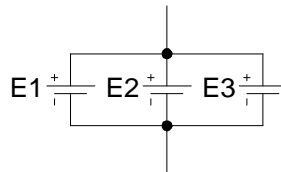


Figura 10: Associação de baterias em paralelo

Ficando,

$$I_{e\max} = I_{1\max} + I_{2\max} + I_{3\max} + \dots$$

O inverso da resistência equivalente do paralelo de baterias é igual à soma de todos os inversos das resistências internas:

$$1 / R_{ie} = 1 / R_{i1} + 1 / R_{i2} + 1 / R_{i3} + \dots$$

Para produzir tanto f.e.m. como correntes elevadas, faz-se o agrupamento misto das baterias

11. POTÊNCIA E ENERGIA

Potência (P) é, em termos genéricos, a energia (ou trabalho) produzida ou consumida por unidade de tempo, medindo-se em *Joule* / segundo (J/s). Em electrotecnia utiliza-se o *Watt* (W) para simbolizar a potência eléctrica unitária e o Watt-Hora (Wh) como unidade de energia (unidade que vulgarmente aparece referenciada nas nossas facturas de electricidade).

É frequente utilizarmos termos como: esta lâmpada é mais potente que aquela; este motor é mais potente que aquele, etc. De facto, quanto maior a potência de um receptor eléctrico, maior capacidade de produzir trabalho ele terá, mas também maior quantidade de energia eléctrica ele consumirá. Por exemplo uma lâmpada de maior potência que outra do mesmo tipo dá mais luz, mas também consome mais energia.

Em electricidade, a potência de um receptor está relacionada com a sua resistência, a corrente que o percorre e a tensão aos seus terminais, da seguinte forma:

$$P = RI^2 = UI = U^2 / R$$

Estas relações são úteis, por exemplo, para saber qual a corrente que é consumida por um receptor de uma dada potência e uma dada tensão nominais, ou para saber que potência é consumida por uma resistência, quando se aplica uma dada tensão, etc.

Exemplo:

Qual a corrente consumida por uma lâmpada de 60 W, sabendo que para a alimentar se utiliza uma bateria de 12 V?

Resolução:

$$I = P / U = 60 / 12 = 5 \text{ A}$$

12. CAPACIDADE DE UMA BATERIA

Por exemplo, um acumulador de chumbo de 100 Ah é descarregado em 10 h com uma corrente de 10 A e pode ser descarregado em apenas 1 h com uma corrente de 50 A. Neste caso, a capacidade da bateria é de 50 Ah (metade da anterior). Portanto, a capacidade de um acumulador deve ser acompanhada do tempo da descarga, em horas. Se assim não acontecer, o valor da capacidade refere-se aos períodos normais de descarga (10 h para os acumuladores de chumbo).

As possibilidades de utilização de uma bateria (acumulador) são caracterizadas, principalmente, pela sua capacidade [[Mor, 87]]. Esta representa a quantidade de electricidade em Ah que o acumulador pode fornecer durante a descarga. A capacidade de um acumulador varia com o regime de descarga e com a temperatura do electrólito. Quando a temperatura não é citada, é porque se considera 20°C.

Em termos energéticos, uma bateria de 12 V e 100 Ah tem uma energia de:

$$12 \times 100 = 1.2 \text{ kWh } (= 4320000 \text{ J})$$

13. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (*LEIS DE KIRCHOFF*)

Tal como em qualquer sistema fechado, a energia eléctrica, num dado circuito, também se conserva. De facto, a energia que é produzida (fontes de energia: bateria, dínamo, etc.) é igual à energia que é consumida, tanto pelos receptores propriamente ditos (lâmpada, aquecedor, etc.) como por perdas nas resistências dos fios e contactos necessários à ligação do próprio circuito.

As *Leis de Kirchoff* mais não são do que leis de conservação de energia aplicadas aos circuitos eléctricos. Já atrás se utilizaram estas leis para determinar a resistência equivalente da associação de resistências em série e em paralelo e para calcular divisores de tensão e corrente.

Para enunciar estas leis, convém ter presentes os seguintes conceitos:

Elemento Eléctrico → Dispositivo capaz de transformar energia, sendo a energia eléctrica uma das formas de energia postas em jogo.

Activo → Dispositivo que transforma outra forma de energia em energia eléctrica (pilhas, baterias, dinamos, alternadores). Também chamados de fontes, são activos pois fornecem energia eléctrica aos circuitos a eles ligados.

Passivo → Dispositivo que transforma energia eléctrica noutra forma de energia (motor: mecânica, lâmpada: luminosa, aquecedor: calorífica). Também chamados de receptores, são passivos pois absorvem energia eléctrica.

Ramo → Conjunto de elementos eléctricos em série, percorridos pela mesma corrente (pode ser apenas um elemento).

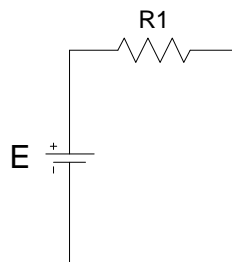


Figura 11: Ramo de um circuito eléctrico

Nó → Ponto de junção, ligação ou intersecção de ramos (em geral, mais de 2).

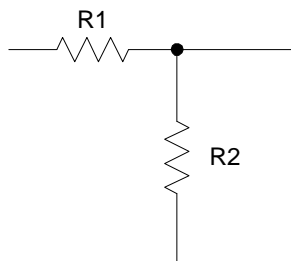


Figura 12: Nó de um circuito eléctrico

Malha → Conjunto de ramos formando um circuito fechado (anel).

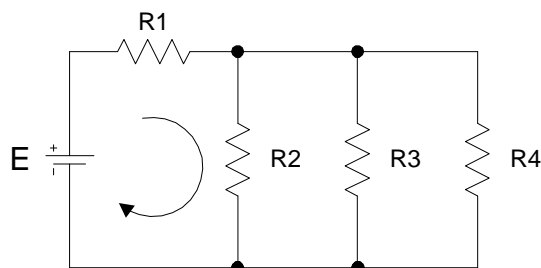


Figura 13: Malha de um circuito eléctrico

13.1. Lei das Malhas

Ao longo de uma malha, a soma algébrica das forças electromotrizes (subidas de potencial) é igual à soma algébrica das quedas de potencial:

$$\Sigma E = \Sigma U$$

No circuito seguinte, a Lei das Malhas aplicada à malha assinalada é

$$E = U_1 + U_2$$

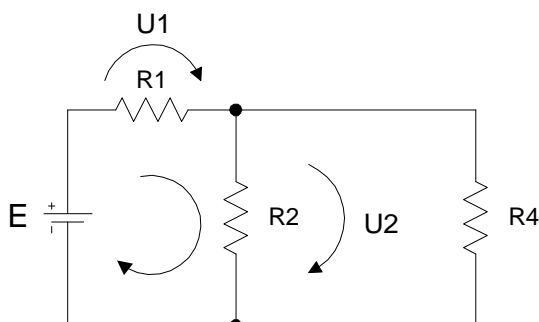


Figura 14: Malha num circuito eléctrico

13.2. Lei dos Nós

Em qualquer nó de um circuito eléctrico, a soma algébrica das correntes (convergentes e divergentes) é nula:

$$\Sigma I = 0$$

No circuito seguinte, a Lei dos Nós aplicada ao nó assinalado é

$$I_2 + I_3 + I_4 - I_1 = 0$$

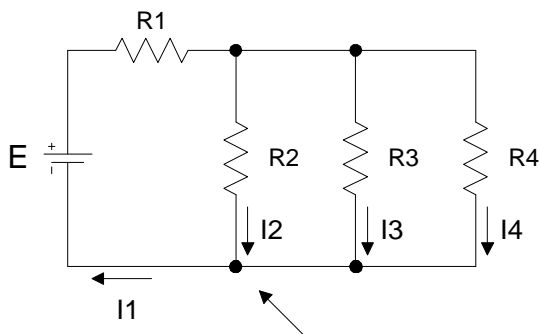


Figura 15: Nó num circuito eléctrico

14. SIMPLIFICAÇÃO DE CIRCUITOS

Embora todos os circuitos se possam resolver a partir da utilização pura e simples da Lei de Ohm e das *Leis de Kirchhoff*, esse processo tende a tornar-se demasiado complicado para circuitos mais complexos, podendo dar origem a erros. Aparecem então diversos métodos para auxiliar a análise de circuitos complexos, dentro dos quais se salientam o método da simplificação num circuito equivalente (Teorema de Thévenin) e o método de subdivisão em circuitos mais simples (Teorema da Sobreposição), explicados a seguir.

Por vezes, na análise de circuitos eléctricos, temos de resolver problemas deste tipo: temos um circuito mais ou menos complexo ao qual se liga, entre dois dos seus pontos, um dado ramo (ou circuito) cuja constituição pode variar (uma resistência variável, por exemplo) e pretende-se, de cada vez que o ramo varie, analisar as grandezas eléctricas nele existentes. Obviamente que sempre que o ramo varia, variam também as grandezas eléctricas em todo o circuito. O processo mais simples de resolver este tipo de problemas é considerar todo o circuito, com excepção do ramo (circuito) a estudar, como sendo um bipolo e aplicar o Teorema de Thévenin.

14.1. Teorema de Thévenin

Um dos métodos mais utilizados para “conhecer” um determinado circuito é torná-lo num circuito mais simples de analisar. Tal como se fez para as séries e paralelos de resistências, pode determinar-se o circuito equivalente de um circuito, correspondendo a uma fonte ideal de tensão em série com uma resistência.

Um circuito mais ou menos complexo:

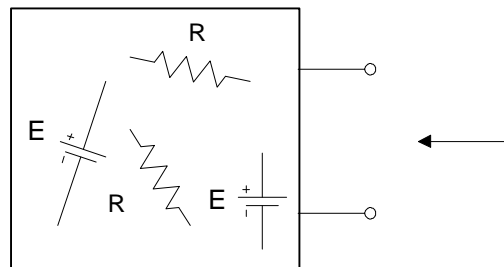


Figura 16: Circuito complexo visto de um bipolo

Pode ser transformado no circuito equivalente, para um dado bipolo:

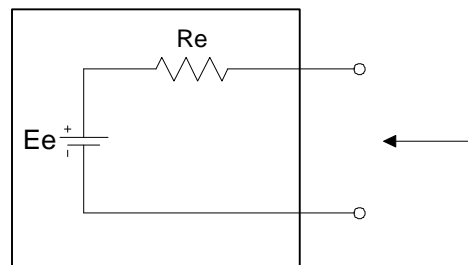


Figura 17: Circuito equivalente para o mesmo bipolo

Define-se **bipolo** como qualquer circuito eléctrico acessível ao exterior por dois terminais. É extremamente importante perceber que um circuito equivalente apenas o é para um dado bipolo (dois pontos). O mesmo circuito, visto de outros dois pontos tem, obviamente, um circuito equivalente diferente.

Repare-se que este método de simplificação mostra-se extremamente adequado quando temos variação de carga aos terminais do bipolo, ou quando queremos verificar como é que variações de resistência (ou outra grandeza eléctrica) influem na carga.

A determinação de E_e e R_e pode ser feita recorrendo ao *Teorema de Thévenin*:

Qualquer bipolo é equivalente, para o exterior, a uma fonte ideal de tensão (f.e.m. igual à tensão em circuito aberto do bipolo) em série com uma resistência (vista dos terminais do bipolo, substituindo as fontes pelas suas resistências internas).

Daqui se tira que:

$$E_e = U_{ca} \text{ e } R_e = E_e / I_{cc}$$

Métodos para determinar E_e e R_e

- Analiticamente

$E_e \rightarrow$ é igual à tensão em circuito aberto no bipolo (determina-se recorrendo às *Leis de Kirchhoff*)

$R_e \rightarrow$ substituem-se as fontes pelas suas resistências internas e calcula-se a resistência equivalente (calculando a resistência equivalente de associações série e/ou paralelo)

- Experimentalmente

$E_e \rightarrow$ Mede-se com um voltímetro a tensão aos terminais do bipolo (tensão em circuito aberto). O voltímetro deverá ter uma elevada resistência interna.

$R_e \rightarrow$ Substituem-se as fontes pelas suas resistências internas (se a resistência interna da fonte de tensão for pequena, substitui-se por um fio) e determina-se a resistência equivalente ligando um ohmímetro aos terminais do bipolo. Outra possibilidade é medir a corrente de curto-circuito ligando um amperímetro (de baixa resistência interna) aos terminais do bipolo, obtendo-se R_e a partir de $R_e = E_e / I_{cc}$

Exemplo:

Determine o equivalente de Thévenin do circuito da figura seguinte, visto do bipolo SB.

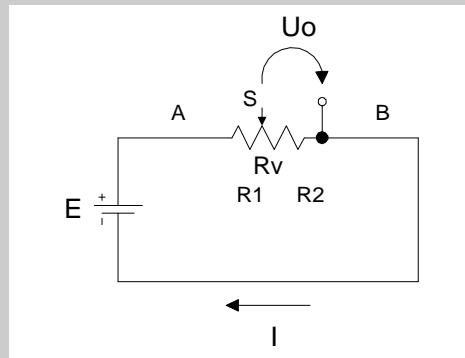


Figura 18: Circuito inicial

Considera-se que $R_v = R_1 + R_2$

e que

$$R_2 = d.R_v \text{ e } R_1 = (1-d).R_v$$

em que d representa o deslocamento do reóstato e está compreendido entre 0 e 1.

$d = 1$ corresponde a ter uma tensão de saída (U_0) máxima

$d = 0$ corresponde a ter uma tensão de saída (U_0) nula

Resolução:

Primeiro, calcular a resistência equivalente vista do bipolo SB. Tendo em conta que a fonte não tem resistência interna:

$$R_e = R_1 // R_2 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = d.(1-d).R_v$$

A f.e.m. equivalente é

$$E_e = U_0 = ER_2 / (R_1 + R_2) = E.d$$

O circuito equivalente de Thévenin é então:

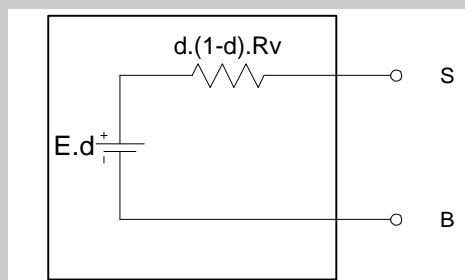


Figura 19: Circuito simplificado, visto do bipolo SB

14.2. Linearidade dos Circuitos

A simplificação de circuitos segundo os Teorema da Sobreposição e de *Thévenin* só pode ser feita se os elementos eléctricos forem lineares.

Um elemento eléctrico é linear se, independentemente do valor de tensão U aos seus terminais e da corrente I que o atravessa, a equação que os relaciona não se altera. Claro que, na natureza, nenhuma relação é rigorosamente linear, mas podemos considerar certos elementos aproximadamente lineares, tais como resistências de fio metálico. Exemplos de elementos

eléctricos não lineares são a lâmpada de incandescência (resistência aumenta com a temperatura) e o diodo (semicondutor diminui a resistência com o aumento da temperatura).

14.3. Teorema da Sobreposição

Se os elementos de um circuito forem lineares, é possível decompor um circuito complexo em vários circuitos mais simples, analisar separadamente o comportamento destes e por fim concluir acerca do comportamento do circuito inicial.

É com base no princípio da aditividade de efeitos que se enuncia o Teorema da Sobreposição:

A corrente em qualquer ramo de um circuito é igual à soma algébrica das correntes devidas a cada uma das fontes, consideradas separadamente, substituindo as restantes fontes pelas suas resistências internas.

Este teorema tem interesse prático quando se pretendem analisar circuitos com mais do que uma fonte de energia.

15. O CONDENSADOR

15.1. Capacidade de um Condensador

Um condensador é um sistema constituído por dois materiais condutores (armaduras ou placas) separadas por um material isolante (dielétrico), sendo capaz de armazenar cargas eléctricas.

A capacidade de armazenar cargas eléctricas (de sinal contrário) chama-se capacitância (ou capacidade), correspondendo a um maior ou menor Campo Eléctrico existente no dielétrico, entre as duas armaduras e portanto a mais ou menos energia eléctrica armazenada (no dielétrico).

Ao se estabelecer uma diferença de potencial entre as armaduras de um condensador, criam-se cargas eléctricas à superfície das armaduras (uma fica carregada positivamente e a outra negativamente, com o mesmo valor absoluto), correspondendo à carga do condensador:

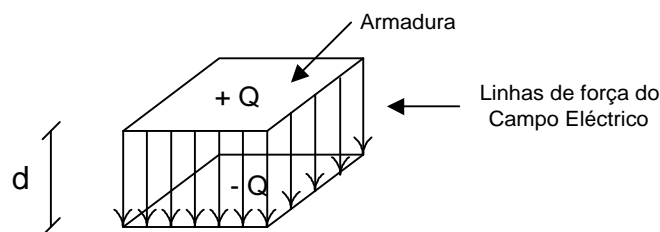


Figura 20: Campo Eléctrico num condensador

A carga eléctrica Q que pode ser armazenada por um condensador varia em proporção à tensão U que é aplicada (na carga do condensador), podendo ser expressa da seguinte maneira:

$$Q = C.U$$

Na expressão anterior, C é uma constante que representa a capacidade (capacitância) do condensador. Esta apresenta as seguintes características:

- É proporcional à área total das armaduras do condensador
- É proporcional à capacidade isoladora do elemento que separa as armaduras (dielétrico)
- É inversamente proporcional à distância entre as armaduras do condensador

A capacitância é medida em Farads, representados pela letra F . Na prática, a maior parte dos condensadores têm uma capacidade muito inferior à unidade, sendo normalmente utilizados o pF ($1 \times 10^{-12} F$) e o μF ($1 \times 10^{-6} F$).

15.2. Tipos de Condensadores

Os tipos de condensadores mais comuns são:

- Condensadores de papel
- Condensadores de plástico
- Condensadores de mica
- Condensadores de cerâmicos

- Condensadores electrolíticos

Estes últimos funcionam através de fenómenos electrolíticos (tal como as baterias), tendo que ser respeitada a sua polaridade (uma armadura tem polaridade positiva e a outra negativa). Para evitar a danificação deste tipo de condensadores, a sua polaridade vem assinalada pelo fabricante.

15.3. Associação de Condensadores

Se associarmos vários condensadores em paralelo:

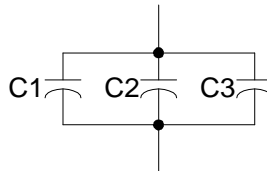


Figura 21: Associação de condensadores em paralelo

Como os condensadores estão ligados em paralelo, as tensões aos seus terminais são todas iguais e a carga total do conjunto é a soma de cada uma das cargas, isto é:

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Considerando as cargas dos condensadores

$$Q_1 = C_1.U, Q_2 = C_2.U, Q_3 = C_3.U$$

Definindo a capacidade do conjunto como

$$C = Q / U$$

fica,

$$Q = C.U = C_1.U + C_2.U + C_3.U \Rightarrow$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Isto é, a capacidade de um conjunto de condensadores ligados em paralelo é igual à soma das capacidades individuais (é equivalente à série de resistências).

Se interligarmos condensadores em série:

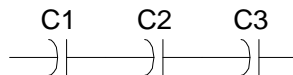


Figura 22: Associação de condensadores em série

Supondo que a placa esquerda do primeiro condensador é carregada positivamente, a placa direita deste condensador é carregada negativamente, com electrões (cargas negativas) que vai buscar à placa esquerda do segundo condensador, e assim sucessivamente para os restantes condensadores. Isto quer dizer que as cargas dos condensadores são todas iguais:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

A tensão total, neste caso, será:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Então,

$$U = Q / C = Q / C_1 + Q / C_2 + Q / C_3 \Rightarrow \\ 1 / C = 1 / C_1 + 1 / C_2 + 1 / C_3$$

Isto é, o inverso da capacidade dum conjunto de condensadores ligados em série é igual à soma dos inversos das capacidades individuais (é equivalente ao paralelo de resistências).

15.4. Rigidez Dielétrica

Isolante ou dielétrico é uma substância no interior da qual não existem (ou existem muito poucas) partículas electricamente carregadas, livres de se moverem quando sob a influência de um Campo Eléctrico.

Para cada dielétrico existe uma determinada intensidade limite de Campo Eléctrico, que, se ultrapassada, faz com que o dielétrico perca as suas propriedades isoladoras, tornando-se condutor. Este limite chama-se Rigidez Dielétrica de uma substância.

15.5. Relação entre Tensão e Corrente num Condensador

Dado que a corrente é definida como a passagem de carga eléctrica, por unidade de tempo:

$$I = \mathcal{I}Q / \mathcal{I}t$$



e como num condensador


$$Q = C.U$$

então, a relação entre a tensão e a corrente, num condensador de capacidade C é

$$I = C \cdot \frac{\mathcal{I}U}{\mathcal{I}t} \Leftrightarrow U = \frac{1}{C} \cdot \int I \cdot \mathcal{I}t$$

16. REFERÊNCIAS

- [Kni, 78] S. A. Knight, *Electrical Principles for Technicians 2*, Butterworth Publishers Inc., England, 1978. 
- [Mor, 87] Simões Morais, *Laboratório de Electricidade*, Porto Editora., England, 1987. 

 - do autor

 - disponível no ISEP