



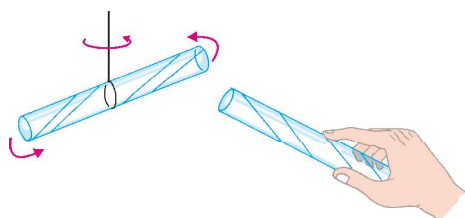
## Capítulo 01. Eletrodinâmica

### 1. Introdução

A história da Eletricidade começa na Antigüidade. Os gregos notaram que o âmbar, quando atritado, adquiria a propriedade de atrair pequenos pedaços de palha.

Vamos ilustrar essa propriedade através de exemplos.

Consideremos dois bastões de vidro e um pedaço de seda. Vamos, com esses objetos, realizar o seguinte experimento: inicialmente, cada bastão de vidro é atritado com o pedaço de seda. Em seguida, um dos bastões de vidro é suspenso por um fio e o outro bastão de vidro é aproximado do primeiro. Observamos que os dois bastões de vidro **repelem-se**.



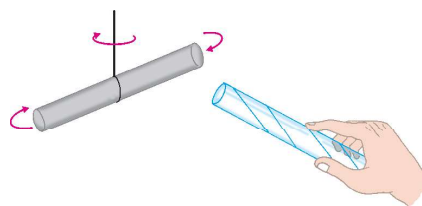
Os bastões de vidro repelem-se após terem sido atritados com a seda.

Vamos, agora, repetir o experimento com duas barras de plástico atritadas com um pedaço de lã ou pele de animal. Observamos que as duas barras de plástico **repelem-se**, da mesma maneira que os bastões de vidro do experimento anterior.



As barras de plástico repelem-se após terem sido atritadas com lã.

Finalmente, aproximamos a barra de plástico atritada com lã do bastão de vidro atritado com seda. Observamos, agora, uma **atração** entre eles.



Esses experimentos realizados com o vidro, seda, plástico e lã podem ser repetidos com muitos outros materiais. Chegaremos sempre às seguintes conclusões:

- 1) **corpos feitos do mesmo material, quando atritados pelo mesmo processo, sempre se repelem;**
- 2) **corpos feitos de materiais diferentes, atritados por processos diferentes, podem atrair-se ou repelir-se.**

Os bastões de vidro e as barras de plástico, quando atritados com a seda e a lã, respectivamente, adquirem uma propriedade que não possuíam antes da fricção: eles passam a se atrair ou a se repelir quando colocados convenientemente um em presença do outro. Nessas condições, dizemos que os bastões de vidro e as barras de plástico estão **eletrizados**.

Verificamos, então, através de experiências, que os corpos eletrizados podem ser classificados em dois grandes grupos: um semelhante ao **vidro – eletricidade vítrea** – e o outro, semelhante ao **plástico – eletricidade resinosa**.

Benjamin Franklin, político e escritor americano, por volta de 1750, introduziu os termos **eletricidade positiva** e **negativa** para as eletricidades vítrea e resinosa, respectivamente.

Para entendermos cientificamente o que ocorre num processo de fricção entre vidro e seda ou entre plástico e lã, devemos ter alguns conceitos básicos a respeito de **carga elétrica** e **estrutura da matéria**. É do que trataremos neste capítulo.

### 2. Carga Elétrica

A matéria é formada por átomos, que por sua vez são constituídos por um pequeno núcleo central e por uma eletrosfera.

#### 2.1. Núcleo

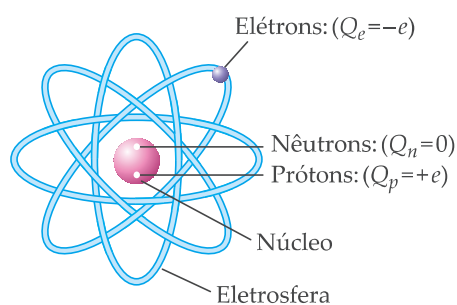
É a parte central do átomo, em que se localiza praticamente toda a massa do átomo e onde encontramos várias partículas, das quais, do ponto de vista da Eletricidade, destacamos duas: **prótons** e **nêutrons**.

- **Prótons:** partículas que apresentam a propriedade denominada **carga elétrica**, ou seja, trocam entre si, ou com outras partículas, ações elétricas de atração ou repulsão. Os prótons são partículas portadoras de **carga elétrica positiva**.
- **Nêutrons:** partículas que apresentam **carga elétrica nula**, ou seja, não trocam ações elétricas de atração ou de repulsão.

#### 2.2. Eletrosfera

É uma região do espaço em torno do núcleo onde gravitam partículas menores, denominadas **elétrons**. Os elétrons possuem massa desprezível quando comparada à dos prótons ou dos nêutrons.

- **Elétrons:** partículas que, como os prótons, apresentam a propriedade denominada carga elétrica, isto é, trocam ações elétricas de atração ou repulsão. Os elétrons são partículas portadoras de **carga elétrica negativa**.



### 3. Quantidade de Carga Elétrica

Aos corpos, ou às partículas, que apresentam a propriedade denominada **carga elétrica**, podemos associar uma grandeza escalar denominada **quantidade de carga elétrica**, representada pelas letras  $Q$  ou  $q$ , e que no Sistema Internacional de Unidades (SI) é medida em **coulomb (C)**.

A quantidade de carga elétrica positiva do próton e a quantidade de carga elétrica negativa do elétron são iguais em valor absoluto, e correspondem à menor quantidade de carga elétrica encontrada na natureza, até os dias atuais. Essa quantidade é representada pela letra  $e$  e é chamada de **quantidade de carga elétrica elementar**.

Em 1909, a quantidade de carga elétrica elementar foi determinada experimentalmente por Millikan. O valor obtido foi:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Nessas condições, podemos escrever as quantidades de carga elétrica do próton e do elétron como sendo:

$$q_p = +e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Para o nêutron temos  $q_n = 0$ .

A tabela abaixo apresenta a massa e a quantidade de carga elétrica das principais partículas atômicas:

Partícula	Massa (kg)	Quantidade de carga elétrica (C)
Elétron	$9,1 \cdot 10^{-31}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$
Próton	$1,7 \cdot 10^{-27}$	$+1,6 \cdot 10^{-19}$
Nêutron	$1,7 \cdot 10^{-27}$	0



## 4. Quantização da Quantidade de Carga Elétrica

Pela teoria atual, as menores partículas portadoras de carga elétrica, os prótons e os elétrons, são indivisíveis. Esse fato faz com que a quantidade de carga elétrica não possa assumir quaisquer valores, sendo possíveis somente valores múltiplos da quantidade de carga elementar ( $e$ ). Dizemos que a quantidade de carga elétrica de um corpo é **quantizada**.

Assim, um corpo com carga elétrica positiva só pode apresentar quantidade de carga elétrica ( $Q$ ) dada por:

$$+1e; +2e; +3e; \dots; +n \cdot e \quad (n = \text{número inteiro})$$

e um corpo com carga elétrica negativa só pode apresentar quantidade de carga elétrica dada por:

$$-1e; -2e; -3e; \dots; -n \cdot e \quad (n = \text{número inteiro}).$$

De um modo geral, podemos escrever que a quantidade de carga elétrica de um corpo é dada por:

$$Q = n \cdot e$$

### Exercícios Resolvidos

01. Determine a quantidade de carga elétrica associada a 500 elétrons.

**Resolução:** Sendo a quantidade de carga elétrica do elétron dada por:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Assim, a quantidade de carga elétrica associada a 500 elétrons é dada por:

$$Q = n \cdot e \Rightarrow Q = 500(-1,6 \cdot 10^{-19})$$

$$Q = -8,0 \cdot 10^{-17} \text{ C}$$

02. Determine a quantidade de carga elétrica de um corpo formado por um mol de íons de fosfato.

**Resolução:** Sabemos que um mol de íons de fosfato possui, aproximadamente,  $6 \cdot 10^{23}$  íons de fosfato, e que cada íon de fosfato possui 3 elétrons em excesso. Assim, temos:

$$Q = n \cdot (-e)$$

$$Q = -6 \cdot 10^{23} \cdot 3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$$

$$Q = -2,9 \cdot 10^5 \text{ C}$$

03. Um íon de bário possui 56 prótons, 76 nêutrons e 54 elétrons. Determine a quantidade de carga elétrica desse íon.

**Resolução:** Como o íon de bário possui 56 prótons e 54 elétrons, apresenta uma carga elétrica positiva com um excesso de carga elétrica correspondente a  $+2e$ .

Assim, temos:  $Q = n \cdot e$

$$Q = +2 (1,6 \cdot 10^{-19})$$

$$Q = +3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

## 5. Propriedades Elétricas dos Materiais

Os materiais existentes podem ser divididos em dois grandes grupos quanto à mobilidade dos portadores de cargas elétricas no seu interior: **condutores e isolantes**.

### 5.1. Condutores

São materiais que apresentam portadores de cargas elétricas (elétrons ou íons) quase livres, o que facilita a mobilidade dos mesmos em seu interior. São considerados bons condutores, materiais com alto número de portadores de cargas elétricas livres e que apresentam alta mobilidade desses portadores de cargas elétricas.

**Observação** – Condutor ideal é todo material em que os portadores de cargas elétricas existentes se movimentam livres, sem qualquer oposição do meio natural.

### 5.2. Isolantes

Os materiais isolantes se caracterizam por não apresentar portadores de cargas elétricas livres para movimentação. Nesses materiais, a mobilidade dos portadores de cargas elétricas é praticamente nula, ficando os mesmos praticamente fixos no seu interior.

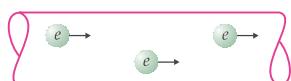
**Exemplos:** borracha, madeira, água pura, etc.

## 6. Corrente Elétrica

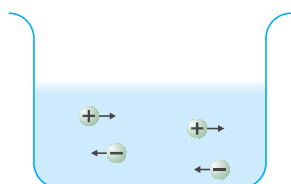
Dizemos que existe uma corrente elétrica quando portadores de cargas elétricas (positivos e/ou negativos) se movimentam numa direção preferencial em relação às demais.

### Exemplos

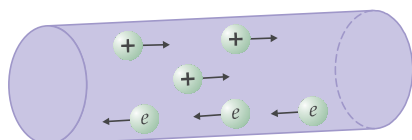
– **Metais:** portadores de cargas elétricas  $\Rightarrow$  elétrons.



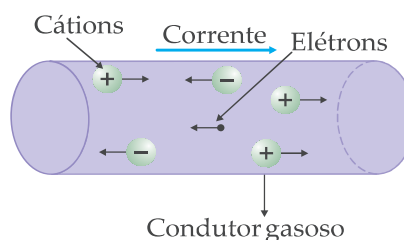
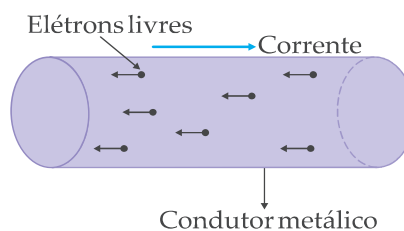
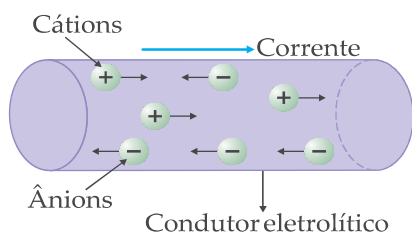
– **Soluções Eletrolíticas:** portadores de cargas elétricas  $\Rightarrow$  íons positivos e negativos.



– **Gases:** portadores de cargas elétricas  $\Rightarrow$  íons e elétrons.

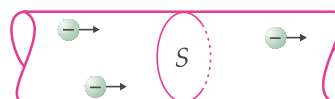


No estudo da corrente elétrica, dizemos que sua direção é a mesma da dos portadores de cargas elétricas, sejam positivos ou negativos. Com relação ao sentido, adotamos o **sentido convencional**: o sentido da corrente elétrica é o **mesmo** do movimento dos portadores de cargas elétricas **positivas** ou, por outro lado, sentido **contrário** ao do movimento dos portadores de cargas elétricas **negativas**.



## 7. Intensidade de Corrente Elétrica

Indicando por  $\Delta Q$  a carga total, em valor absoluto, que atravessa a superfície ( $S$ ) do condutor, no intervalo de tempo  $\Delta t$ , definiremos **intensidade média de corrente elétrica** ( $i_m$ ), nesse intervalo de tempo, pela relação:



$$i_m = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

A intensidade de corrente elétrica ( $i$ ) é uma grandeza escalar que fornece o fluxo de portadores de cargas elétricas, através de uma superfície, por unidade de tempo.

A unidade de intensidade de corrente elétrica no Sistema Internacional é o **ampère** (A).

$$\frac{\text{coulomb (C)}}{\text{segundo (s)}} = \text{ampère (A)}$$



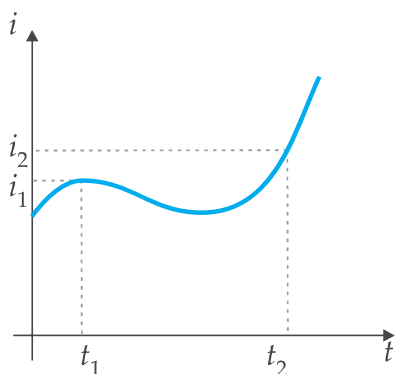
É muito freqüente a utilização de submúltiplos do ampère (A):

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A (miliampère)}$$

$$1 \text{ }\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A (microampère)}$$

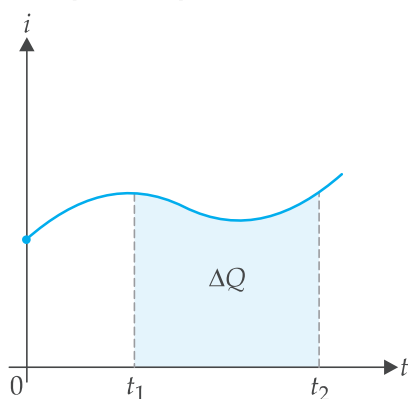
### 8. Gráfico $i \times t$

Quando a intensidade de corrente elétrica ( $i$ ) varia com o tempo, é costume apresentarmos o seu comportamento através de um diagrama horário:  $i \times t$ .



Intensidade de corrente variável com o tempo

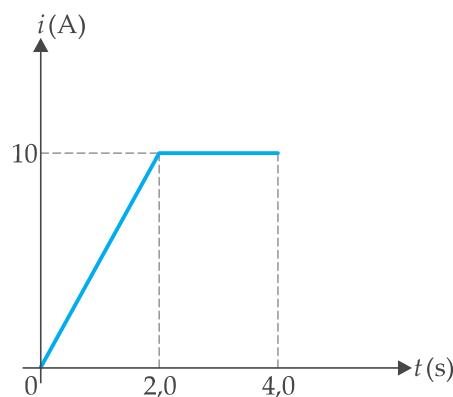
Nesses casos, para obtermos a intensidade média de corrente elétrica ( $i_m$ ), devemos, inicialmente, determinar a carga elétrica total ( $\Delta Q$ ) correspondente ao intervalo de tempo de nosso interesse. A carga elétrica total ( $\Delta Q$ ) é dada, numericamente, pela área sob a curva entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , conforme mostrado na figura a seguir.



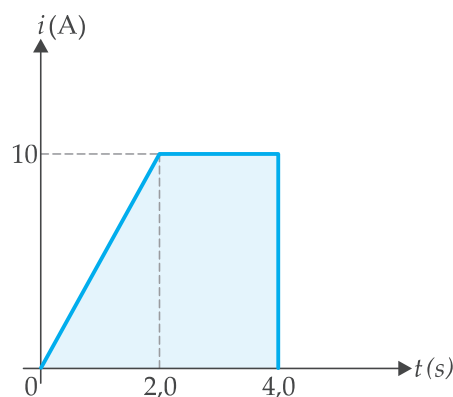
$$i_m \equiv \frac{\text{Área}}{\Delta t}$$

### Exercícios Resolvidos

01. Determinar a intensidade média de corrente elétrica no intervalo de tempo de 0 a 4,0 s, conforme o gráfico abaixo.



**Resolução:** A carga elétrica total,  $\Delta Q$ , correspondente ao intervalo de tempo de 0 a 4,0 s, é dada pela área do trapézio mostrada na figura a seguir.



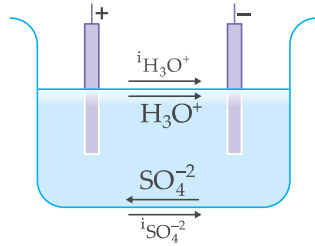
Assim, temos:

$$\Delta Q = \text{área do trapézio}$$

$$\Delta Q = (4,0 + 2,0) \cdot \frac{10}{2} \Rightarrow \Delta Q = 30 \text{ C}$$

$$\text{e sendo: } i_m = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow i_m = \frac{30}{4,0} \Rightarrow i_m = 7,5 \text{ A}$$

02. Na figura abaixo, suponhamos que  $1 \cdot 10^{20}$  íons sulfato e  $2 \cdot 10^{20}$  íons hidrônio se movimentem por segundo. Determinar a intensidade da corrente elétrica no interior da solução aquosa de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).



**Resolução:** No interior da solução, a intensidade de corrente elétrica ( $i$ ) total é a soma das intensidades de correntes de íons  $H_3O^+$  e  $SO_4^{2-}$ . Assim, temos:

$$i_{H_3O^+} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{n \cdot e}{\Delta t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{H_3O^+} = \frac{2 \cdot 10^{20} \cdot 1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{H_3O^+} = 32 \text{ A}$$

$$i_{SO_4^{2-}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{n \cdot e}{\Delta t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{SO_4^{2-}} = \frac{10^{20} \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{SO_4^{2-}} = 32 \text{ A}$$

Logo:

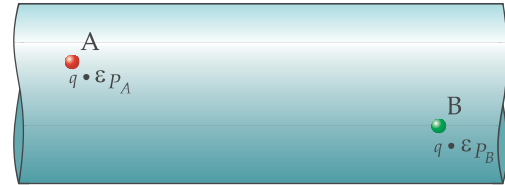
$$i = i_{H_3O^+} + i_{SO_4^{2-}}$$

$$i = 32 + 32$$

$$i = 64 \text{ A}$$

## 9. Potencial Elétrico

Consideremos um condutor elétrico:



O potencial elétrico ( $V$ ) representa a energia potencial elétrica por unidade de carga, sendo uma propriedade associada, exclusivamente, a um determinado ponto.

$$V_A = \frac{\epsilon_{pA}}{q_0} \quad V_B = \frac{\epsilon_{pB}}{q_0}$$

Em que:

- $V$  é o potencial elétrico do ponto;
- $\epsilon_p$  é a energia potencial elétrica de  $q_0$  no ponto;
- $q_0$  é a quantidade de carga elétrica do portador de carga, colocado no ponto em questão.

No Sistema Internacional de Unidades (S.I.), temos:

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_p \Rightarrow \text{joule (J)} \\ q_0 \Rightarrow \text{coulomb (C)} \end{array} \right\} V \Rightarrow \text{volt (V)}$$

$$\frac{\text{joule (J)}}{\text{coulomb (C)}} = \text{volt (V)}$$



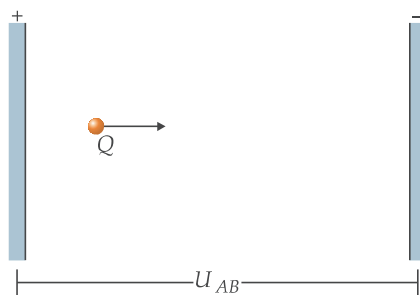
### 10. Tensão Elétrica ou ddp

Chama-se tensão elétrica ou diferença de potencial (ddp), entre os pontos A e B, a relação:

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

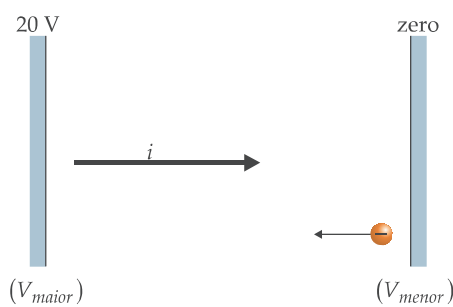
em que  $U_{AB}$  representa a diferença de potencial elétrico entre os pontos A e B, medida em volt (V).

Em relação ao movimento dos portadores de carga elétrica, podemos afirmar que:



A- Para que os portadores de carga se movimentem ordenadamente, é necessário que eles estejam sujeitos a uma diferença de potencial.

B- O sentido da corrente elétrica convencional é do potencial elétrico maior para o potencial elétrico menor, sendo que os elétrons se movimentam, espontaneamente, no sentido contrário, ou seja, do menor para o maior potencial.



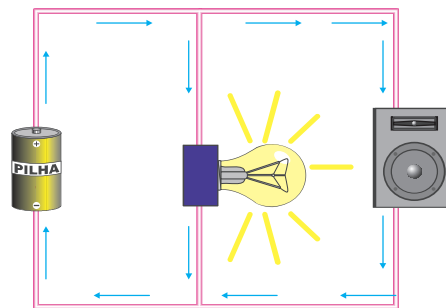
C- Na Eletrodinâmica é comum adotarmos a Terra como referência para a energia potencial elétrica. Assim, o potencial elétrico

da Terra é adotado como zero:

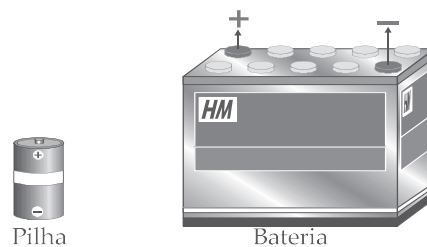
$$V_T = 0$$

### 11. Circuito Elétrico

Definimos circuito elétrico como sendo o percurso a ser feito pelos portadores de carga (corrente elétrica) por meio de um conjunto de elementos elétricos interligados.



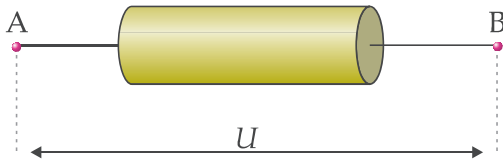
A condição primordial para se estabelecer um circuito elétrico é a presença de uma fonte elétrica, denominada **gerador**. Um gerador é um elemento capaz de transformar qualquer tipo de energia em energia elétrica e, nestas condições, manter uma diferença de potencial entre dois pontos.



### 12. Bipolo Elétrico

Denomina-se **bipolo elétrico** todo elemento de circuito com dois pólos sujeitos a uma tensão elétrica.





**Exemplo:** lâmpada, pilha, bateria, chuveiro, etc.

### 13. Principais Ligações em um Circuito

Os diferentes modos que podemos utilizar para interligar os elementos elétricos, formando um circuito elétrico, são chamados de associações. Podemos ter associação em série, em paralelo ou mista.

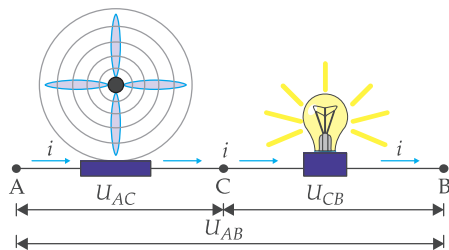
#### 13.1. Associação em Série

Neste tipo de associação, os elementos são ligados em seqüência, estabelecendo um único caminho de percurso para a corrente elétrica. Na associação em série, o funcionamento dos aparelhos elétricos ligados ao gerador ficam dependentes entre si: ou todos funcionam ou nenhum funciona.

Observemos que o gerador obriga os portadores de carga a se movimentarem através dos fios condutores, fornecendo a eles energia elétrica, e a passarem através de todos os elementos do circuito. Em cada elemento, os portadores de carga perdem energia elétrica, que será transformada em outra modalidade de energia.

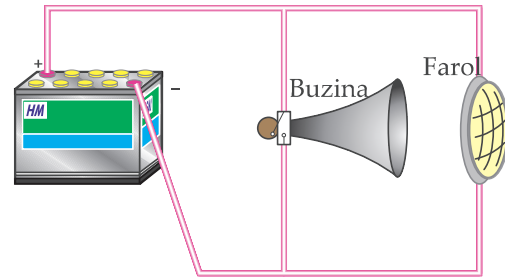
Assim, numa associação em série, temos:

- 1) correntes elétricas **iguais** em todos os elementos do circuito;
- 2)  $U_{AB} = U_{AC} + U_{CB}$



#### 13.2. Associação em Paralelo

Neste tipo de associação, os aparelhos elétricos são ligados ao gerador independentemente um do outro. Podem todos funcionar simultânea ou individualmente.

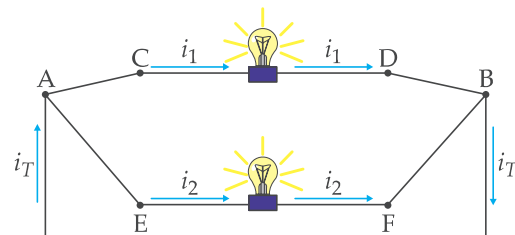


Observamos, nesta forma de associação, que existe uma corrente elétrica para cada aparelho elétrico, possibilitando o seu funcionamento independentemente de qualquer outro.

Os portadores de carga, forçados pelo gerador a se movimentarem através dos fios condutores, dividem-se em dois ou mais grupos; sendo que cada grupo perde sua energia elétrica ao atravessar o respectivo aparelho elétrico.

Portanto, numa associação em paralelo, temos:

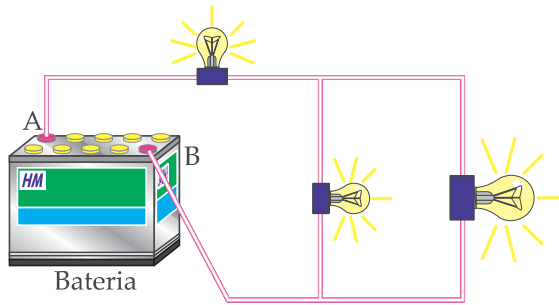
- 1) correntes elétricas diferentes para cada aparelho elétrico, sendo:  $i_T = i_1 + i_2$ .
- 2) ddp's iguais em todos os aparelhos elétricos:  $U_{AB} = U_{CD} = U_{EF}$ .



#### 13.3. Associação Mista

Como o nome indica, esta associação é formada por associações em série e em paralelo, concomitantemente.



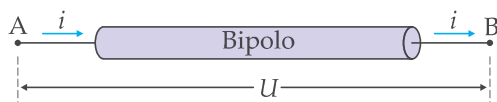


A potência elétrica ( $P$ ), desenvolvida no bipolo, é dada pela razão entre a variação de energia ( $\Delta E$ ) sofrida por uma quantidade de carga elétrica ( $\Delta Q$ ) ao passar de  $A$  para  $B$  e o correspondente intervalo de tempo ( $\Delta t$ ). Assim, temos:

$$P = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad (2)$$

### 13.4. Potência Elétrica de um Bipolo

Consideremos um bipolo elétrico em cujos terminais existe uma diferença de potencial  $U$  e, através do qual, circula uma corrente elétrica de intensidade  $i$ .



Temos que:

$$U = V_A - V_B$$

e

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

No pólo  $A$ , as cargas elétricas têm energia potencial elétrica dada por:

$$\epsilon_{P_A} = V_A \cdot \Delta Q$$

No pólo  $B$ , as cargas elétricas têm energia potencial elétrica dada por:

$$E_{P_B} = V_B \cdot \Delta Q$$

Para o deslocamento das cargas de  $A$  para  $B$ , há um consumo de energia dada por:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{P_A} - \epsilon_{P_B}$$

$$\Delta \epsilon = V_A \cdot \Delta Q - V_B \cdot \Delta Q$$

$$\Delta \epsilon = \Delta Q (V_A - V_B)$$

$$\Delta \epsilon = \Delta Q \cdot U \quad (1)$$

Unidade de potência no SI: watt (W)

$$1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$$

Portanto; comparando (1) e (2) vem:

$$P = \frac{\Delta Q \cdot U}{\Delta t}$$

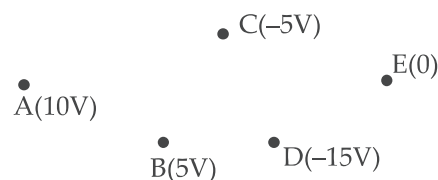
ou seja:  $P = i \cdot U$

### Exercícios Resolvidos

01. O que significa dizer: entre os pólos de uma bateria existe uma tensão de 12 V.

**Resolução:** Significa que, cada coulomb de carga elétrica que atravessa a bateria recebe da bateria uma energia correspondente a 12 J.

02. Na figura abaixo estão representados cinco pontos A, B, C, D e E com os seus respectivos potenciais em relação ao ponto E (referencial).



a) O que significa dizer:  $V_A = +10 \text{ V}$  e  $V_D = -15 \text{ V}$ ?

b) Qual a maior diferença de potencial que se pode obter entre dois pontos quaisquer?

### Resolução:

a) Quando dizemos que  $V_A = +10 \text{ V}$ , estamos afirmando que o potencial do ponto A está 10 V acima do potencial do ponto tomado como referência, ponto E ( $V_E = 0$ ). Do mesmo modo, dizer que  $V_D = -15 \text{ V}$  significa dizer que o potencial do ponto D está 15 V abaixo do potencial do ponto E (referência).

b) A maior diferença de potencial possível entre dois pontos é obtida com os pontos A e D. Assim, temos:

$$U_{AD} = V_A - V_D \Rightarrow U_{AD} = 10 - (-15)$$

$$U_{AD} = 25 \text{ V}$$

03. Um resistor, ligado a uma fonte de ddp constante, dissipa a potência de 84 W e é utilizado para aquecer um litro de água (1 000 g) durante 5 minutos. Sendo o calor específico da água igual a 1 cal/g °C e 1 cal = 4,2 J, determine o aumento de temperatura da água.

**Resolução:** Durante 5 minutos (300 s) a energia dissipada pelo resistor vale:

$$\Delta \epsilon = P \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta \epsilon = 84 \cdot 300$$

$$\Delta \epsilon = 25 200 \text{ J}$$

sabendo-se que 1 cal = 4,2 J, então essa energia corresponde a:

$$\frac{25 200}{4,2} = 6 000 \text{ cal}$$

Pela Calorimetria, temos:  $Q = m \cdot c \cdot \Delta \theta$

$$6 000 = 1 000 \cdot 1 \cdot \Delta \theta \Rightarrow \Delta \theta = 6^\circ \text{C}$$

04. Um ferro elétrico foi projetado para funcionar em 120 V com uma potência de 600 W. Em funcionamento normal, determine:

a) a intensidade de corrente elétrica no ferro;

b) a energia elétrica consumida em duas horas de funcionamento. Dar a resposta em joules e em quilowatt-hora (kWh).

### Resolução

a) Sendo  $P = 600 \text{ W}$ ;  $U = 120 \text{ V}$ , e sendo o ferro elétrico um bipolo, temos:

$$P = U \cdot i \Rightarrow 600 = 120 \cdot i \Rightarrow i = 5,0 \text{ A}$$

$$b) \Delta \epsilon = P \cdot \Delta t \Rightarrow \epsilon = 600 \cdot 2 \cdot 3 600$$

$$\Delta \epsilon = 4,32 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$\text{Sendo } 1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} \Rightarrow \epsilon = 1,2 \text{ kWh}$$