

## 1: O gerador

Para compreendermos como os íons formam a corrente elétrica, o significado de um gerador e o conceito de força eletromotriz de um gerador, façamos a seguinte analogia:

Suponhamos um conjunto de esferas encostadas umas nas outras de maneira a formar um colar fechado (fig. 163). Se nenhuma força atuar nessas esferas, isto é, se não for cedida energia a essas esferas, elas permanecerão indefinidamente em repouso. Suponhamos que um dispositivo qualquer forneça energia ao conjunto de esferas de maneira tal que o colar gire como está indicado na figura: todas as esferas se deslocam de maneira que cada uma vá passando sucessivamente pelas posições de todas as outras.

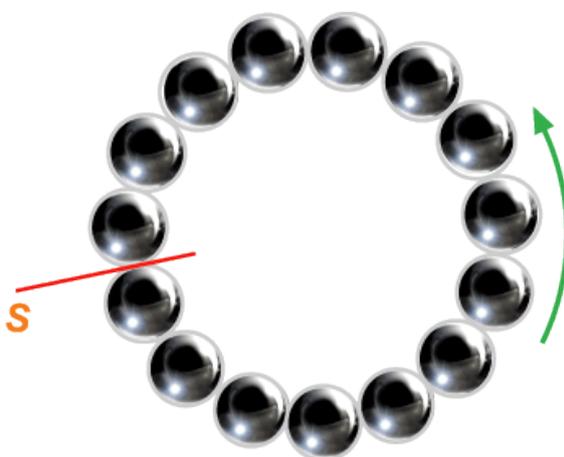


Figura 163

Consideremos uma secção transversal S qualquer do colar. Se contarmos o número de esferas que passam por essa secção durante certo tempo  $t$ , chegaremos a duas conclusões:

1<sup>a</sup> – o número de esferas que passam pela secção S durante certo tempo é igual ao número de esferas que passam por qualquer outra secção transversal durante o mesmo tempo; sendo assim, tudo o que falarmos sobre a secção S valerá também para qualquer outra secção transversal do colar.

2<sup>a</sup> – o número de esferas que passam pela secção S durante certo tempo depende da energia comunicada às esferas durante o mesmo tempo. Assim, se for cedida às esferas uma energia grande, elas se deslocarão com grande velocidade, e o número de esferas que passarão por S será grande. Se for cedida uma energia pequena, as esferas se deslocarão com pequena

velocidade, e o número de esferas que passar por S será pequeno.

Observemos bem que sempre nos referimos à energia fornecida às esferas durante certo tempo, e ao número de esferas que passam por S durante o mesmo tempo.

Suponhamos agora uma corrente elétrica circulando por um circuito fechado. Já vimos que essa corrente elétrica é formada por íons ou por elétrons em movimento. Esses íons ou elétrons, quando se deslocam, comportam-se como as esferas do colar, isto é, cada íon vai ocupando sucessivamente a posição dos outros íons. Mas, com as diferenças seguintes:

1<sup>a</sup> – os íons ou os elétrons não ficam encostados uns nos outros;

2<sup>a</sup> – há duas correntes de íons; a de íons positivos num sentido, e a de íons negativos em sentido oposto (fig. 164) (com exceção do caso dos metais em que há movimento só de elétrons e num só sentido).

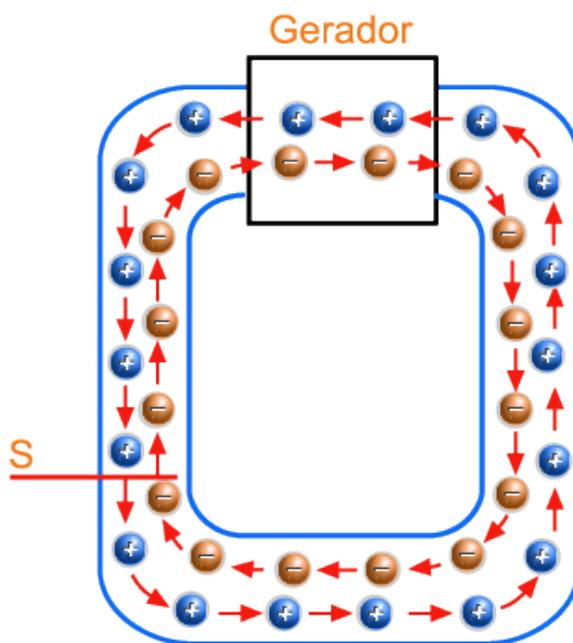


Figura 164

Do mesmo modo que no caso do colar, esses íons não entrariam em movimento se nenhuma força atuasse neles, isto é, se não fosse cedida energia a eles. De onde vem essa energia fornecida aos íons? Vem de um dispositivo chamado gerador, e do qual falaremos logo mais.

Se considerarmos no circuito uma secção transversal S qualquer, e o número de íons que passam por essa secção durante certo tempo, chegaremos a duas conclusões análogas àquelas duas do caso do colar:

1ª – o número de íons que atravessam essa secção durante certo tempo é igual ao número de íons que atravessa qualquer outra secção durante o mesmo tempo. A carga elétrica que atravessa a secção é igual à soma das cargas dos íons que a atravessam. Como, em um mesmo tempo, o número de íons que atravessam qualquer secção é o mesmo, concluímos que a carga elétrica que atravessa qualquer secção transversal do circuito é a mesma, durante o mesmo tempo. Para nós é mais importante considerarmos a carga elétrica do que considerarmos o número de íons.

2ª – o número de íons que passa pela secção durante certo tempo, isto é, a carga elétrica que passa pela secção durante certo tempo, depende da energia fornecida aos íons durante o mesmo tempo. Assim, se o gerador fornecer muita energia, o número de íons, isto é, a carga elétrica que passará pela secção transversal será grande.

Como é que o gerador fornece energia aos íons? O gerador fornece energia aos íons por meio de um campo elétrico; ele provoca o aparecimento de um campo elétrico no interior dos condutores que formam o circuito. As cargas elétricas dos íons, estando em um campo elétrico, ficam sujeitas a forças que põem os íons em movimento (veja a figura 116).

Evidentemente o gerador não pode criar essa energia a partir do nada. O que ele faz é uma transformação de energia. Ele recebe energia de certo tipo e depois a transforma em energia elétrica; em outras palavras: ele recebe certa quantidade de energia que permite que ele provoque o aparecimento do campo elétrico.

Quando o gerador transforma energia mecânica em elétrica ele é chamado gerador mecânico ou dínamo; quando transforma energia química é chamada pilha hidroelétrica; quando transforma energia térmica é chamado pilha termoelétrica, etc.. No tópico [“Aplicações do efeito termoelétrico”](#) falamos superficialmente de como funciona uma pilha termoelétrica; em eletromagnetismo, veremos como funciona um dínamo.

## 2: [Força eletromotriz do gerador](#)

Para relacionarmos a energia que o gerador fornece aos íons com a carga elétrica que atravessa uma secção transversal do circuito definimos uma grandeza característica do gerador, chamada força eletromotriz.

A energia que o gerador fornece aos íons ou aos elétrons na prática chamamos energia fornecida ao circuito.

## Definição

Chama-se força eletromotriz de um gerador ao quociente da energia que o gerador fornece ao circuito durante certo tempo pela carga elétrica que atravessa uma secção transversal do circuito durante o mesmo tempo.

Em geral se representa a força eletromotriz pela letra E (ou e), ou pelas iniciais f.e.m.. Sendo W a energia que o gerador fornece ao circuito durante o tempo t, e Q a carga elétrica que passa por qualquer secção transversal durante o mesmo tempo, temos, por definição:

$$E = \frac{W}{Q}$$

Estudaremos o caso de geradores de força eletromotriz constante. É claro que quando E é constante, a energia W fornecida pelo gerador é proporcional à carga Q que ele fornece durante o mesmo tempo.

## Energia fornecida pelo gerador

A f.e.m. é uma grandeza característica do gerador. Conhecendo a f.e.m. do gerador podemos calcular a energia que ele fornece ao circuito durante certo tempo. Da fórmula anterior tiramos:

$$W = EQ$$

Substituindo Q por  $It$ , resulta:

$$W = EIt$$

Essa é a energia fornecida durante o tempo t por um gerador de f.e.m. E a um circuito que absorve a corrente I.

## Potência fornecida pelo gerador

Sendo W a energia fornecida pelo gerador durante o tempo t, a potência do gerador por definição é:

$$P = \frac{W}{t}, \text{ ou seja: } P = \frac{EIt}{t}$$

Autor: Roberto A. Salmeron

$$P = EI$$

### Unidades de f.e.m.

Pela definição, a força eletromotriz é o quociente de uma energia por uma carga elétrica. Já vimos, na fórmula , que a diferença de potencial também é o quociente de uma energia por uma carga elétrica. Logo, força eletromotriz e diferença de potencial são grandezas físicas da mesma espécie. Por causa disso avaliamos força eletromotriz e diferença de potencial nas mesmas unidades. No sistema MKS, em volts. No sistema CGSES, em ues CGSV (ou statvolt).

### Circuito interno e circuito externo

Já vimos, no tópico "[O circuito elétrico](#)", que para que haja corrente elétrica é necessário que o gerador e os condutores ligados a ele formem um caminho fechado para os íons. Esse caminho fechado é chamado circuito. Os íons, além de se deslocarem nos condutores que estão ligados ao gerador também se deslocam no próprio gerador.

Chamamos circuito interno do gerador ao conjunto dos condutores do próprio gerador por onde passa a corrente. À resistência desse circuito chamamos resistência interna do gerador; representaremos por  $R_i$ , ou  $r_i$  (fig. 165). Chamamos circuito externo ao conjunto dos condutores ligados ao gerador. A sua resistência é chamada resistência externa e representaremos por  $R_e$ , ou  $r_e$ .

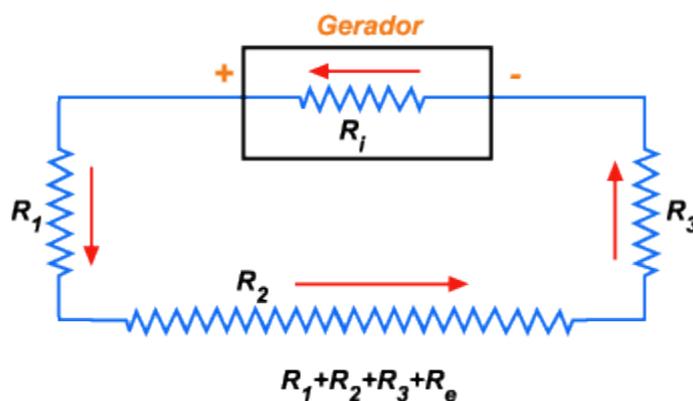


Figura 165

## Polos do gerador

Chamamos polos do gerador aos pontos por onde o gerador é ligado ao circuito externo. Convencionamos chamar polo positivo ao polo por onde a corrente sai do gerador; negativo ao polo por onde a corrente entra no gerador.

Esses nomes, polo positivo e polo negativo já eram usados em Eletricidade antes de se descobrir que nos metais a corrente é constituída por elétrons em movimento. Naquela época os físicos admitiam que a corrente elétrica fosse constituída de partículas positivas que se deslocassem do polo positivo para o negativo do gerador. Atualmente sabemos que nos metais acontece exatamente o contrário: a corrente é formada por elétrons, que são partículas com carga negativa e que se deslocam do polo negativo para o positivo. Mas apesar de sabermos que esse é o sentido verdadeiro da corrente, ainda hoje adotamos como convenção que a corrente seja constituída por partículas positivas que se desloquem do polo positivo para o negativo. Pois, para efeito de raciocínio é indiferente considerar-se uma carga positiva deslocando-se num sentido ou uma negativa deslocando-se em sentido oposto (fig. 166).

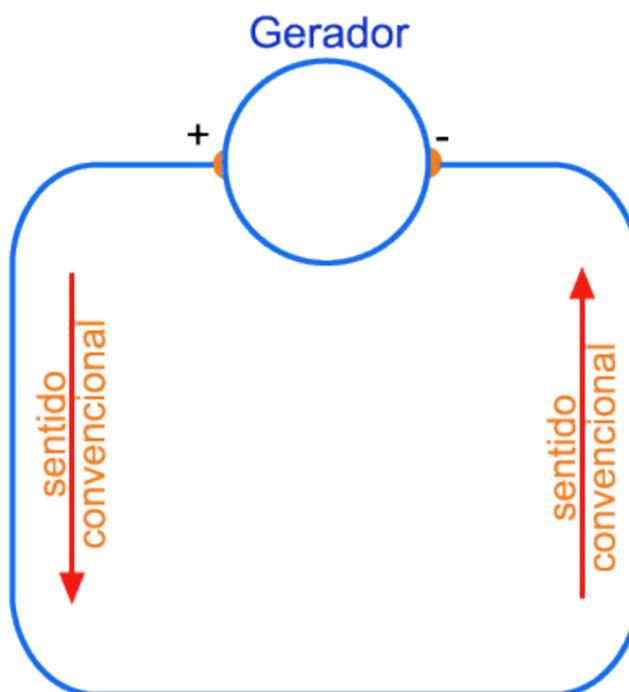


Figura 166

## Representação

Esquemáticamente se representa um gerador por dois traços paralelos de comprimentos diferentes. Aqui admitiremos que o traço maior represente o polo positivo (por exemplo, o da figura 167). Mas poderíamos convencionar que o traço menor representasse o polo positivo, como fazem muitos autores.

### 3: Lei de OHM para circuitos fechados, ou lei de Pouillet

A energia que o gerador fornece é utilizada em parte pelo circuito interno e o restante pelo circuito externo. Sendo  $R_i$  a resistência interna, a energia consumida pelo circuito interno durante o tempo  $t$  é  $R_i I^2 t$ ; sendo  $R_e$  a resistência externa, a energia consumida pelo circuito externo durante o tempo  $t$ , é  $R_e I^2 t$  (fig. 165).

A f.e.m. do gerador por definição é  $E = \frac{W}{Q}$ . Sendo  $W = R_i I^2 t + R_e I^2 t$ , temos:

$$E = \frac{R_i I^2 t + R_e I^2 t}{Q}$$

Mas,  $Q = It$ . Então:

$$E = \frac{R_i I^2 t + R_e I^2 t}{It}$$

$$E = R_i I + R_e I \text{ ou } E = (R_i + R_e) I$$

Essa expressão resume a lei de Ohm para os circuitos fechados, ou lei de Pouillet: “a f.e.m. de um gerador é igual ao produto da intensidade da corrente pela resistência total do circuito”.

Vemos por aí que a f.e.m. é dada pelo produto de uma resistência por uma intensidade de corrente, o que confirma que f.e.m. é grandeza da mesma espécie que diferença do potencial.

Sendo  $E = R_i I + R_e I$ , a f.e.m. e a soma de duas diferenças de potencial: uma  $R_e I$ , é a diferença de potencial entre os extremos do circuito externo; outra,  $R_i I$  é a diferença de potencial entre os extremos do circuito interno.

Fazendo  $R_e I = V$ , temos:

$$E = V + R_i I$$

## 4: Associação de geradores

Há três tipos de associação de geradores:

- a) em série
- b) em paralelo, ou em derivação
- c) mista.

### a. Associação em série

É aquela em que se liga o polo positivo de um gerador ao polo negativo do seguinte.

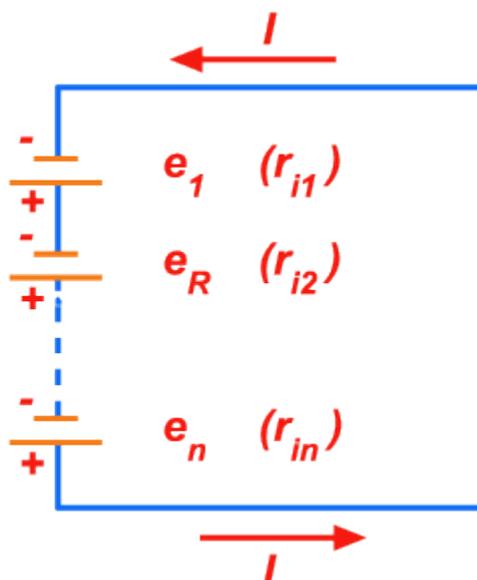


Figura 167

O circuito externo é ligado ao polo positivo do primeiro e ao polo negativo do último. As características dessa associação são as seguintes.

#### 1. Intensidade da corrente

Na associação em série, em qualquer parte do circuito a corrente tem a mesma intensidade. Se introduzirmos novos geradores, a intensidade aumenta; se retirarmos, a intensidade diminui. Mas para o mesmo número de geradores, ela tem o mesmo valor em qualquer parte do circuito.



$$E = e + e + \dots + e \text{ (n parcelas) ou } E = ne$$

2º – As resistências internas são iguais, isto é,

$$r_{i1} = r_{i2} = \dots = r_{in}$$

Chamando  $r_i$  a essa resistência interna igual para todos, resulta, para a associação:

$$R_i = nr_i$$

### b. Associação em paralelo de geradores iguais

Estudaremos a associação em paralelo só para o caso em que os geradores são iguais. Nessas associações, os polos positivos são ligados entre si e constituem o polo positivo da associação (ponto P); os polos negativos são ligados entre si e constituem o polo negativo da associação (ponto N) (fig. 168). Seja  $i$  a intensidade fornecida por um gerador, e a força eletromotriz de cada gerador e  $w$  a energia fornecida por cada gerador, durante o tempo  $t$ .

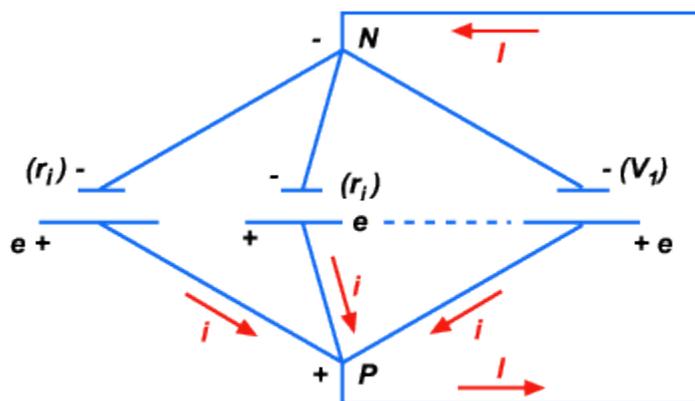


Figura 168

#### 1. Intensidade da corrente

As correntes  $i$  reúnem-se no ponto P e dão a corrente fornecida pela associação. Pela primeira lei de Kirchhoff temos:

$$I = i + i + \dots + i \text{ (n parcelas)}$$

Ou

$$I = ni$$

## 2. Força eletromotriz

A energia fornecida por um gerador é:  $w = eit$  (1).

Sendo  $W$  a energia fornecida pela associação, temos:

$$W = nw$$

Chamamos gerador equivalente à associação a um gerador que fornece para o circuito externo a corrente  $I$ , e, durante o tempo  $t$  fornece a mesma energia  $W$  que a associação fornece. Para isso ele deve ter uma f.e.m.  $E$ , que não conhecemos ainda, mas que deve satisfazer à equação:

$$W = EIt. \text{ Sendo } W = nw, \text{ temos:}$$

$$EIt = neit. \text{ Mas } ni = I. \text{ Então}$$

$$EIt = eIt \text{ ou}$$

$$E = e$$

Concluimos que numa associação em paralelo a força eletromotriz da associação é igual à força eletromotriz de cada gerador, quando os geradores são iguais.

## 3. Resistência interna da associação

Os geradores têm a disposição de condutores associados em paralelo. Sendo  $R_i$  a resistência interna da associação, temos:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_i} + \dots + \frac{1}{r_i} \text{ (n parcelas)}$$

$$\frac{1}{R_i} = \frac{n}{r_i} \text{ ou } R_i = \frac{r_i}{n}$$

A resistência total da associação é  $\frac{1}{n}$  da resistência de cada gerador.

### c. Associação mista com geradores iguais

É aquela em que diversas associações em série são ligadas em paralelo, ou vice-versa (figs. 169 e 170). Deduzamos as fórmulas tomando por base a figura 169 :

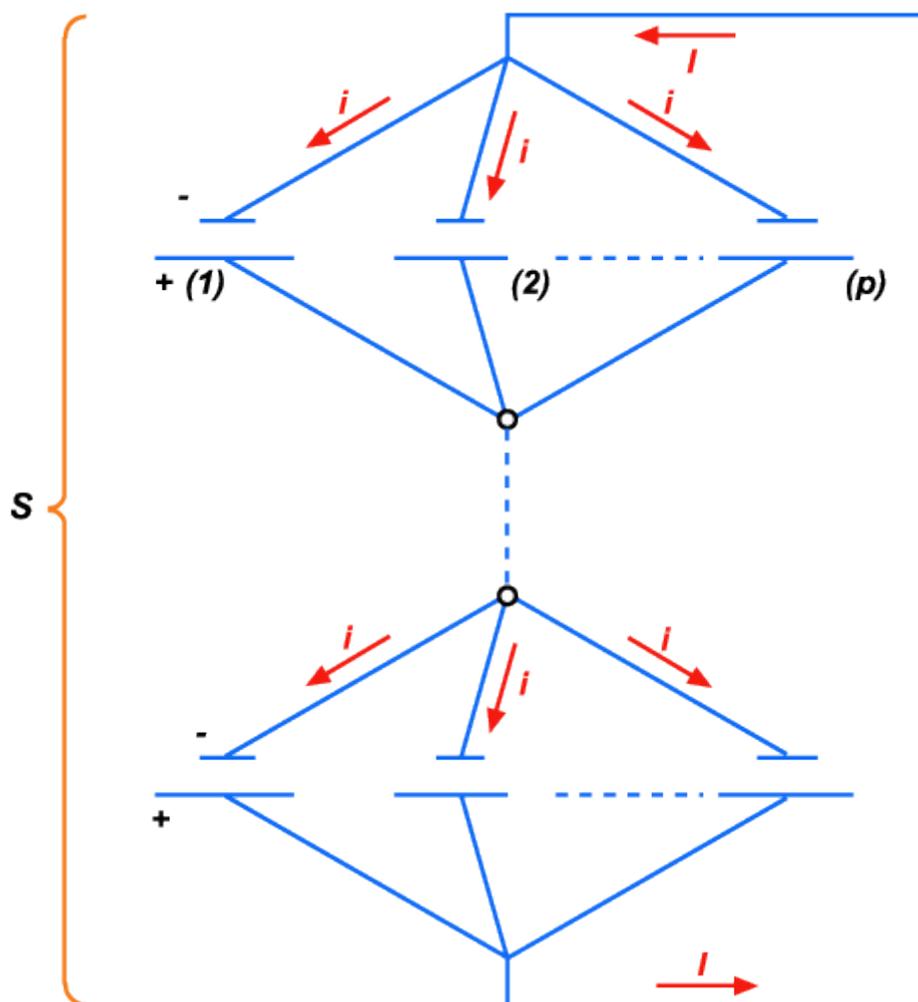


Figura 169

Seja:

$e$  = f.e.m. de um gerador

$r_i$  = resistência interna de um gerador

$i$  = corrente fornecida por um gerador

$p$  = número de geradores em cada associação em paralelo

$s$  = número de associações em paralelo ligadas em série (na segunda figura acima,  $s$  é o número de geradores de cada série e  $p$  o número de séries ligadas em paralelo).

Tomemos como base a figura 169. Cada associação em paralelo tem as características seguintes:

1 – f.e.m.: de acordo com  $E = e$ , a f.e.m. de cada uma é igual a  $e$ .

2 – intensidade de corrente: de acordo com  $I = ni$  cada associação fornece corrente igual a  $pi$ .

3 – resistência interna: de acordo com  $R_i = \frac{sr_i}{p}$  vale  $\frac{r_1}{p}$ .

A associação final terá, de acordo com as fórmulas  $E = e_1 + e_2 + \dots + e_n$ ,  $E = e + e + \dots + e$  e com o que vimos sobre a corrente a respeito da associação em série:

1 – f.e.m.:  $E = s.e$

2 – resistência interna:  $R_i = \frac{sr_i}{p}$

3 – corrente:  $I = pi$

## 5: Receptor e força contra - eletromotriz de um receptor

Vimos que um gerador recebe um determinado tipo de energia e a transforma em energia elétrica. Há dispositivos que fazem o inverso: recebem corrente elétrica e a transformam num outro tipo de energia. Esses dispositivos são chamados receptores.

### Exemplo

Em Eletromagnetismo estudaremos o seguinte fenômeno: quando um condutor percorrido por corrente  $i_1$  é colocado próximo de um condutor percorrido por corrente  $i_2$ , eles exercem força um sobre o outro. Essa força pode ser grande, capaz de deslocar até corpos pesando toneladas. Na prática damos a esses condutores uma forma geométrica especial para que a força faça com que um deles execute movimento de

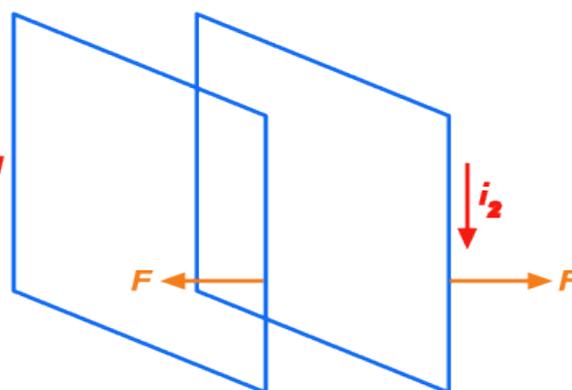


Figura 171

rotação. Quando esse condutor gira, ele pode arrastar consigo outros corpos, que também entrarão em rotação. Vemos que esses dois condutores recebem corrente elétrica e fornecem energia mecânica (de rotação) aos corpos presos a eles. Eles constituem, portanto, um receptor; é um tipo particular de receptor chamado motor elétrico. Em Eletromagnetismo voltaremos a falar neles.

Vimos no tópico "[Efeitos Principais na Corrente Elétrica](#)" que um dos efeitos da corrente elétrica é produzir calor. Como a produção de calor coexiste sempre com a corrente elétrica, os dispositivos em que se usa a corrente elétrica simplesmente para produzir calor não são considerados receptores. Por exemplo, um fogareiro elétrico ou uma lâmpada de incandescência não são receptores.

### Definição

Chama-se receptor a qualquer dispositivo que transforme energia elétrica em um outro tipo qualquer de energia, contanto que esse outro tipo de energia não seja calor.

### Força contra-eletromotriz

Durante certo tempo o receptor recebe, sob a forma de corrente elétrica, certa energia  $W$ . Durante o mesmo tempo ele recebe a carga elétrica  $Q$  dada por  $Q = I \cdot t$ . Para relacionarmos a energia que ele recebe com a carga elétrica que ele recebe durante o mesmo tempo, definimos uma grandeza característica do receptor, chamada força contra-eletromotriz.

**Definição**

Chama-se força contra-eletromotriz de um receptor ao quociente da energia elétrica que ele absorve durante certo tempo pela carga elétrica que ele recebe durante o mesmo tempo.

Representa-se a força contra-eletromotriz pela letra  $E$  (ou  $e$ ), ou pelas iniciais f.c.e.m.. Então, por definição,

$$f.c.e.m \text{ ou } E = \frac{W \text{ absorvida}}{Q}$$

**Energia absorvida pelo receptor**

De acordo com a fórmula anterior, temos:

$$W \text{ absorvida} = E.Q$$

Sendo  $I$  a intensidade da corrente, temos:  $Q = It$ . Então:

$$W \text{ absorvida} = EIt$$

**Potência absorvida pelo receptor**

A potência absorvida pelo receptor será, por definição:

$$P \text{ absorvida} = \frac{W \text{ absorvida}}{t}. \text{ Então: } P \text{ absorvida} = \frac{EIt}{t} \text{ ou: ou:}$$

$$P \text{ absorvida} = EI$$

**Unidades de f.c.e.m.**

A f.c.e.m. sendo o quociente de uma energia por uma carga elétrica é uma grandeza da mesma espécie que f.e.m. ou diferença de potencial. Por causa disso, a unidade de f.c.e.m. é a mesma unidade de f.e.m. e de diferença de potencial.

## Polos

Chamamos polo positivo do receptor ao ponto do receptor por onde a corrente entra nele. E polo negativo ao ponto por onde a corrente sai. (Observemos que essa nomenclatura é invertida em relação à nomenclatura usada por geradores).

Representamos um receptor também por dois traços paralelos de comprimentos diferentes. Aqui

consideramos que o traço maior represente o polo positivo. Vemos que, no que diz respeito à corrente, podemos pensar em um receptor como se fosse um gerador ligado com os polos trocados (fig. 172).

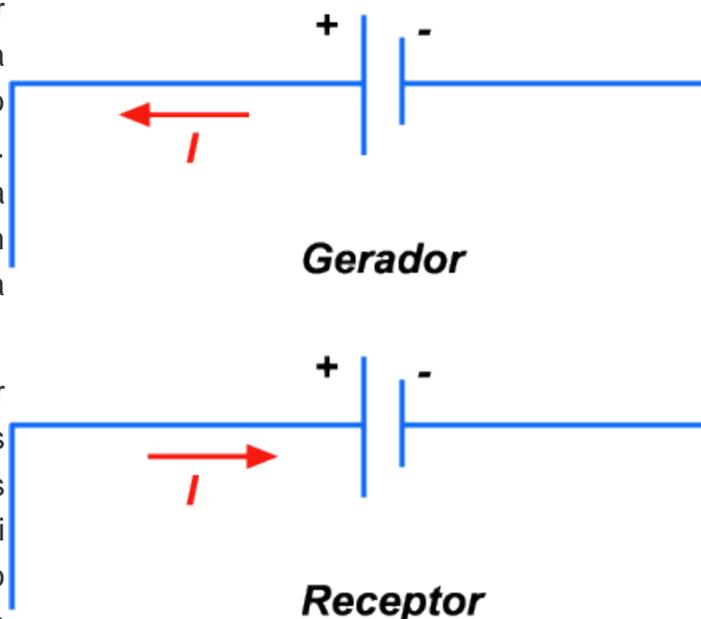


Figura 172

## Convenção

Convencionamos que a energia elétrica fornecida a um circuito seja positiva, e a energia elétrica absorvida por um circuito seja negativa. Com essa convenção, a f.e.m. de um gerador, que é o quociente de uma energia elétrica fornecida, por uma carga elétrica, é positiva. E a f.c.e.m. de um receptor, que é o quociente de uma energia elétrica absorvida, por uma carga elétrica, é negativa. Em outras palavras, a f.c.e.m. pode ser considerada como uma f.e.m. negativa.

No próximo parágrafo demonstraremos que se em um trecho de um circuito existir um gerador de força eletromotriz  $E_1$  e um receptor de força contraeletromotriz  $E_2$ , eles funcionam como se aí existisse um único gerador de força eletromotriz igual a  $E_1 - E_2$ . Isto é, tudo se passa como se o receptor

tivesse uma força eletromotriz negativa igual a  $-E_2$ , ligada em série com a força eletromotriz  $E_1$ , pois a resultante seria:  $E_1 + (-E_2) = E_1 - E_2$  (fig. 173).

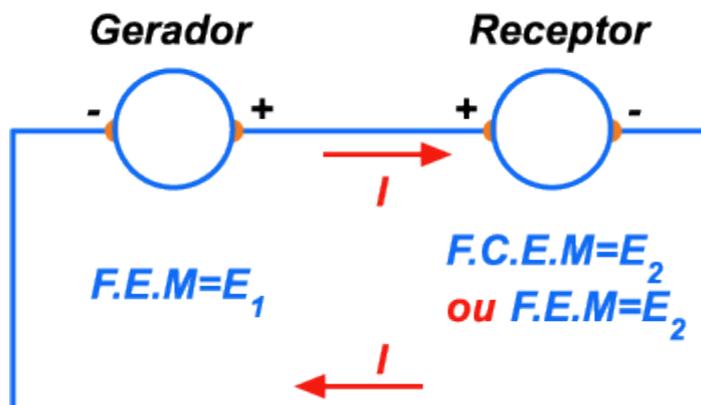


Figura 173

## 6: Lei de OHM para um trecho em que há geradores e receptores

Já vimos que quando não há gerador nem receptor entre dois pontos A e B, a lei de Ohm estabelece que:

$$V_A - V_B = rI$$

onde  $r$  é a resistência do trecho AB. Suponhamos agora um circuito como o que está indicado na figura 174. Acompanhando o sentido em que a corrente circula, no trecho BA desse circuito estão ligados em série:

- 1º um gerador G de resistência interna  $r_g$  e f.e.m.  $E_1$  ;
- 2º um receptor R de resistência interna  $r_r$  e f.c.e.m.  $E_2$  ;
- 3º uma resistência qualquer  $r_1$  .

Entre os mesmos pontos A e B é ligada uma resistência  $r$  que fecha o circuito. Sendo  $I$  a intensidade da corrente, podemos escrever que a diferença de potencial entre A e B vale:

$$V_A - V_B = rI$$

Veremos agora que essa diferença de potencial pode ser expressa de outra maneira. Durante um tempo  $t$  o gerador fornece ao circuito a energia  $W = E_1 I t$  .

Com essa energia fornecida acontece o seguinte:

**Autor: Roberto A. Salmeron**

1º a resistência interna do gerador absorve a energia  $W_1 = r_g I^2 t$  ;

2º a resistência interna do receptor absorve a energia  $W_2 = r_r I^2 t$  ;

3º a resistência  $r_1$  absorve a energia  $W_3 = r_1 I^2 t$  ;

4º de acordo com a fórmula  $W$  absorvida =  $EIt$  o receptor absorve do circuito, para transformá-la em outro tipo de energia, a energia  $W_4 = E_2 I^2 t$  ;

5º a resistência  $r$  absorve a energia  $W_5 = r I^2 t$  .

Pelo princípio da conservação da energia, a energia fornecida pelo gerador deve ser igual à soma das energias absorvidas:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5$$

$$E_1 I t = r_g I^2 t + r_r I^2 t + r_1 I^2 t + E_2 I^2 t + r I^2 t$$

ou

$$E_1 = r_g I + r_r I + r_1 I + E_2 + r I$$

ou

$$E_1 = (r_g + r_r + r_1) I + E_2 + r I$$

Mas, o gerador, o receptor e a resistência  $r_1$  estão em série; logo as suas resistências se somam. Fazendo

$$r_g + r_r + r_1 = R$$

que é então a resistência total entre B e A, temos:

$$E_1 = R I + E_2 + r I$$

Mas,  $rI$  é igual à diferença de potencial  $V_A - V_B$  . Logo,

$$E_1 = R I + E_2 + (V_A - V_B)$$

ou

$$V_A - V_B = E_1 - E_2 - R I$$

Autor: Roberto A. Salmeron

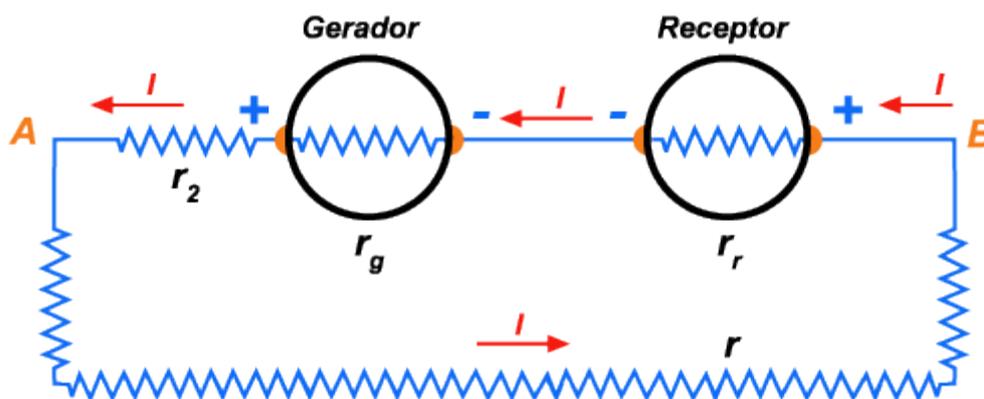


Figura 174

Observemos que ficou agora demonstrado o que tínhamos dito no parágrafo anterior: que quando um receptor está em série com um gerador a força contra-eletromotriz do receptor é subtraída da força eletromotriz do gerador. Fazendo  $E_1 - E_2 = E$ , temos:

$$V_A - V_B = E_1 - RI$$

Concluimos que “a diferença de potencial entre A e B é igual à soma algébrica de todas as forças eletromotrizes e contra-eletromotrizes existentes no trecho BA menos o produto da resistência total do trecho BA pela intensidade da corrente”.

Temos então duas fórmulas para calcular a diferença de potencial entre A e B:

$$V_A - V_B = rI$$

$$V_A - V_B = E_1 - RI.$$

A  $V_A - V_B = rI$  é a lei de Ohm, e é de aplicação mais rápida que a  $V_A - V_B = E_1 - RI$ . De maneira que quando conhecemos  $r$  e  $I$  é conveniente aplicarmos a fórmula  $V_A - V_B = rI$ . Mas, a fórmula  $V_A - V_B = E_1 - RI$  tem uma utilidade extraordinária: porque ela permite que calculemos a diferença de potencial entre A e B exclusivamente em função dos elementos do circuito compreendidos entre B e A. Portanto, mesmo que não conheçamos a resistência  $r$  ligada entre A e B podemos calcular  $V_A - V_B$  se conhecermos o trecho BA do circuito.

## 7: Estudo das rede-leis de Kirchhoff

Chamamos rede a um conjunto de condutores, geradores e receptores ligados entre si de maneira qualquer, isto é, em combinações de séries e derivações. Os problemas relativos às redes são resolvidos por duas leis de Kirchhoff. A primeira destas leis é a primeira lei que estudamos na associação de resistores em paralelo ( $W_e = R_e 2t = 3,6 |25|^2 600 = 13500$ ). A segunda lei é uma generalização da segunda lei que estudamos naquele parágrafo. Chamamos nó ao ponto de concurso de vários condutores, como A, B, C, D, etc.. Chamamos malha a qualquer circuito fechado que se pode considerar dentro da rede; por exemplo, ABC, ACD, ABCD, etc..

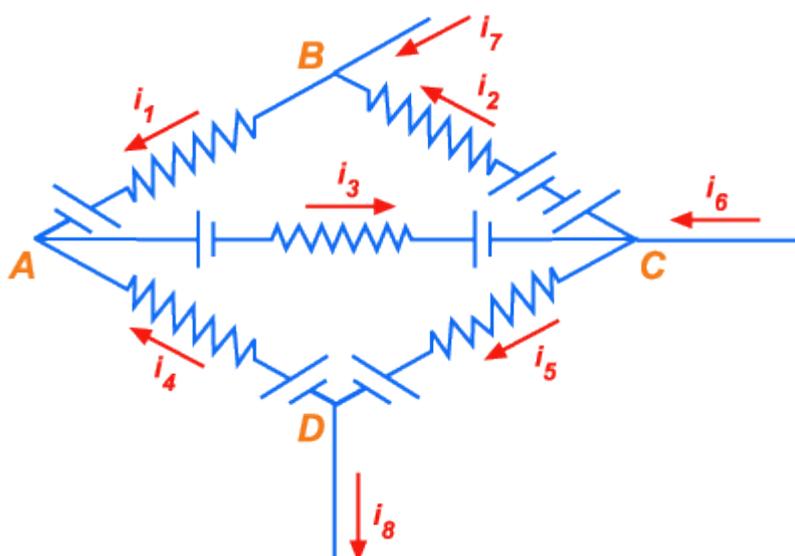


Figura 175

### 1ª Lei de Kirchhoff

Já sabemos que, pelo princípio da conservação da energia, a soma das intensidades das correntes que chegam a um nó deve ser igual à soma das intensidades das correntes que saem do nó.

Considerando o nó A, por exemplo, temos:

$$i_4 = i_1 + i_3$$

Se convencionarmos considerar positiva a corrente que chega ao nó e negativa a corrente que sai do nó, podemos escrever, para o nó A:

**Autor: Roberto A. Salmeron**

$$i_4 - i_1 - i_3 = 0$$

É nisso que consiste a primeira Lei de Kirchhoff que pode ser enunciada do seguinte modo: “a soma algébrica das intensidades das correntes relativas a um mesmo nó é nula”.

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

## 2ª Lei de Kirchhoff

No capítulo anterior já vimos que, quando entre dois pontos B e A há resistência total R, f.e.m. cuja soma algébrica é E, a diferença de potencial entre A e B é dada pela fórmula:

$$V_A - V_B = E_1 - RI$$

A segunda lei de Kirchhoff é relativa a uma malha. Consideremos, por exemplo, a malha ABC, e percorramos os lados dessa malha todos num mesmo sentido, aplicando a equação anterior sucessivamente a cada lado. Consideremos o sentido horário. Seja  $E_1$  a f.e.m. resultante em AB,  $R_1$  a resistência elétrica resultante em AB, e  $I_1$  a intensidade da corrente em AB;  $E_2, R_2$  e  $I_2$  os elementos correspondentes em BC;  $E_3, R_3$  e  $I_3$  os de AC.

Temos:

$$\text{para o lado AB : } V_A - V_B = E_1 - R_1 I_1$$

$$\text{para o lado BC : } V_B - V_C = E_2 - R_2 I_2$$

$$\text{para o lado CA : } V_C - V_A = E_3 - R_3 I_3$$

Somando membro a membro:

$$0 = E_1 + E_2 + E_3 - R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_3$$

$$E_1 + E_2 + E_3 = R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3$$

ou

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n R_k I_k$$

É a segunda lei de Kirchhoff: “percorrendo todos os lados de uma malha num mesmo sentido, a soma algébrica de todas as f.e.m. da malha é igual à soma dos produtos das resistências pelas intensidades de corrente”.

Da própria maneira de deduzirmos esta segunda lei de Kirchhoff, resultam os sinais seguintes.

### 1. Sinal dos produtos $R I$

Atribuímos arbitrariamente os sentidos das correntes  $i_1, i_2, i_3$ , etc. Depois atribuímos arbitrariamente o sentido de percurso da malha. No trecho em que o sentido atribuído à corrente coincide com o sentido de percurso da malha o produto  $R I$  é positivo. Caso contrário, o produto  $R I$  é negativo.

### 2. Sinal de $E$

Nos lados da malha em que o sentido de percurso coincide com o sentido atribuído à corrente, as f.e.m. são positivas e as f.c.e.m. são negativas. Caso contrário as f.e.m. passam a funcionar como f.c.e.m., e serão negativas; e as f.c.e.m. passam a funcionar como f.e.m. e serão positivas.

### Observação

As leis de Kirchhoff não podem ser aplicadas um número qualquer de vezes, porque senão encontramos uma série de equações que não serão independentes entre si. Para aplicação dessas leis é conveniente observar as seguintes regras:

1<sup>a</sup>) Começar aplicando a 1<sup>a</sup> lei. Quando há  $n$  nós, aplicamos a 1<sup>a</sup> lei  $n - 1$  vezes, e obtemos  $n - 1$  equações independentes entre si.

2<sup>a</sup>) Havendo  $a$  incógnitas, precisamos ter um total de  $a$  equações. Como já obtivemos  $n - 1$  equações aplicando a 1<sup>a</sup> lei, devemos aplicar a 2<sup>a</sup> lei  $a - (n - 1)$  vezes.

## 8: Nota Histórica

Gustav Rupert Kirchhoff, (1824 – 1861), foi um dos maiores físicos alemães de seu tempo. Realizou uma obra vastíssima. Viveu numa época em que a Física estava tendo desenvolvimento extraordinário em vários setores diferentes, pois na segunda metade do século passado a mecânica, elasticidade, teoria dos gases, eletricidade, magnetismo e termodinâmica tiveram grande impulso. Kirchhoff, que desde muito jovem esteve em contacto com físicos bastante experimentados, teve oportunidade de trabalhar em assuntos muito variados. Além de um número muito grande de trabalhos isolados, há três ramos da Física nos quais os trabalhos de Kirchhoff se tornaram fundamentais: ótica, termodinâmica e eletricidade. Em ótica, foi grande conhecedor de espectroscopia, tendo sido um dos fundadores da análise espectral. Em termodinâmica, foi o primeiro físico a estabelecer leis sobre a energia radiante. Em eletricidade estabeleceu as leis fundamentais das malhas elétricas, leis que estudamos neste último capítulo.