

# Sumário

---

5.6	Comandos elétricos . . . . .	305
5.6.1	Funções lógicas . . . . .	306
5.6.2	Formas de atuação dos contatos . . . . .	307
5.6.3	Diagramação de circuitos de comando . . . . .	310
5.7	Partida de motores elétricos . . . . .	310
5.7.1	Métodos de partida. . . . .	311
5.7.2	Tipos de partida: circuitos de comando e força . . . . .	312
5.8	Chaves de partida de motores tipo <i>soft-starter</i> . . . . .	317
5.8.1	Princípio de funcionamento . . . . .	318
5.8.2	Sequência de funcionamento do <i>soft-</i> <i>starter</i> . . . . .	320
5.8.3	Recursos de um <i>soft-starter</i> . . . . .	323
5.8.4	Instalação de <i>soft-starters</i> . . . . .	324
5.8.5	Limitações no uso de <i>soft-starters</i> . . . . .	325
5.9	Inversores de frequência . . . . .	325
5.9.1	Princípio de funcionamento . . . . .	326
5.9.2	Partes de um inversor de frequência . . . . .	326
5.9.3	Inversores escalar e vetorial. . . . .	330
5.9.4	Instalação do inversor. . . . .	330
5.9.5	Parametrização . . . . .	331
5.9.6	Dimensionamento. . . . .	333

**335 Apêndice A**

**347 Apêndice B**

**353 Referências bibliográficas**



# Capítulo I

## Eletromagnetismo

---

## 1.1 Breve histórico

Antigamente, a eletricidade e o magnetismo eram tratados de maneiras separadas, pois não havia se estabelecido relação entre essas duas áreas de conhecimento. As primeiras descobertas referentes aos fenômenos elétricos foram feitas na Grécia antiga, e, com algumas exceções, eram vistas como entretenimento, e não como ciência.

Os gregos observaram que, ao atritar o âmbar (resina fossilizada de árvores, amarelada e semitransparente) com outras substâncias, como a lã, manifestava-se entre esses corpos forças de atração e de repulsão.

As informações históricas sobre o magnetismo indicam que os primeiros ímãs foram encontrados na Ásia, em um distrito da Grécia antiga chamado Magnésia, daí o termo “magnetismo”. Com base nessas primeiras observações, diversos estudiosos e cientistas passaram a propor teorias para explicar os fenômenos elétricos e magnéticos.

No início do século XIX, constatou-se que os fenômenos magnéticos são causados por cargas elétricas em movimento, e, com isso, surgiu mais uma área de estudo, denominada eletromagnetismo.

### 1.1.1 Propriedades magnéticas

No século XIII, o monge francês Petrus Peregrinus fez observações muito importantes a respeito dos fenômenos magnéticos:

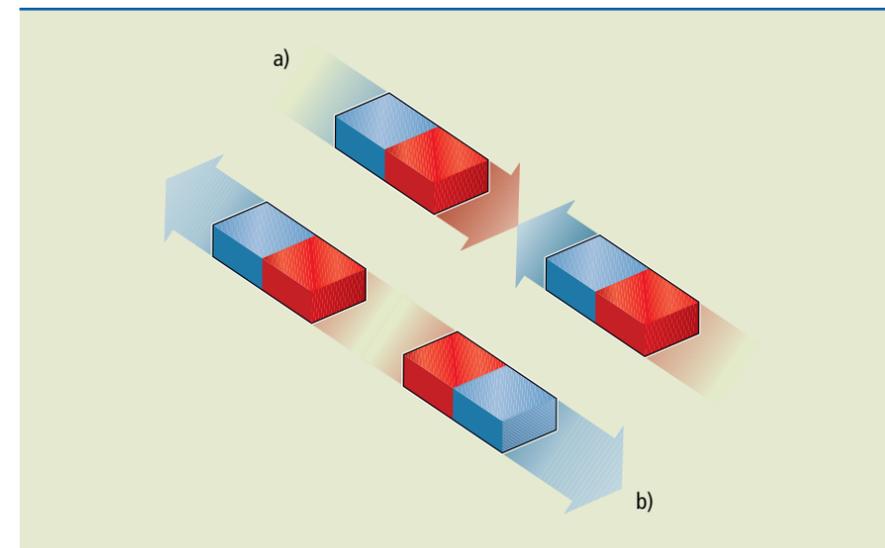
- Ao aproximar pregos de ferro de um ímã, eles são fortemente atraídos pelas extremidades do ímã (figura 1.1).

**Figura 1.1**  
Ímã natural.



PHOTORESEARCHERS/PHOTORESEARCHERS/LATINSTOCK

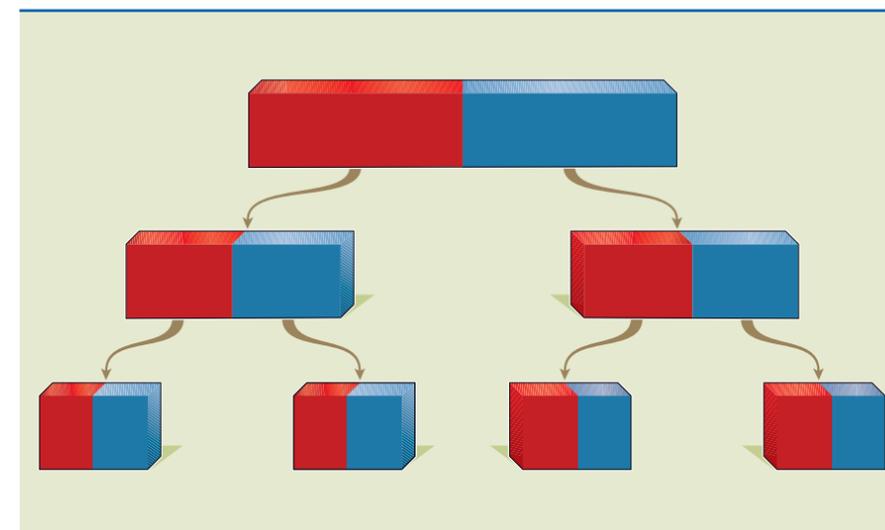
- Essas extremidades, conhecidas como polos do ímã, apresentam características contrárias, pois, aproximando dois ímãs distintos, percebe-se ora uma manifestação de força de atração, ora uma de repulsão (figura 1.2).



**Figura 1.2**

Ímãs: (a) força de atração e (b) força de repulsão.

- Ainda que um mesmo ímã seja dividido várias vezes, não é possível separar essas extremidades (figura 1.3).



**Figura 1.3**

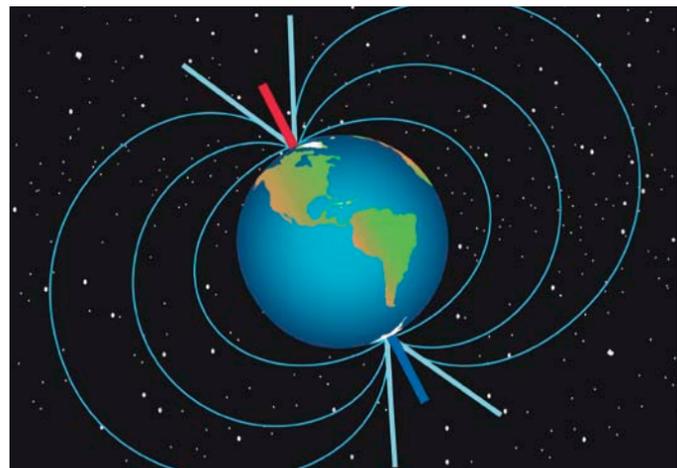
Inseparabilidade dos polos.

Tais observações foram documentadas e posteriormente observadas no século XVII pelo médico inglês William Gilbert, que realizava experiências nesse campo. Uma das inúmeras contribuições de Gilbert para os estudos do magnetismo foi a descoberta de que a temperatura influencia a magnetização dos ímãs. Ele também escreveu o livro *De magnete*, apresentando suas teorias sobre corpos magnéticos e atrações elétricas. Entre as informações encontradas nessa obra destaca-se uma de grande importância, comprovada cientificamente: o planeta Terra se comporta como um gigantesco ímã (figura 1.4).



**Figura 1.4**

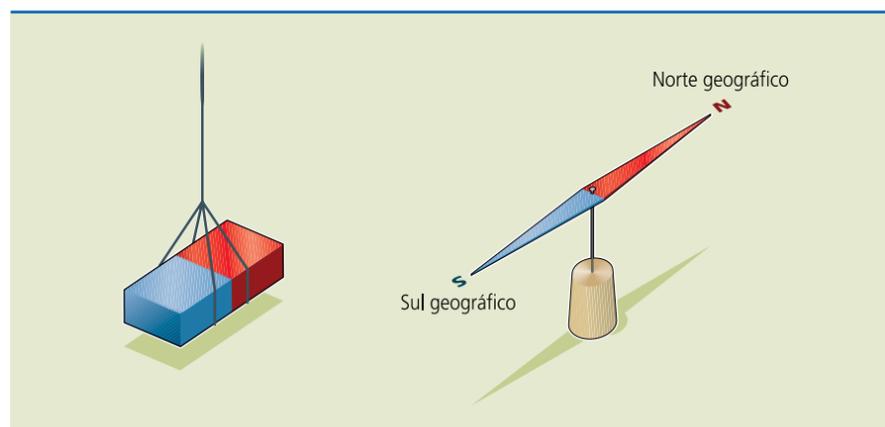
A Terra é um grande ímã.



Tal descoberta finalmente explicava um fato observado pelos chineses no século I a.C.: por que um ímã em forma de barra, suspenso pelo centro e livre de giro, sempre se orienta na direção norte-sul da Terra (figura 1.5)?

**Figura 1.5**

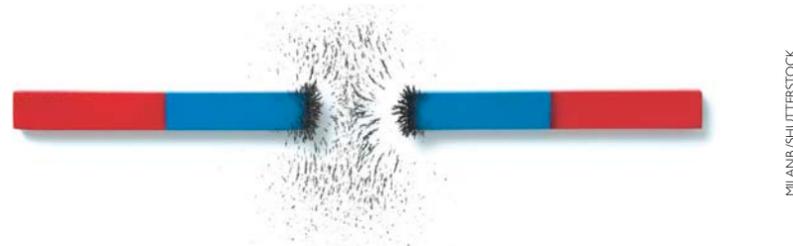
Princípio da bússola magnética.



Levando em conta que a Terra é um grande ímã, ela atrai a extremidade que aponta para o norte; o mesmo acontece com a outra extremidade, que aponta para o sul. Assim, convencionou-se chamar a extremidade do ímã que aponta para o norte geográfico da Terra de polo norte, e a outra, de polo sul (figura 1.6).

**Figura 1.6**

Ímãs em forma de barra.



Portanto, conclui-se que as propriedades magnéticas são:

- Todos os ímãs possuem a capacidade de atrair o ferro.
- Polos opostos se atraem; polos iguais se repelem.
- Os polos de um ímã são inseparáveis.
- Altas temperaturas podem anular o magnetismo.
- Todos os ímãs, quando suspensos e livres de giro, orientam-se na direção norte-sul.

Antes de estudarmos os fenômenos magnéticos relacionados à corrente elétrica, vamos relembrar alguns conceitos e fenômenos elétricos.

### 1.1.2 Carga elétrica

As primeiras descobertas referentes a fenômenos elétricos são atribuídas aos antigos gregos. O filósofo Tales de Mileto observou que um pedaço de âmbar, depois de atritado com pele de carneiro, adquiria a propriedade de atrair corpos leves (palhas e pequenas sementes secas).

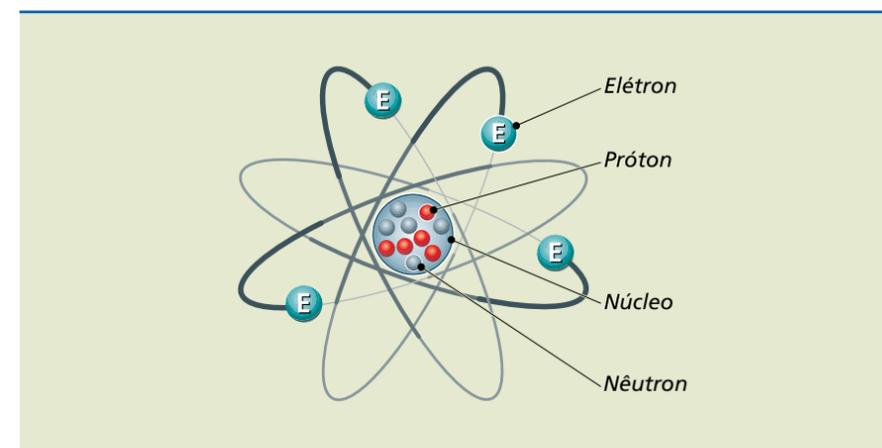
William Gilbert também estudou fenômenos de atração entre corpos diferentes do âmbar. Como a palavra grega correspondente a âmbar é *elektron*, ele passou a utilizar o termo “eletrizado” em situações nas quais os corpos eram atraídos depois de atritados. Isso pode ser comprovado com o simples experimento de atritar um pente ou uma régua plástica em uma flanela seca e atrair pequenos pedaços de papel ou fios de cabelo.

Como sabemos, os corpos são constituídos de átomos e estes possuem partículas subatômicas. No núcleo do átomo estão os nêutrons, de carga elétrica nula, e os prótons, de carga elétrica positiva; na eletrosfera localizam-se os elétrons, de carga elétrica negativa (figura 1.7). Portanto, a explicação para esses fenômenos de eletrização é a transferência de elétrons entre os corpos atritados.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de medida da carga elétrica é o coulomb (C), em homenagem ao físico francês Charles Augustin de Coulomb.

**Figura 1.7**

Átomo.



Os elétrons foram identificados pelo físico britânico John Joseph Thompson em 1897, enquanto estudava descargas elétricas emitidas por um tubo de raios catódicos. A descoberta dos prótons se deu em 1911, quando o cientista inglês Ernest Rutherford percebeu que as descargas elétricas que ocorriam dentro de um tubo, criado pelo físico alemão Eugene Goldstein, em 1886, contendo hidrogênio possuíam a menor carga elétrica positiva então conhecida. Embora a massa do próton ( $1,6 \cdot 10^{-27}$  kg) seja maior que a do elétron ( $9,10 \cdot 10^{-31}$  kg), ambos possuem a mesma carga elétrica. Assim, todo átomo que possui a mesma quantidade de prótons e de elétrons é considerado neutro.

Finalmente, os nêutrons, que não possuem carga elétrica, foram descobertos em 1932 pelo físico britânico James Chadwick. Essas partículas são importantes para manter a estabilidade dos núcleos atômicos.

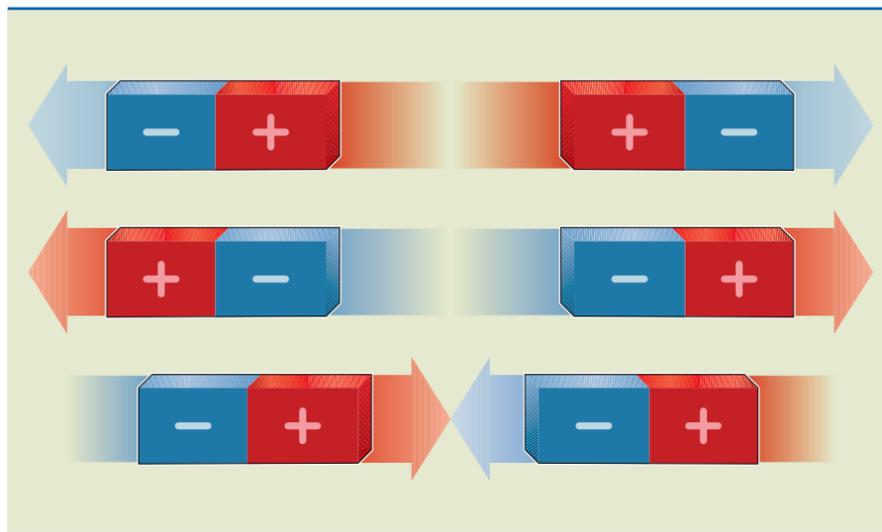
Os corpos são eletrizados quando sofrem perda ou ganho de elétrons: os que perderam elétrons adquirem carga elétrica positiva (uma vez que o número de prótons é maior), e os que ganharam elétrons, carga elétrica negativa.

A eletrostática então se fundamenta basicamente em dois princípios:

- **Princípio da atração e da repulsão** – Cargas de natureza elétrica oposta (sinais opostos) se atraem, enquanto cargas de mesma natureza elétrica (mesmo sinal) se repelem (figura 1.8).

Figura 1.8

Atração e repulsão eletrostática.



- **Princípio da conservação das cargas elétricas** – Se um sistema elétrico não trocar cargas elétricas com um meio exterior, a soma algébrica das cargas positivas e negativas desse meio elétrico é sempre constante.

É importante ressaltar que não se associam os termos “positivo” e “negativo” aos polos magnéticos dos ímãs, uma vez que as cargas elétricas positivas e negativas se manifestam separadamente, do mesmo modo que não existe um ímã sem dois polos magnéticos.

### 1.1.3 Campo elétrico

Para compreendermos o que é campo elétrico, vamos imaginar a seguinte situação: uma carga  $Q$  está fixa em determinada posição e sucessivamente tentamos aproximar em diferentes pontos uma carga  $q$ . Nessas tentativas, observamos que há uma força atuando em  $q$  exercida por  $Q$ . Podemos admitir, então, que uma **carga elétrica puntiforme** altera a região que a envolve, fazendo com que, ao aproximarmos outra carga elétrica em um ponto dessa região, colocada a uma distância  $d$  da primeira carga, manifesta-se uma força de natureza elétrica.

Corpo eletrizado cujas dimensões são desprezíveis em relação à distância que o separa de outro corpo eletrizado.

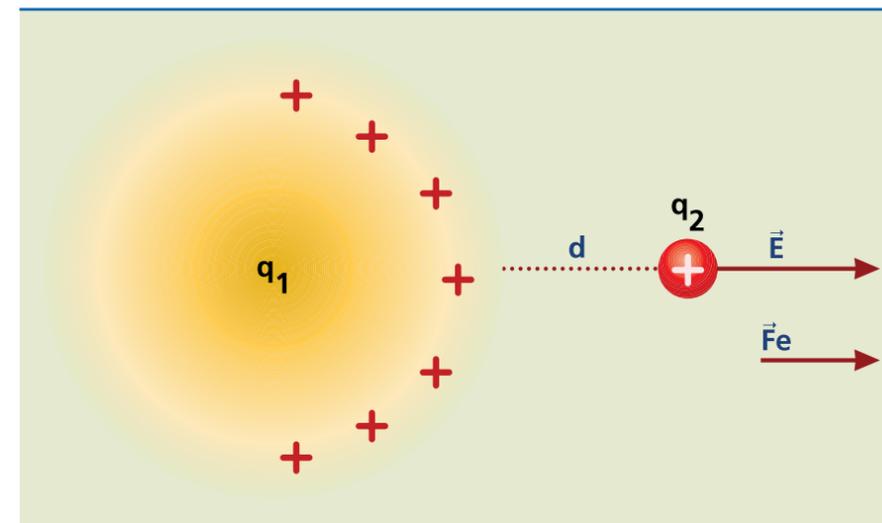


Figura 1.9

Força e campo elétricos.

Na figura 1.9, as cargas  $q_1$  e  $q_2$  estão à distância de  $d$  entre si. O campo elétrico está representado por  $\vec{E}$  e a força elétrica, por  $\vec{F}_e$ . A expressão que determina a identidade da carga elétrica é:

$$q = n \cdot e \quad (1.1)$$

em que:

- $q$  é a carga elétrica, medida em coulomb (C);
- $n$ , o número de elétrons em excesso ou em falta de um corpo eletrizado;
- $e$ , a carga elementar de um elétron.

Retomando a figura 1.9, podemos notar que entre as duas cargas puntiformes existe uma força de atração ou de repulsão eletrostática que depende dos sinais das cargas. Charles Coulomb, utilizando um dispositivo chamado balança de torção, realizou experimentos que comprovaram que essa força é inversamente proporcional à distância  $d$  e diretamente proporcional ao produto do valor de suas cargas. Além disso, constatou que o meio em que os experimentos são realizados influencia o valor do resultado. Essas observações ficaram conhecidas como lei de Coulomb, cuja expressão é:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2} \quad (1.2)$$



em que:

- $F_e$  é a força elétrica, medida em newton (N);
- $k_0$ , a constante eletrostática do vácuo ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ );
- $q_1$  e  $q_2$ , as cargas elétricas, medidas em coulomb (C);
- $d$ , a distância entre as cargas, medida em metro (m).

Se fixarmos a carga  $q_1$  em determinada posição e deslocarmos  $q_2$  ao redor dela, manifesta-se novamente uma força elétrica, qualquer que seja a distância do ponto em relação à  $q_1$ , ou seja, ao redor de uma carga elétrica ocorrem interações elétricas, como a força  $\vec{F}$ . Essa região do espaço ao redor da carga elétrica é denominada campo elétrico, dada pela expressão:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.3)$$

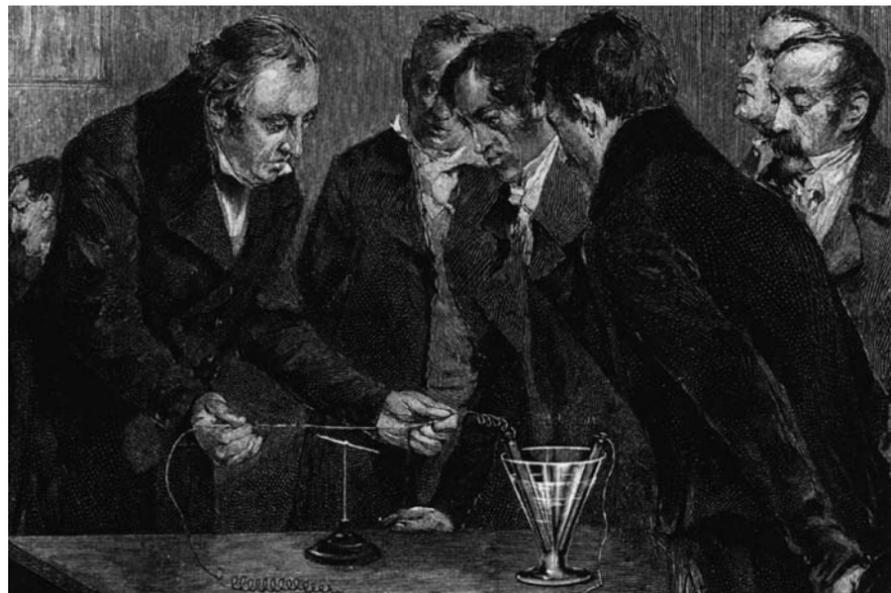
em que  $\vec{E}$  é o campo elétrico medido em newton por coulomb (N/C).

## 1.2 A relação entre eletricidade e magnetismo

Em 1820, o professor dinamarquês Hans Christian Ørsted realizou uma experiência – conhecida, mais tarde, como experiência de Ørsted – em que demonstrou pela primeira vez a relação entre eletricidade e magnetismo (figura 1.10).

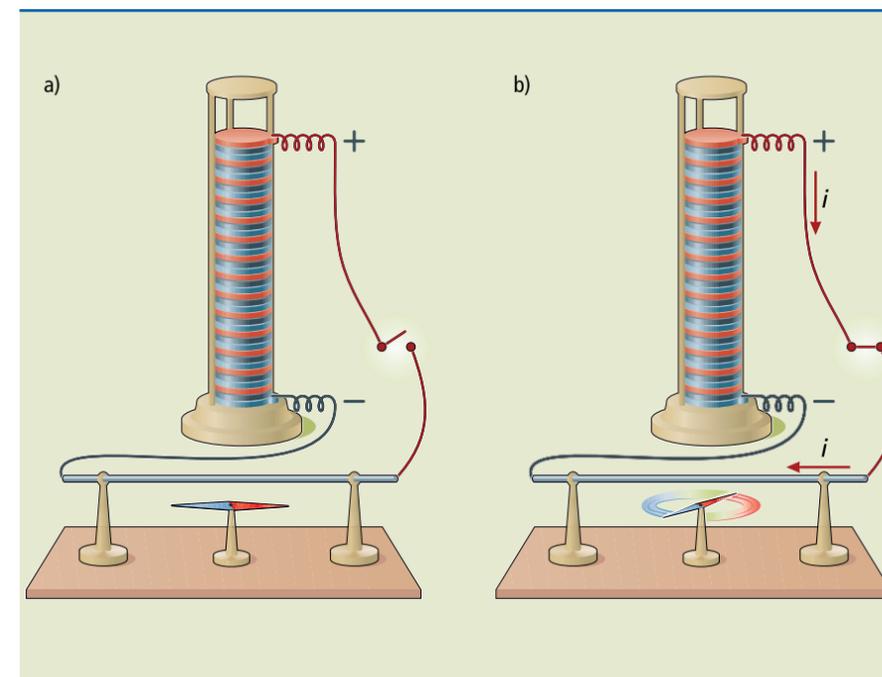
**Figura 1.10**

Ørsted realizando a experiência em que foi descoberta a relação entre eletricidade e magnetismo.



A experiência consistia em colocar uma agulha imantada paralela a um fio que seria percorrido por uma corrente elétrica. Ørsted observou que, ao fechar a chave do circuito, o fio era percorrido por uma corrente elétrica e, nesse momento, a agulha imantada desviava sua orientação norte-sul (figura 1.11), fenômeno já observado quando se aproximava um ímã de uma agulha imantada.

Ao abrir a chave, o fluxo de corrente cessava e a agulha voltava a sua posição normal. Com isso, descobriu-se a relação entre eletricidade e magnetismo.

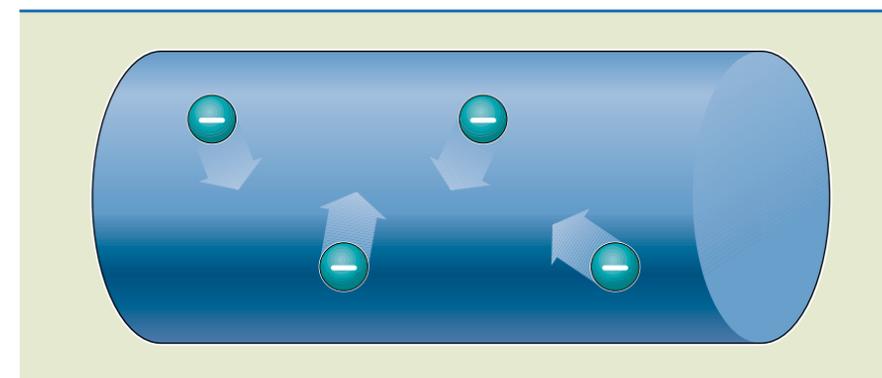


**Figura 1.11**

(a) Circuito elétrico que pode demonstrar a experiência de Ørsted; (b) Após a ligação da bateria fechando o circuito, a passagem de corrente provoca a deflexão da bússola.

No século XVIII, o cientista norte-americano Benjamin Franklin havia tentado explicar os fenômenos elétricos de atração e repulsão. Em sua teoria, admitia que todos os corpos possuíam uma espécie de “fluido elétrico”, responsável por tais fenômenos. Ao serem atritados, alguns corpos perdiam esse fluido (corpos negativos), outros o recebiam (corpos positivos). Sem o atrito, esses corpos permaneciam em seu estado neutro com número igual de fluidos negativos e positivos. De acordo com essas ideias, por se tratar de transferência de eletricidade de um corpo para outro, não haveria nem criação nem destruição de cargas elétricas, permanecendo constante a quantidade total de fluido elétrico.

Atualmente, sabemos que o processo de separação de cargas elétricas ocorre por transferência de elétrons sem que o número de elétrons e prótons se altere e que a corrente elétrica em um fio está associada ao movimento de elétrons livres.



**Figura 1.12**

Elétrons em movimento desordenado em um condutor metálico.



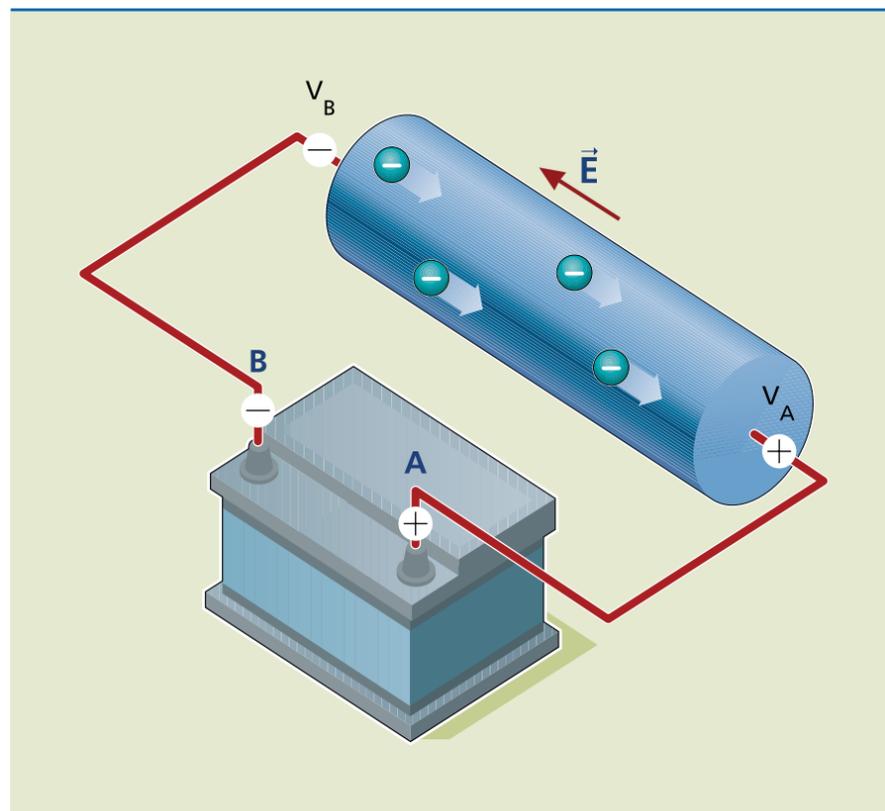
Analisando a figura 1.12, podemos notar que os elétrons livres estão em movimento desordenado, não produzindo efeito externo algum. Esse condutor está em equilíbrio eletrostático, apresentando as seguintes características:

- O campo elétrico resultante em seus pontos internos é nulo.
- O potencial elétrico em todos os seus pontos internos e superficiais é constante.
- Os elétrons livres distribuem-se em sua superfície externa.

Se as extremidades do condutor são ligadas a uma bateria, passa a existir em seu interior um campo elétrico com sentido do polo positivo para o negativo, como mostra a figura 1.13.

**Figura 1.13**

Elétrons em movimento ordenado em um condutor metálico e manifestação da corrente elétrica.



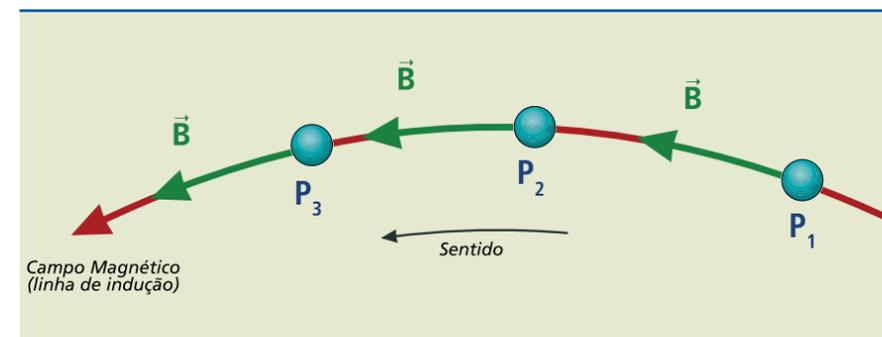
Com o surgimento desse campo elétrico no interior do condutor, os elétrons livres ficam submetidos a uma força elétrica – cujo sentido é contrário ao do campo elétrico, pois a carga dos elétrons é negativa –, o que altera seu deslocamento: eles se movem com direção e sentido iguais aos da força elétrica. Esse movimento ordenado é denominado corrente elétrica, medida em ampere (A).

Então, é correto dizer que a corrente elétrica possui magnetismo?

Sabemos que uma carga elétrica imóvel no espaço origina um campo elétrico. Quando essa carga elétrica passa a se mover, surge a seu redor uma região com propriedades magnéticas, chamada campo magnético.

## 1.2.1 Campo magnético dos ímãs

A experiência de Öersted comprovou que ao redor de um condutor energizado surge um campo elétrico e que a cada ponto de um campo elétrico pode-se associar um vetor campo elétrico  $\vec{E}$ . Para os ímãs, vale o mesmo princípio: a cada ponto de um campo magnético associa-se um vetor campo magnético  $\vec{B}$ , também conhecido como vetor indução magnética (figura 1.14). No Sistema Internacional de Unidades, o vetor  $\vec{B}$  é medido em tesla (T).

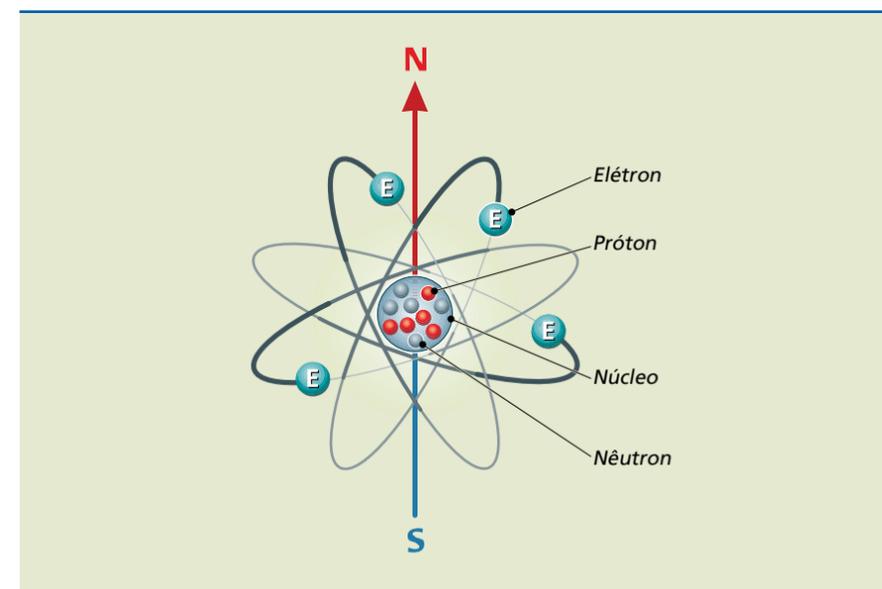


**Figura 1.14**

Linha de indução.

O campo magnético nos condutores energizados surge devido ao movimento ordenado dos elétrons livres. Mas, nos ímãs, como surge o campo magnético se não há movimento ordenado dos elétrons livres?

A explicação para o campo magnético dos ímãs também é atribuída às cargas elétricas (os elétrons) que se movem ao redor do núcleo dos átomos, formando o chamado dipolo magnético (figura 1.15).



**Figura 1.15**

Dipolo magnético.

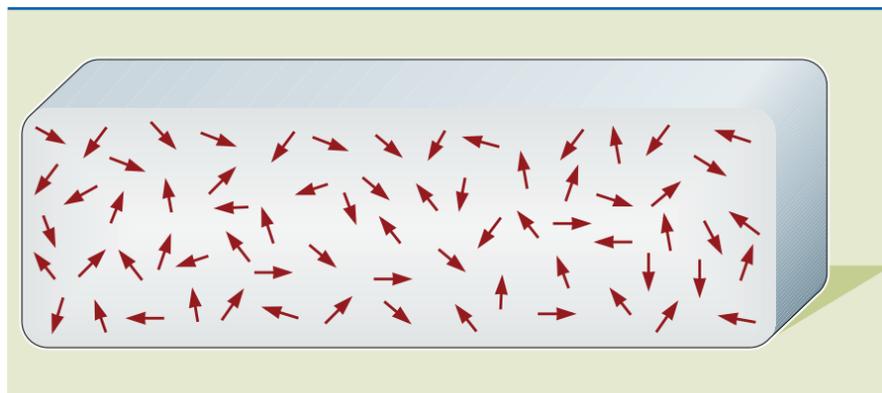
A matéria formada por inúmeros conjuntos de dipolos magnéticos é denominada domínios magnéticos, que funcionam como minúsculos ímãs. Em um material qualquer, os domínios magnéticos estão desorientados, não havendo, por



isso, um campo magnético resultante (figura 1.16), ou mais corretamente, o campo magnético resultante, nesse caso, é nulo.

**Figura 1.16**

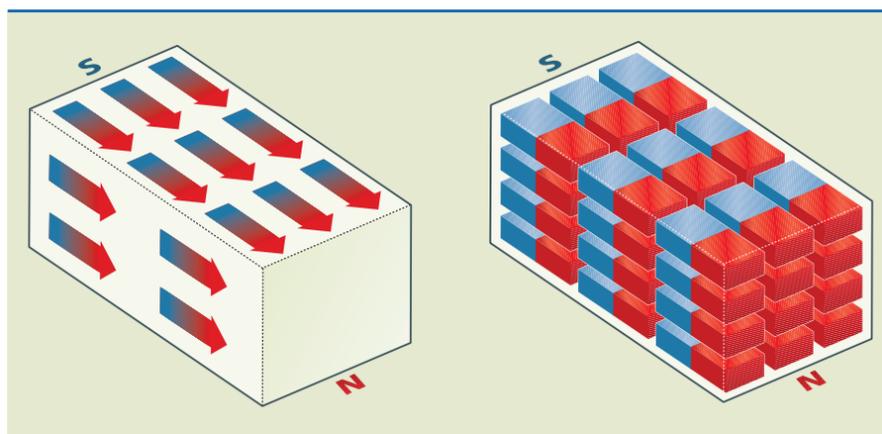
Aspecto dos dipolos na maioria dos materiais.



No caso dos ímãs, todos os domínios magnéticos estão orientados na mesma direção (figura 1.17).

**Figura 1.17**

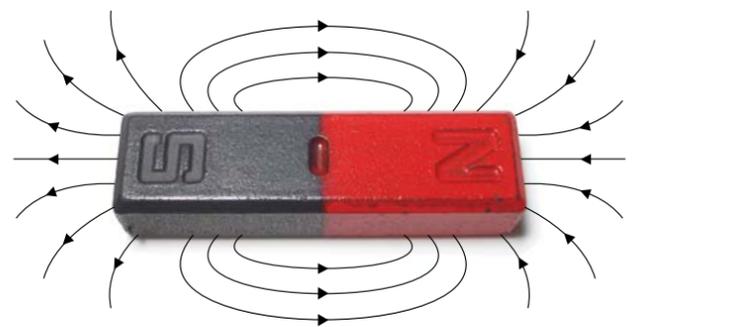
Alinhamento dos domínios magnéticos em um ímã.



A figura 1.18 mostra a representação do campo magnético de um ímã em forma de barra, resultante da orientação dos dipolos. As linhas que indicam o campo magnético são chamadas de linhas de indução, e convencionou-se que elas “saem” do polo norte e “chegam” ao polo sul.

**Figura 1.18**

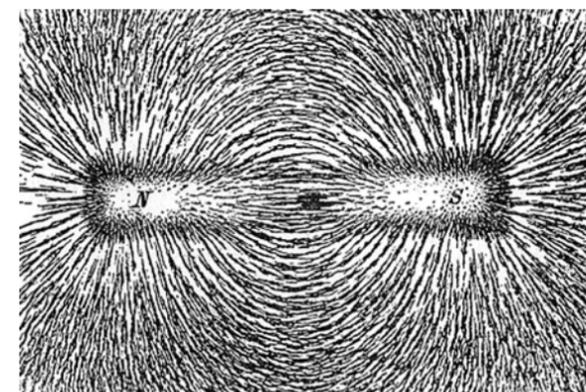
Linhas de indução em um ímã em forma de barra.



É possível visualizar o campo magnético (linhas de indução) de um ímã fazendo uma montagem simples (figura 1.19): posiciona-se um ímã em forma de barra embaixo de um vidro e espalham-se limalhas de ferro na superfície do vidro.

**Figura 1.19**

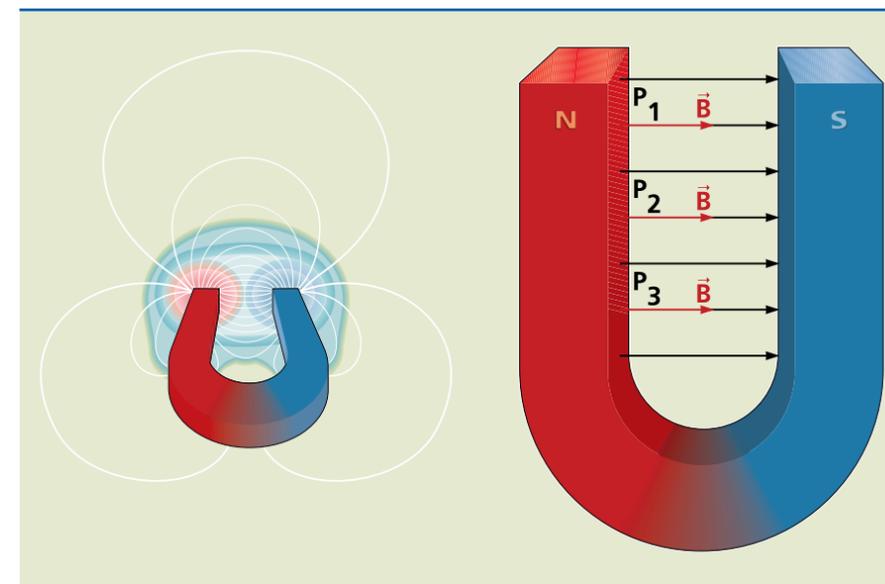
Visualização das linhas de indução em um ímã em forma de barra.



Existem outros modelos de ímãs, além do formato em barra. Um deles é o ímã em forma de ferradura (U), no qual o campo magnético é uniforme em todos os pontos (exemplificados, na figura 1.20, por P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>), ou seja, seu valor e orientação não se alteram.

**Figura 1.20**

Representação do campo magnético uniforme em um ímã em forma de ferradura (U).



### 1.2.2 Campo magnético da Terra

Atualmente, a teoria elaborada em 1939 pelo físico germano-norte-americano Walter Maurice Elsasser é a mais aceita para explicar o campo magnético terrestre (figura 1.21).

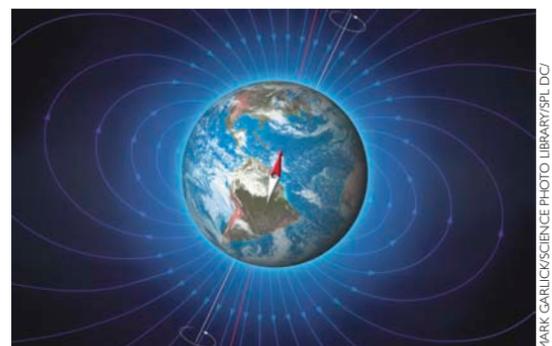
Segundo essa teoria, no núcleo da Terra existem metais liquefeitos, que, quando superaquecidos, perdem elétrons, tornando-se, então, cargas elétricas. Esse fluxo



de elétrons associado à rotação do planeta resulta em um movimento ordenado de cargas elétricas. Com isso, manifesta-se um campo magnético que se espalha ao redor da Terra (figura 1.22).

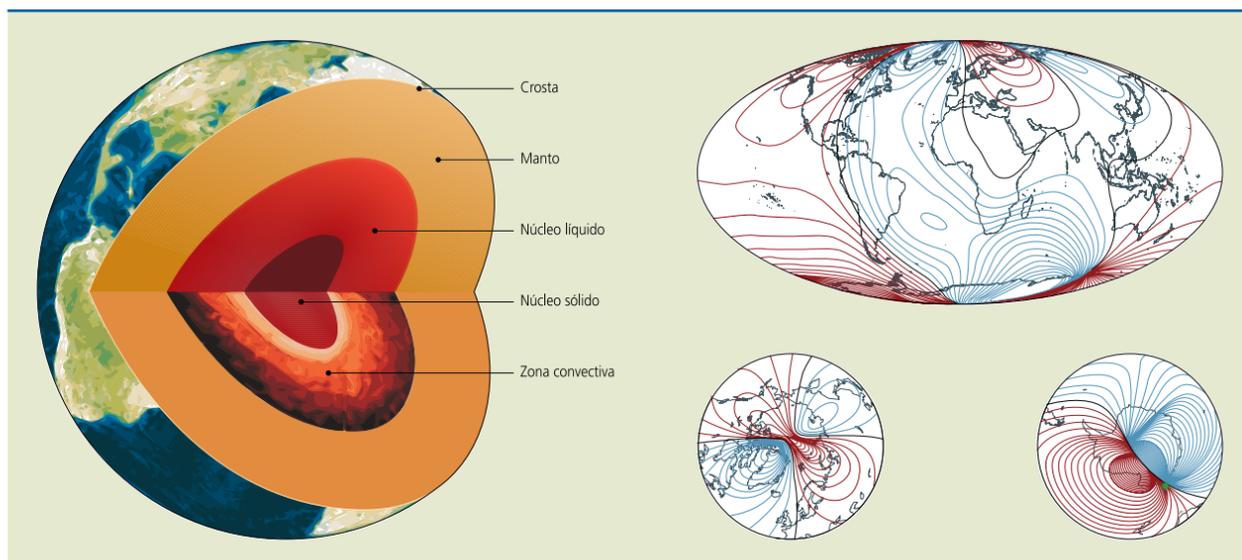
**Figura 1.21**

Campo magnético terrestre: linhas de indução a partir dos polos.



**Figura 1.22**

Geração do campo magnético terrestre.



Uma constatação visível a olho nu da existência do campo magnético terrestre é a aurora polar (figura 1.23).

**Figura 1.23**

Aurora polar:



A aurora polar é um efeito luminoso que ocorre nas regiões próximas aos polos, resultante do choque das partículas eletrizadas provenientes das explosões solares com as moléculas de ar da atmosfera (figura 1.24).

**Figura 1.24**

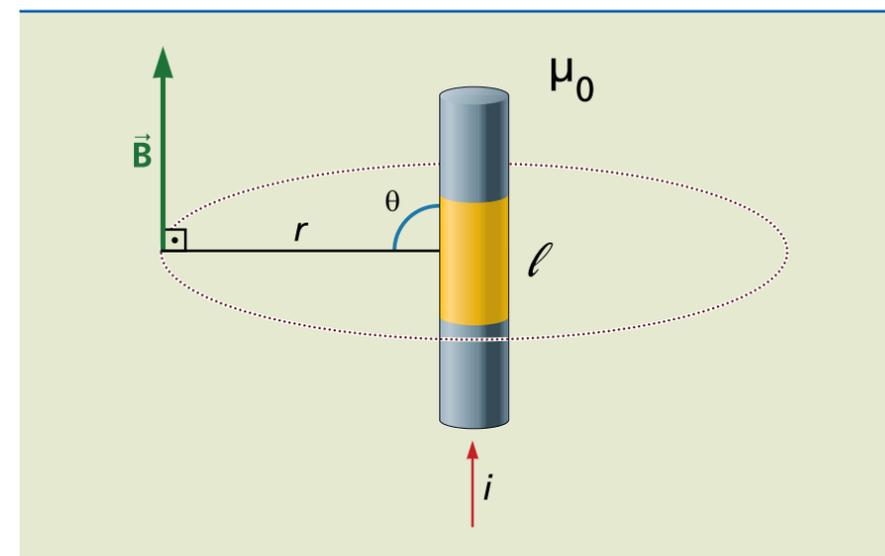
Aurora polar vista do espaço.



### 1.2.3 Vetor indução magnética

Para entendermos o que é vetor indução magnética  $\vec{B}$ , vamos analisar a lei de Biot-Savart.

Proposta pelos físicos franceses Jean-Baptiste Biot e Félix Savart depois de analisarem os resultados dos experimentos de Ørsted, essa lei, representada na figura 1.25, estabelece que, em um condutor energizado, o vetor indução magnética  $\vec{B}$  possui direção perpendicular ao plano em que se encontra. A intensidade do vetor  $\vec{B}$  é diretamente proporcional à corrente elétrica  $i$ , ao comprimento do condutor ( $\ell \cdot \text{sen}\theta$ ) e à constante de proporcionalidade magnética no vácuo  $\mu_0$ , e inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$ .



**Figura 1.25**

Lei de Biot-Savart.



A expressão que determina a intensidade do vetor de indução magnética é:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot \ell \cdot \text{sen}\theta}{4\pi r^2} \quad (1.4)$$

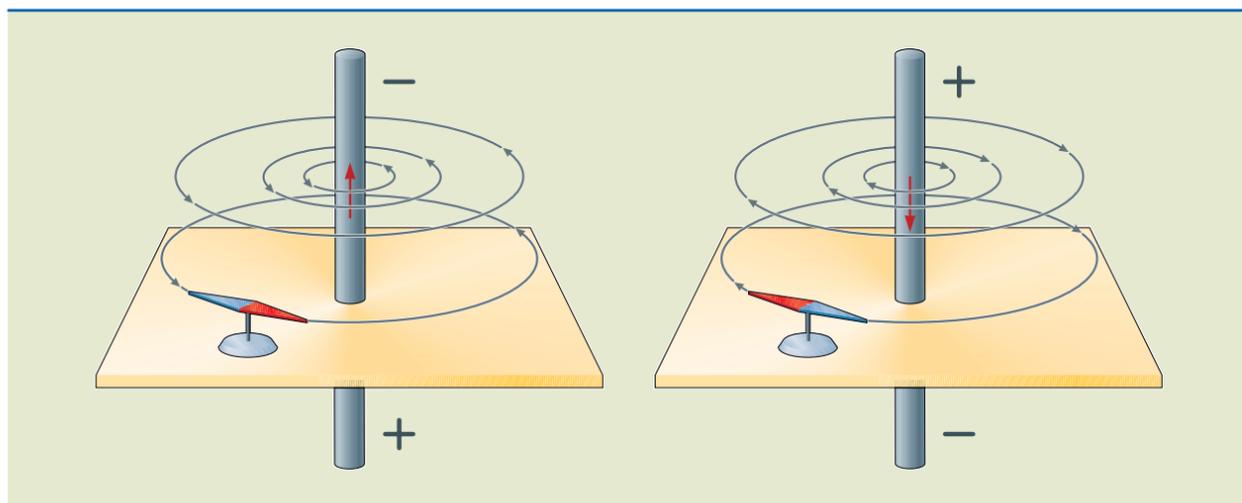
Calcula-se  $\mu_0$  por:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$$

**Figura 1.26**

Sentido do campo magnético depende da corrente elétrica.

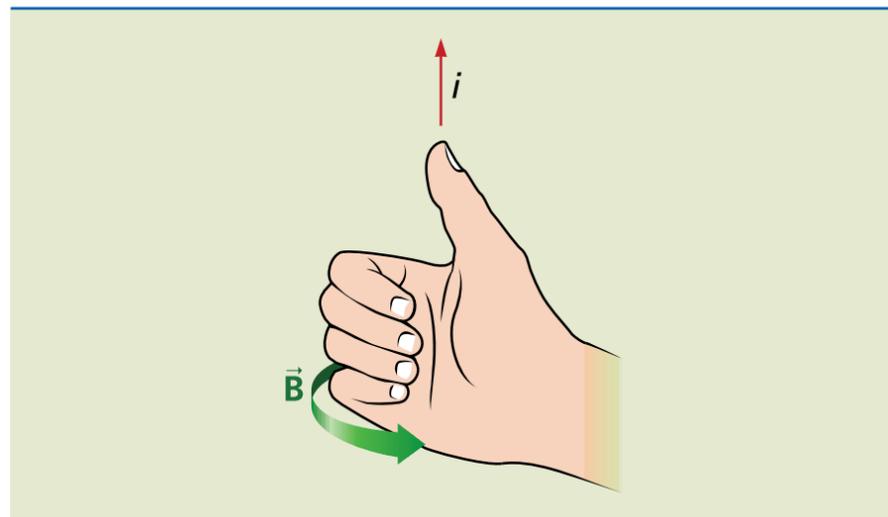
Como mostra a figura 1.26, quando o condutor é percorrido por uma corrente elétrica surgem ao redor dele campos magnéticos perpendiculares ao plano do condutor, representados por circunferências concêntricas. O sentido do campo magnético depende do sentido da corrente elétrica.



Existe um procedimento simples para determinar o sentido do vetor indução magnética, conhecido como regra da mão direita (figura 1.27).

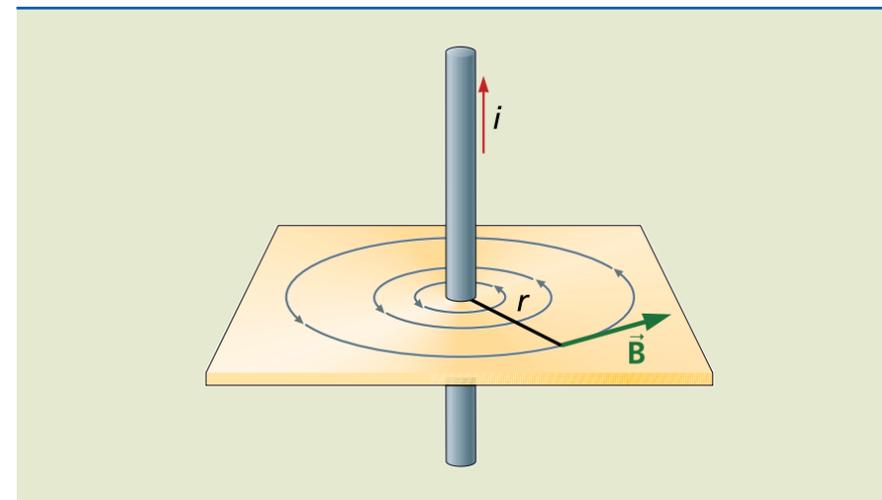
**Figura 1.27**

Regra da mão direita.



### 1.2.4 Campo magnético de um condutor retilíneo

É possível visualizar as linhas de indução ao redor de um fio condutor espalhando limalhas de ferro sobre uma folha de papel perpendicular ao fio, conforme representa a figura 1.28.



**Figura 1.28**

Campo magnético da corrente elétrica percorrendo um condutor retilíneo.

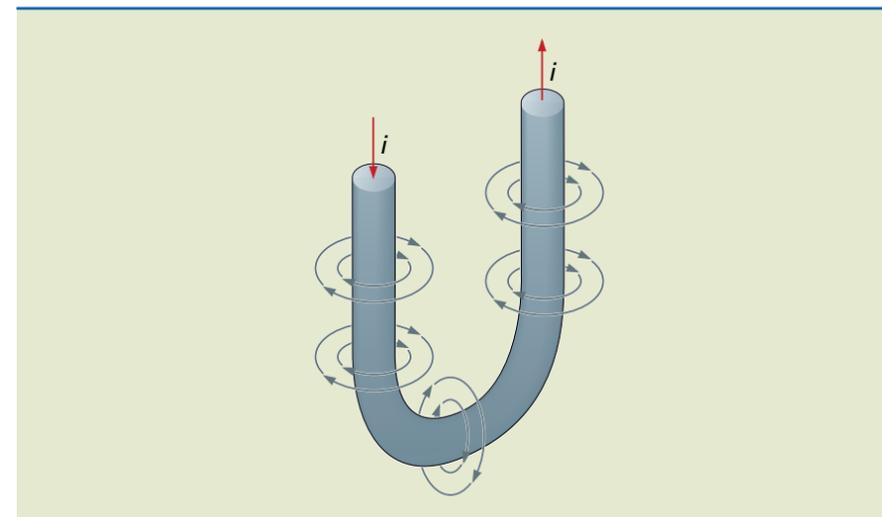
A intensidade é determinada por:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi \cdot r} \quad (1.5)$$

em que  $r$  é a distância, em metro (m), entre o fio e o ponto em que se deseja determinar  $B$ .

### 1.2.5 Campo magnético de uma espira circular

Quando torcemos um fio percorrido por corrente elétrica para produzir uma espira circular, a intensidade de seu campo magnético aumenta (figura 1.29).



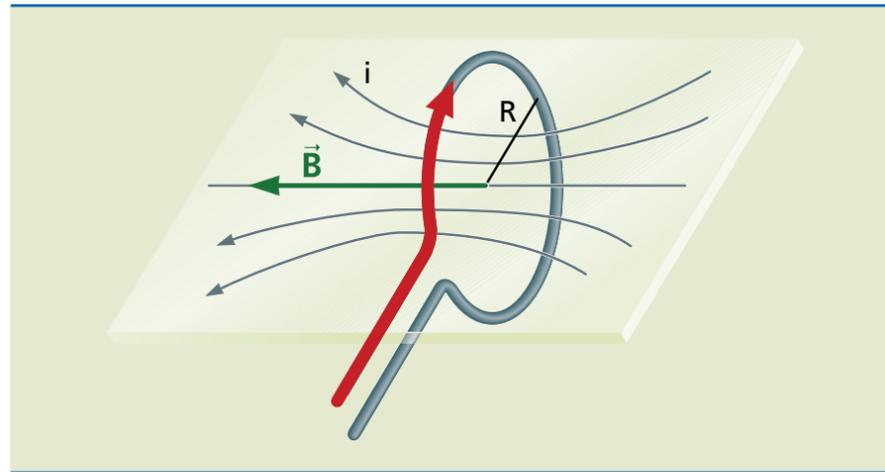
**Figura 1.29**

Aumento da intensidade do campo magnético.



É possível visualizar as linhas de indução ao redor de uma espira circular espalhando limalhas de ferro sobre uma folha de papel perpendicular à espira, conforme representa a figura 1.30. O campo magnético da corrente elétrica percorrendo a espira circular é perpendicular ao plano da espira.

**Figura 1.30**  
Campo magnético da corrente elétrica percorrendo uma espira circular:



A intensidade é determinada por:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2R} \quad (1.6)$$

em que R é o raio da espira, em metro (m).

Caso a espira possua N voltas (bobina chata):

$$B = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i}{2R} \quad (1.7)$$

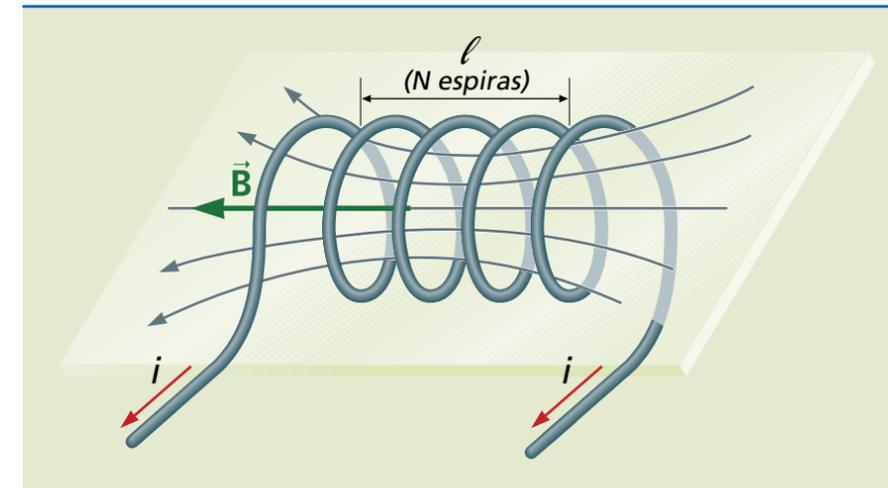
### 1.2.6 Campo magnético de um solenoide

A principal característica que difere um solenoide de uma bobina é seu formato longo, semelhante a um tubo. Um solenoide é, portanto, uma bobina de N espiras enroladas sucessivamente, adquirindo formato mais longo (figura 1.31). O campo magnético no interior do solenoide é uniforme e tem a direção do eixo geométrico.

A intensidade é determinada por:

$$B = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i}{\ell} \quad (1.8)$$

em que N é o número de espiras e  $\ell$  o comprimento do solenoide, em metro (m).



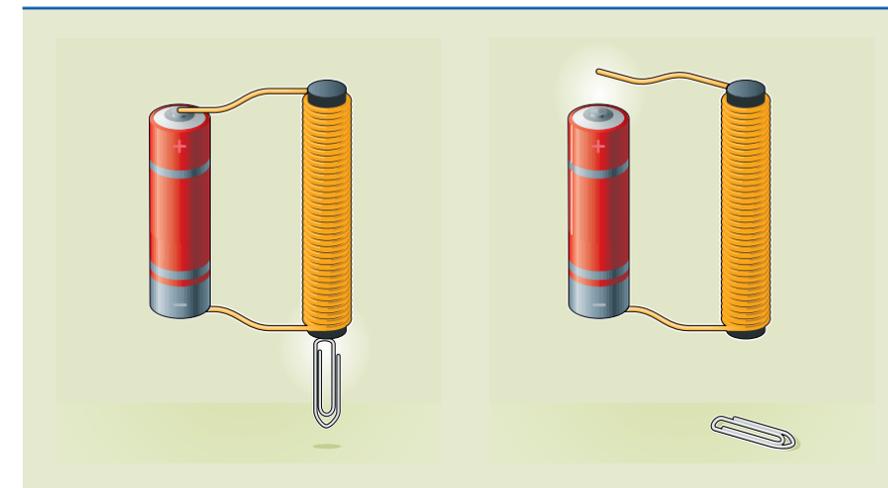
**Figura 1.31**  
Campo magnético da corrente elétrica percorrendo um solenoide.

### 1.2.7 Aplicações práticas do campo magnético

Entre as principais aplicações do campo magnético estão o eletroímã, a ressonância magnética e o detector de metais.

#### Eletroímã

É uma bobina percorrida por corrente elétrica que tem o campo magnético intensificado por um corpo magnetizável, denominado núcleo. O princípio do eletroímã está presente em muitos dispositivos elétricos, como campainhas, relés e contactores (figura 1.32).



**Figura 1.32**  
Eletroímã.

#### Ressonância magnética

Por muito tempo a única maneira de observar partes internas do corpo humano (órgãos, músculos, ossos) e diagnosticar doenças era por meio dos raios X (mesmo em uma tomografia computadorizada). O surgimento da técnica da ressonância magnética passou a permitir a obtenção de excelente nível de qualidade



de imagens em corte do corpo humano, além de não expor a pessoa aos raios X, que em valores elevados são prejudiciais.

Durante o exame de ressonância magnética, o paciente deita em uma mesa que se movimenta horizontalmente no interior de um gigantesco eletroímã circular. Essa bobina circular aplica um campo magnético que provoca o alinhamento dos dipolos magnéticos do núcleo de certos átomos do corpo humano (figura 1.33).

**Figura 1.33**

Bobinas de ressonância magnética.



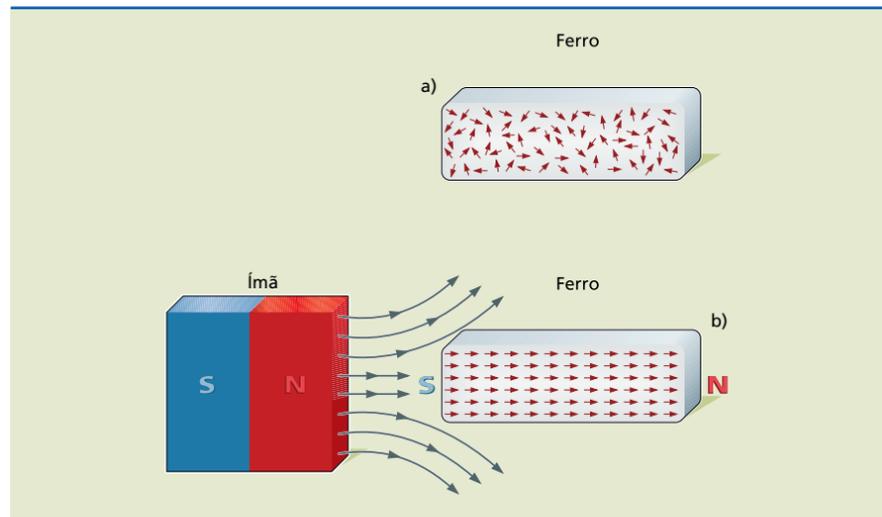
Após o alinhamento, ondas de rádio são aplicadas na região a ser examinada. Quando a frequência dessas ondas coincide com a frequência natural dos núcleos atômicos, estes absorvem energia. Ao removerem o sinal de rádio, os núcleos emitem essa energia na forma de sinais, que são detectados, amplificados, digitalizados e usados para produzir uma imagem em corte.

#### Detector de metais

O funcionamento do detector de metais baseia-se no seguinte princípio: quando se aproxima um ímã de uma barra de ferro, o campo magnético força a orientação de seus dipolos, transformando-a em ímã (figura 1.34).

**Figura 1.34**

Processo de magnetização:  
(a) ferro com dipolos desalinhados e  
(b) com dipolos alinhados devido à ação do eletroímã.



Dessa maneira, o detector gera um campo magnético, como em um ímã, que, ao se aproximar de um metal, provoca o movimento dos elétrons deste, fazendo com que eles se orientem, formando outro campo magnético. Essa variação entre os campos magnéticos é detectada pelo instrumento.

Os detectores podem ser portáteis ou fixos, como aqueles instalados em aeroportos (figura 1.35).

**Figura 1.35**

Detectores de metais.

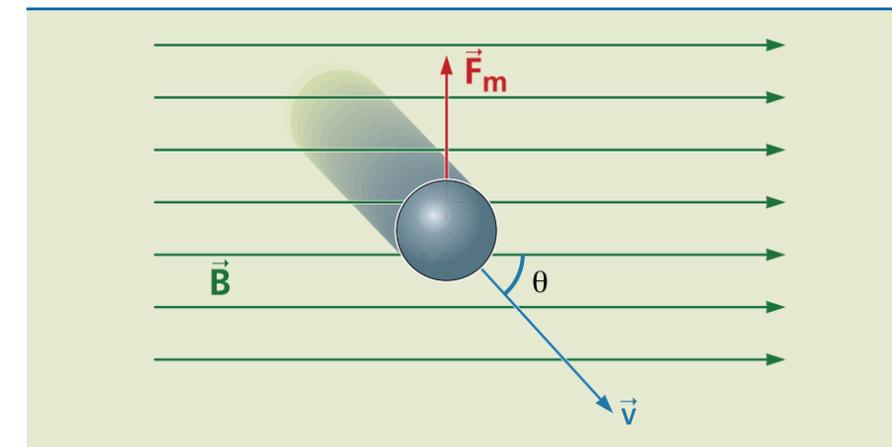


## 1.3 Força magnética e suas aplicações

A força magnética surge quando duas cargas elétricas em movimento estão próximas o suficiente para que o campo magnético de uma interfira no da outra.

### 1.3.1 Força magnética sobre cargas elétricas

Quando uma carga magnética está em movimento, cria-se a seu redor um campo magnético. Se esse campo magnético é uniforme, surge uma força magnética  $\vec{F}_m$  que depende (figura 1.36): do valor da carga elétrica  $q$ , em coulomb (C); da velocidade  $\vec{v}$ , em metro por segundo (m/s); do valor do campo uniforme  $\vec{B}$ , em tesla (T); e do ângulo de inclinação  $\theta$ , formado entre  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$ .



**Figura 1.36**

A força magnética sendo definida.



Então, a expressão que possibilita determinar a força magnética  $\vec{F}_m$ , em newton (N), é:

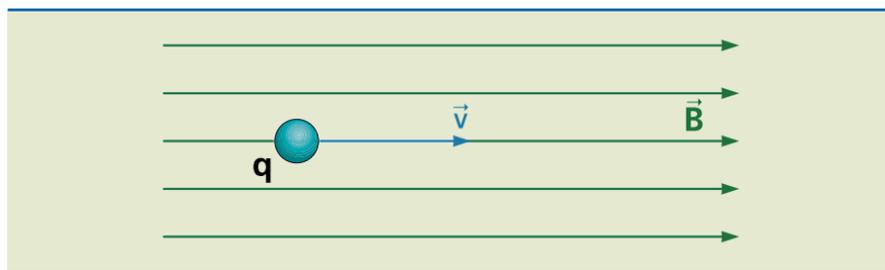
$$F_m = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\theta \quad (1.9)$$

Como, porém, a força magnética é uma grandeza vetorial, não basta calcular seu valor; é necessário determinar também sua direção e sentido. A direção a ser tomada pela força magnética depende de como a carga  $q$  é lançada no campo magnético uniforme:

- **Carga lançada paralelamente ao campo magnético uniforme** (figura 1.37) – Como o ângulo  $\theta$  vale zero, a força magnética também vale zero e, por isso, a carga continua em sua trajetória original, executando um movimento retilíneo uniforme.

**Figura 1.37**

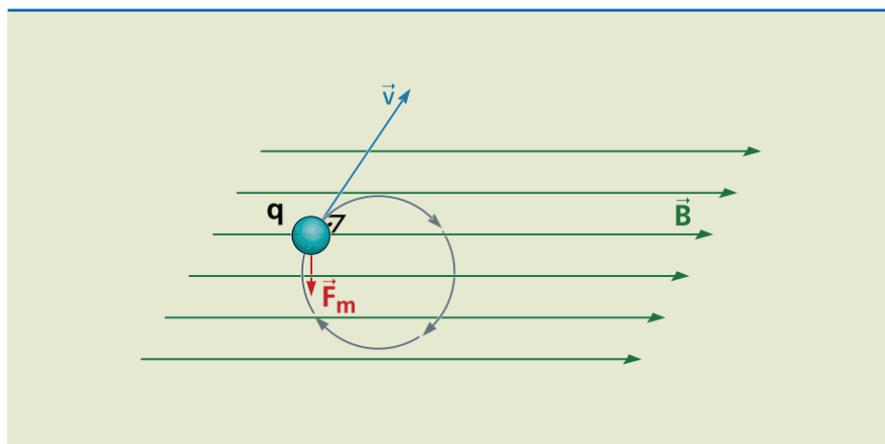
Carga lançada paralelamente ao campo magnético uniforme.



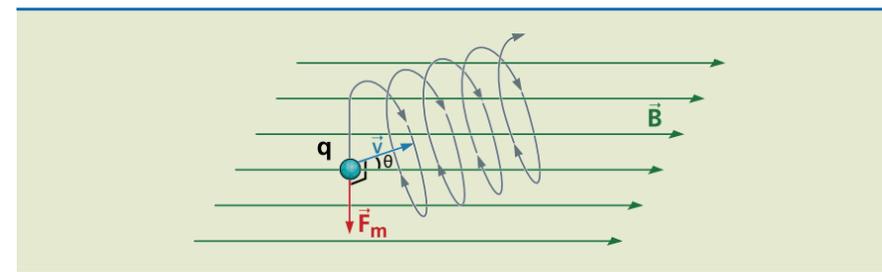
- **Carga lançada perpendicularmente ao campo magnético uniforme** (figura 1.38) – Como o ângulo  $\theta$  vale  $90^\circ$ , a força magnética atinge intensidade máxima ( $F_m = q \cdot v \cdot B$ ), o que faz com que a carga se desvie da trajetória original, executando um movimento circular uniforme.

**Figura 1.38**

Carga lançada perpendicularmente ao campo magnético uniforme.



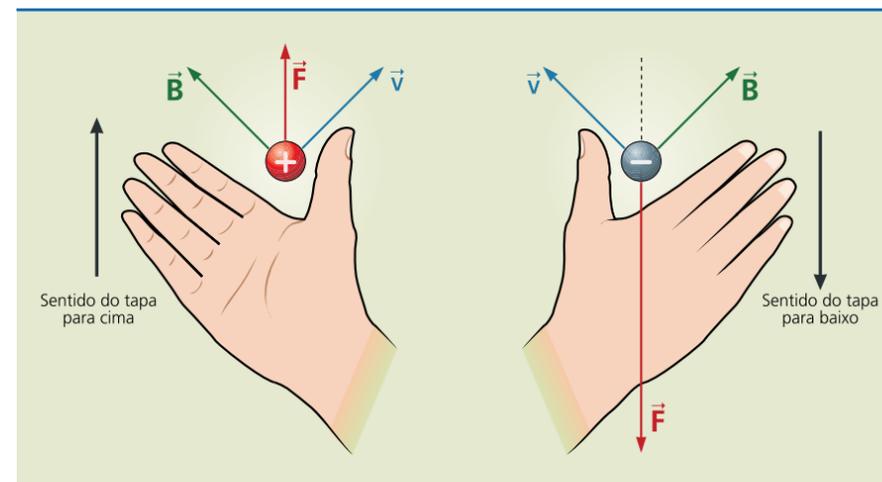
- **Carga lançada obliquamente ao campo magnético uniforme** (figura 1.39) – Como o ângulo  $\theta$  (entre a velocidade e o campo) é maior que  $0^\circ$  e menor que  $90^\circ$ , a força magnética provoca uma trajetória que é a soma do movimento retilíneo uniforme com o circular uniforme, chamada helicoidal cilíndrica, enquanto a velocidade pode ser decomposta em projeções horizontal e vertical; há influência dos dois tipos de movimento.



**Figura 1.39**

Carga positiva com velocidade  $v$  entrando em campo magnético segundo ângulo  $\theta$ . A força magnética resultante é perpendicular ao plano do campo e da velocidade. A carga descreve uma trajetória helicoidal.

Para definir um vetor, é necessário conhecer módulo, direção e sentido. Contudo, para determinar o sentido da força magnética, basta utilizar a regra do tapa ou da mão direita, como mostra a figura 1.40.



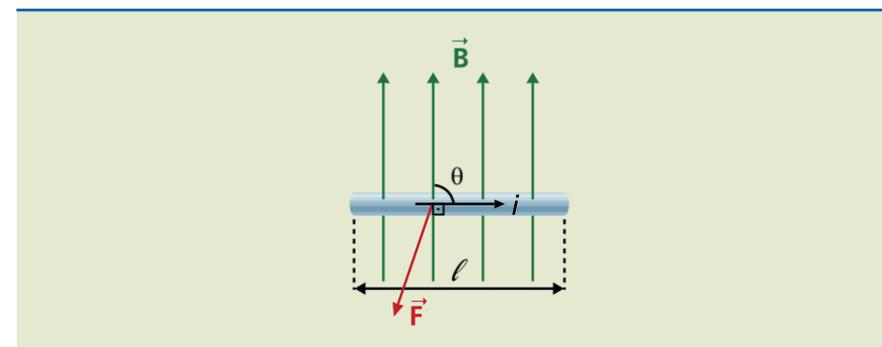
**Figura 1.40**

Regra do tapa ou da mão direita.

Portanto, o sentido da força é dado pelo “tapa” com a mão direita aberta: o tapa é feito com a palma da mão se a carga for positiva e com o dorso da mão se a carga for negativa.

### 1.3.2 Força magnética sobre condutor imerso em campo magnético

Como a corrente elétrica possui campo magnético, se um condutor reto, percorrido por corrente elétrica, é imerso em um campo magnético, manifesta-se uma força magnética (figura 1.41).



**Figura 1.41**

Condutor percorrido por corrente elétrica sob ação de uma força magnética.



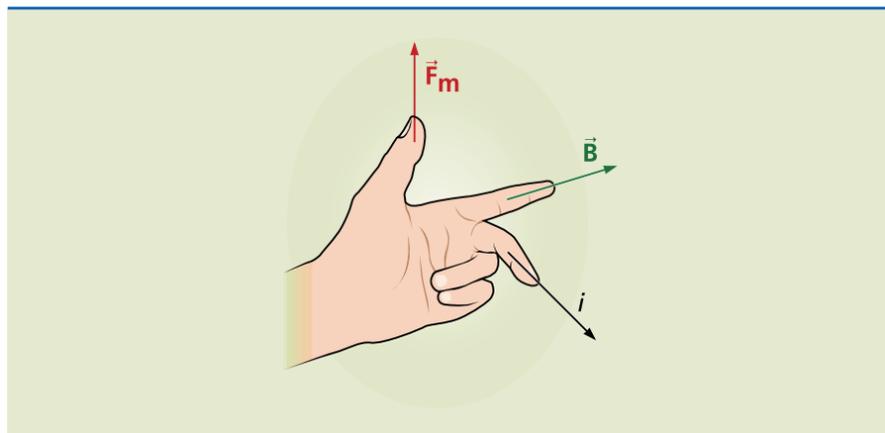
O ângulo  $\theta$  é formado entre o condutor e o campo magnético uniforme  $\vec{B}$ . Assim, o valor da força magnética é calculado por:

$$F_m = B \cdot i \cdot \ell \cdot \text{sen}\theta \quad (1.10)$$

em que  $\ell$  é o comprimento do condutor, em metro. Nesse caso, para determinar o sentido da força, usa-se a regra da mão esquerda (figura 1.42).

**Figura 1.42**

Regra da mão esquerda.

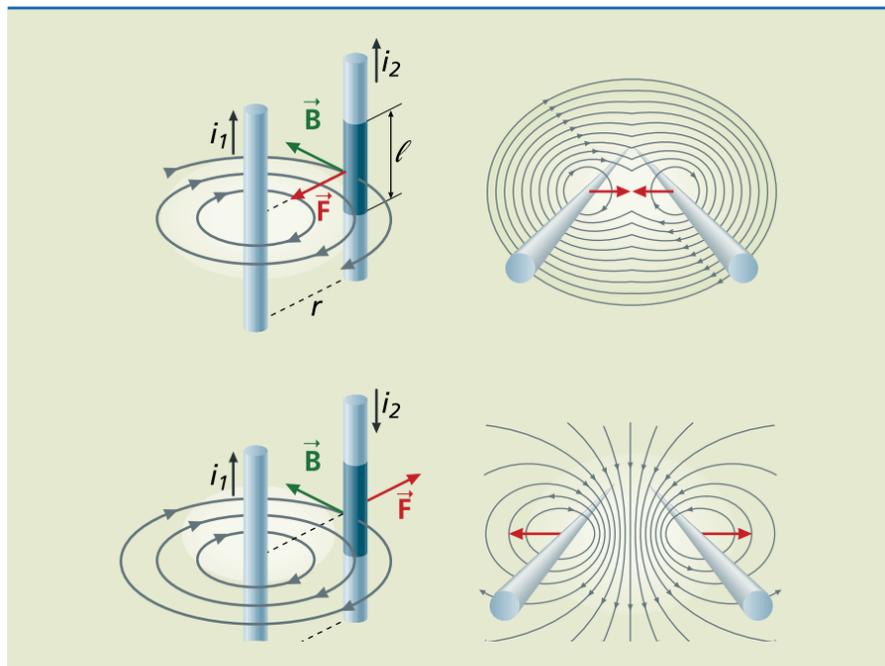


### 1.3.3 Força magnética entre condutores paralelos

Depois que Öersted demonstrou que uma corrente elétrica influencia um ímã próximo (bússola), o cientista francês André-Marie Ampère fez uma experiência para comprovar se uma corrente elétrica influenciaria outra. Para isso, colocou dois condutores retos paralelos entre si e fez com que duas correntes elétricas atravessassem os fios, ora no mesmo sentido, ora em sentidos opostos (figura 1.43).

**Figura 1.43**

Força magnética entre condutores paralelos.



Dessa maneira, Ampère concluiu: quando as correntes estão no mesmo sentido, as forças magnéticas que se manifestam são de atração; quando as correntes estão em sentidos opostos, as forças magnéticas são de repulsão.

Assim, considerando um trecho de condutor de comprimento  $\ell$  e a distância  $r$  entre os condutores, a força magnética em ambos os casos (atração e repulsão) vale:

$$F_m = \frac{\mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \ell}{2\pi r} \quad (1.11)$$

### 1.3.4 Aplicações práticas da força magnética

O motor elétrico, o galvanômetro de bobina móvel, o relé, o disjuntor, o alto-falante e a gravação magnética são alguns exemplos de aplicações da força magnética.

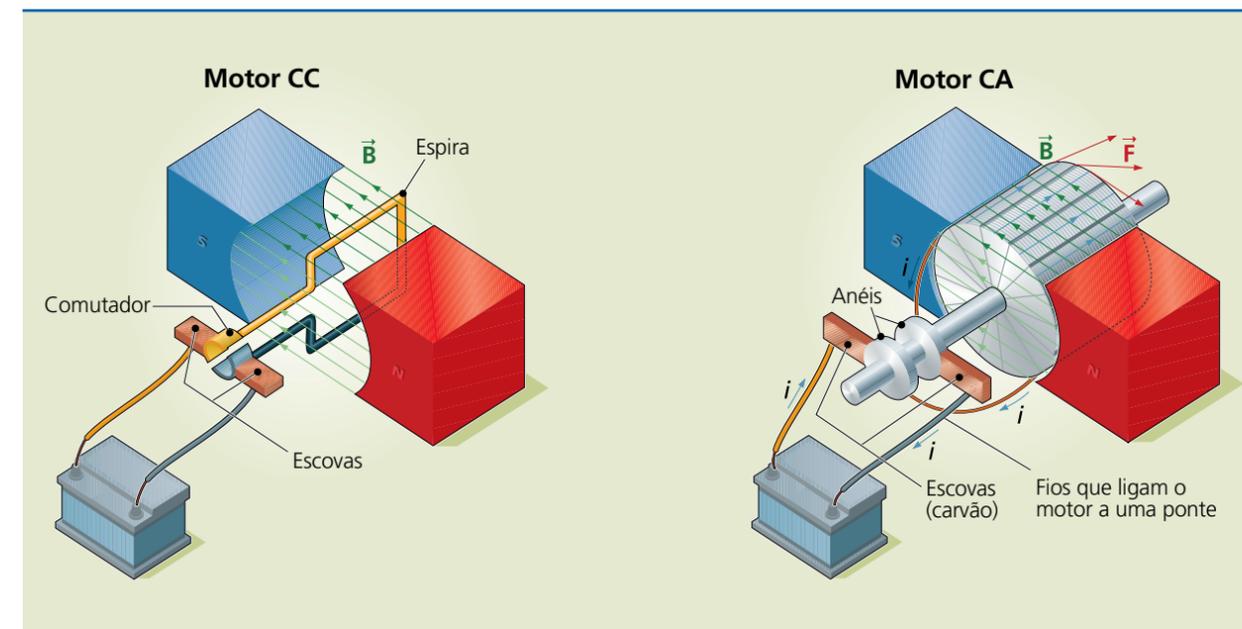
#### Motor elétrico

Trata-se de um dispositivo que transforma energia elétrica em energia mecânica (movimento de rotação). É composto basicamente de um conjunto de espiras (rotor) imerso em um campo magnético uniforme (estator).

Ao fornecer corrente elétrica às espiras (representadas na figura 1.44 por uma única espira), surge um binário de forças magnéticas que provocam um movimento giratório.

**Figura 1.44**

Motor elétrico.

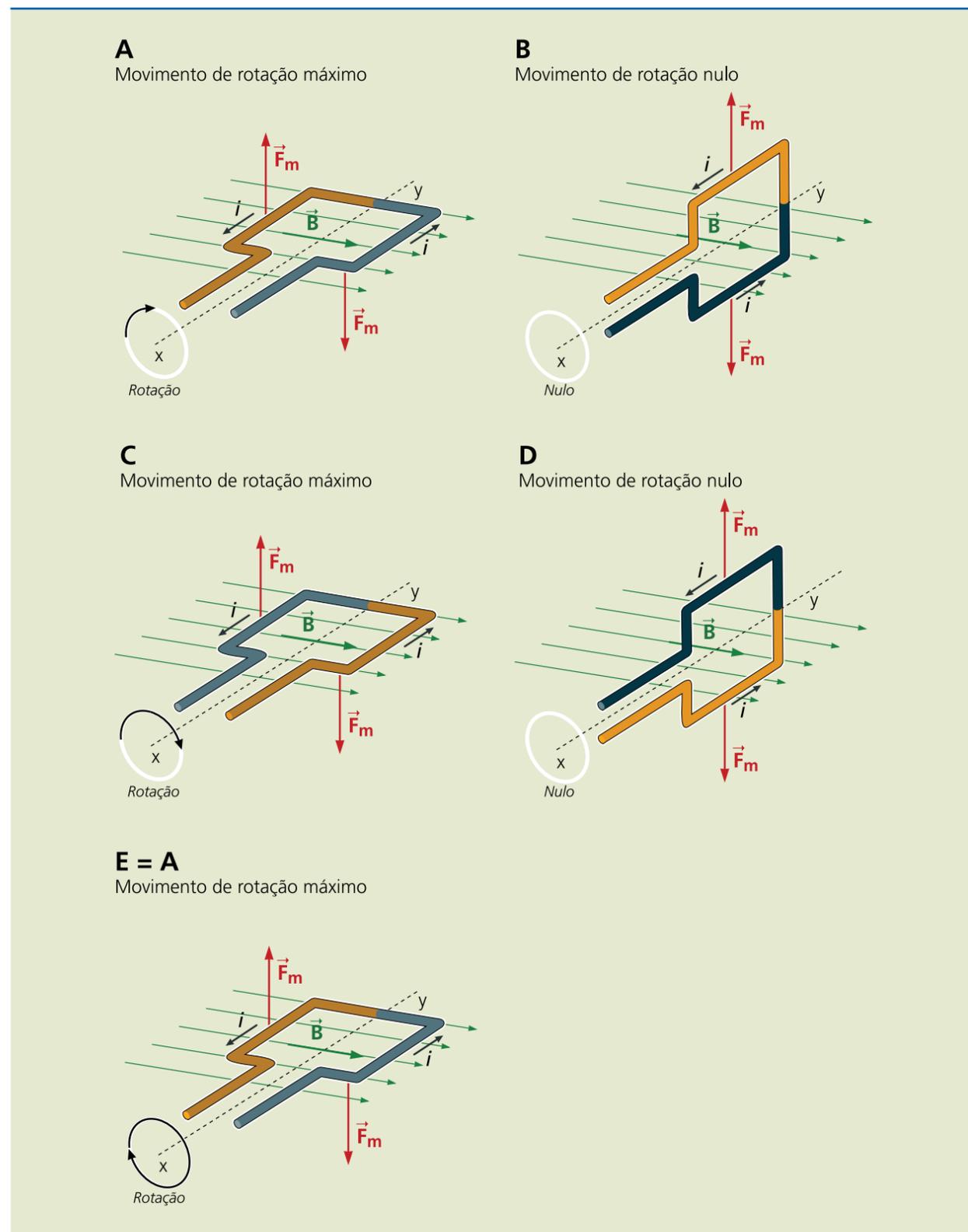


Uma volta completa de uma espira está descrita na figura 1.45, a partir da posição A até a E.



**Figura 1.45**

Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua (CC).

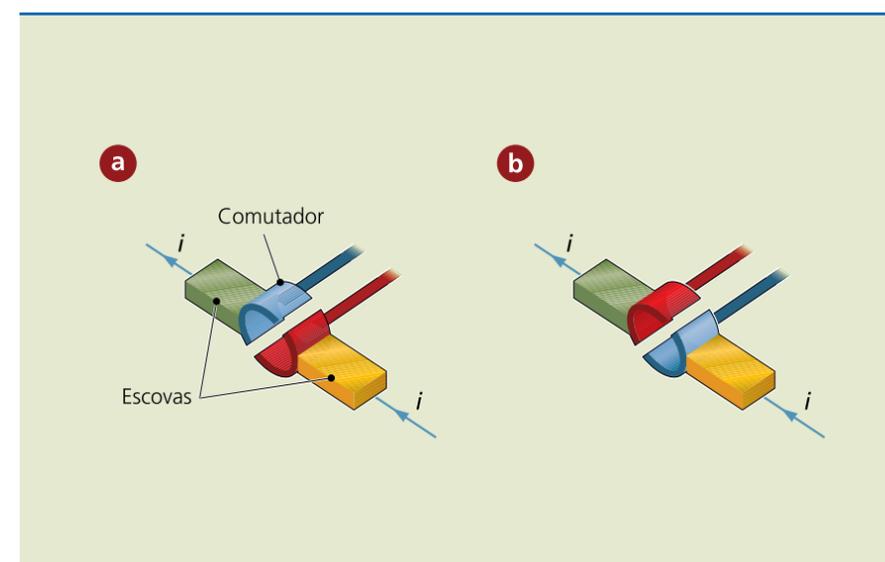


Como podemos notar, o sentido da força magnética, que é possível determinar pela regra da mão esquerda, faz com que a espira gire. Se o sentido da corrente é invertido, invertem-se o sentido da força e, por conseguinte, o de rotação.

Observando as posições A e C, verificamos que a corrente, apesar de contínua, inverte de sentido na espira (na posição A ela entra pelo lado escuro e sai pelo lado claro, enquanto na C ocorre o contrário). Isso acontece porque o binário de forças deve ser sempre mantido no mesmo sentido, para que a espira possa completar sua volta.

Para isso, os fios que conduzem a corrente são ligados à espira em um dispositivo que permite essa inversão de sentido de corrente, o comutador, utilizado em um motor CC (figura 1.46).

**Figura 1.46**  
Comutador.



O comutador é um anel com um corte, em contato com dispositivos fixos no eixo, denominados escovas, por onde a corrente será fornecida. A cada meia volta, os lados da espira (claro e escuro) sempre estarão em contato com escovas diferentes, invertendo então a corrente elétrica na espira. No caso de um motor de corrente alternada (CA), o comutador não é necessário, pois os anéis são separados.

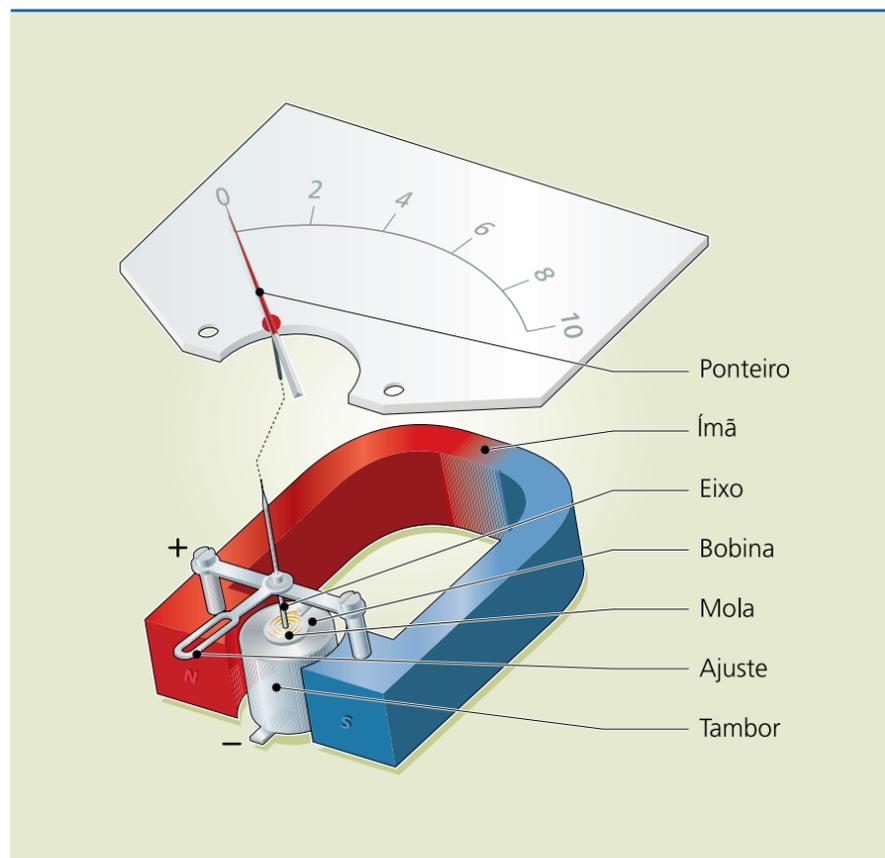
**Galvanômetro de bobina móvel**

Os instrumentos de medição elétrica de ponteiro possuem um galvanômetro, no qual se observa o mesmo fenômeno do motor CC. Quando a corrente elétrica percorre a bobina, a força magnética movimenta o ponteiro. No entanto, uma mola que age em força contrária à força magnética faz com que o ponteiro pare, revelando o valor da grandeza a ser medida. Quanto maior essa grandeza, maior a deflexão. A figura 1.47 apresenta um modelo-padrão de galvanômetro.



**Figura 1.47**

Galvanômetro de bobina móvel.

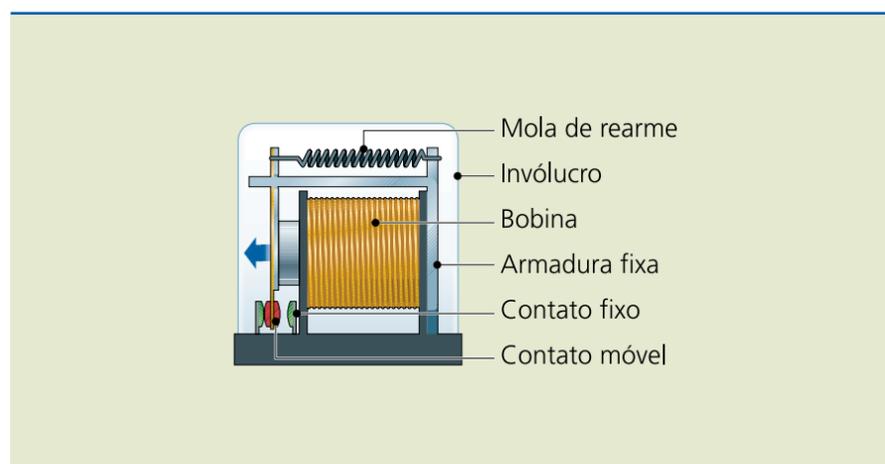


**Relé**

O princípio de funcionamento de um relé é por meio da ação da força magnética que surge na atração entre a parte móvel e a fixa (figura 1.48).

**Figura 1.48**

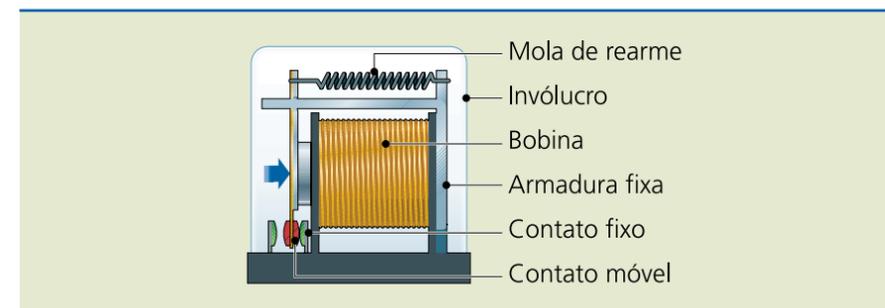
Relé.



Ao energizar a bobina, a corrente elétrica gera um campo magnético que magnetiza o núcleo fixo, tornando-se um eletroímã. O núcleo móvel sente a atração que movimenta os contatos, mudando de posição (figura 1.49).

**Figura 1.49**

Relé energizado.



Como os contatos móveis estão fixos na parte do núcleo móvel, um contato que antes estava fechado (normalmente fechado – NF) passa a estar aberto, e o outro, que estava aberto (normalmente aberto – NA), passa a estar fechado.

Na figura 1.49, o contato utilizado é um comutador, que possui um elemento em comum (o contato móvel) entre os contatos NF e NA.

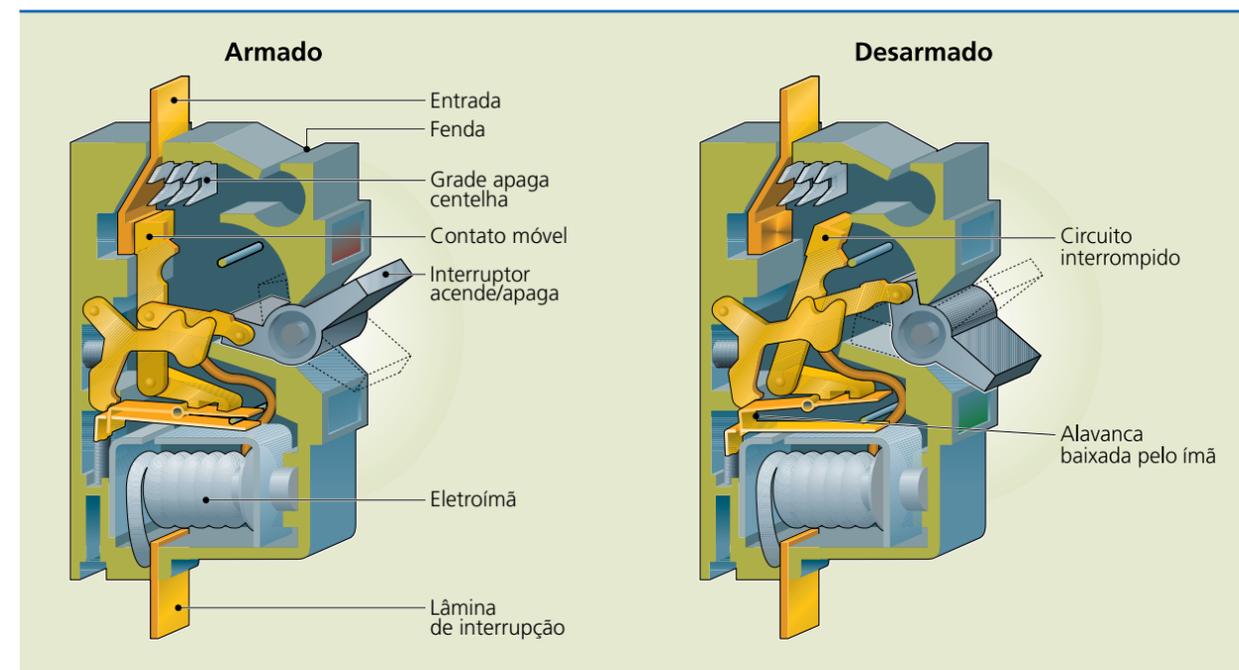
Ao cortar o fornecimento da corrente, uma mola empurra de volta o núcleo móvel, de modo que os contatos voltam a suas posições normais.

**Disjuntor**

É um dispositivo de proteção da instalação elétrica, que prevenine sobrecargas e curto-circuitos. Internamente, possui um eletroímã para agir em caso de curto-circuito. Quando uma corrente de curto-circuito, que é uma corrente acima do normal, passa pelo eletroímã, um forte campo magnético é gerado, magnetizando o núcleo e fazendo com que uma alavanca desarme o mecanismo do contato móvel (figura 1.50). Todo esse processo ocorre em fração de segundo, para evitar que o curto-circuito danifique a instalação elétrica.

**Figura 1.50**

Disjuntor.

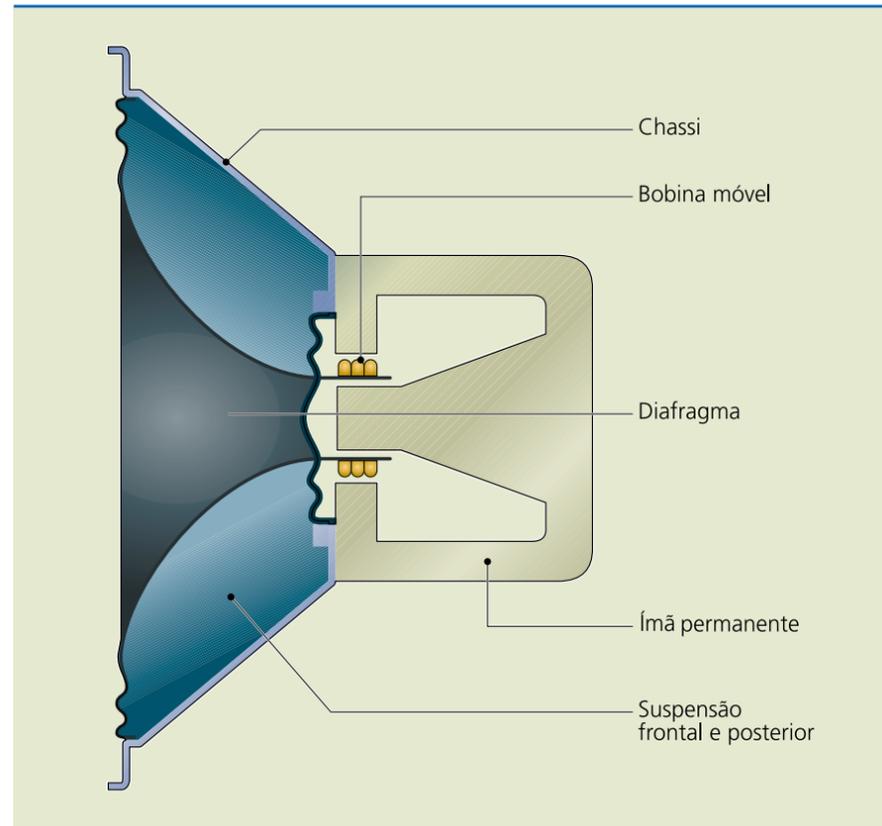


### Alto-falante

O alto-falante transforma a energia elétrica em energia sonora. É, portanto, um transdutor que modifica um sinal elétrico em mecânico (ondas sonoras) por eletromagnetismo.

Ele funciona por meio de uma bobina móvel, fixada na parte central do diafragma, que recebe o sinal elétrico enviado do amplificador. Dessa maneira, surge um campo magnético, que interage com o campo magnético do ímã permanente, gerando uma força magnética, que faz com que o diafragma vibre de acordo com a intensidade e frequência do sinal elétrico. Essa vibração se manifesta no ar, sob a forma de ondas sonoras (figura 1.51).

**Figura 1.51**  
Alto-falante de bobina móvel.



### Gravação magnética

A gravação magnética é feita sobre uma camada tratada com material magnetizável, ou seja, composto de pequenos ímãs. As fitas magnéticas, os disquetes e os discos rígidos dos microcomputadores, mais conhecidos como HDs (*hard disks*), são cobertos por esse material magnetizável.

No caso dos computadores, no conjunto que protege o HD encontra-se o cabeçote de gravação (figura 1.52). Esse dispositivo é um eletroímã que magnetiza (orienta) os milhões de ímãs presentes no disco. A orientação desses ímãs pode ser interpretada como a gravação dos dados.

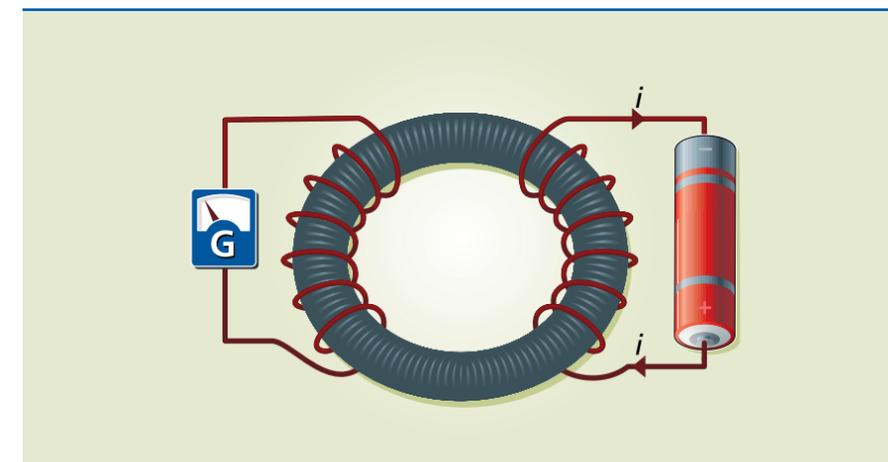


**Figura 1.52**  
Cabeçote de gravação magnética de HD.

### 1.4 Indução eletromagnética

Com as experiências de Öersted e Ampère, descobriu-se que uma corrente elétrica pode gerar magnetismo. O físico inglês Michael Faraday realizou experimentos que comprovaram o efeito contrário: o magnetismo poderia gerar eletricidade (naquela época, a eletricidade só era obtida por meio de baterias e pilhas).

Faraday montou o circuito apresentado na figura 1.53.



**Figura 1.53**  
Experiência de Faraday.

Nele, a bateria fornece corrente elétrica para um enrolamento, gerando, consequentemente, um campo magnético que seria transportado para outro enrolamento ligado a um galvanômetro. O detalhe é que, como os dois enrolamentos compartilhariam o mesmo núcleo magnético – o anel –, o segundo receberia o campo magnético do primeiro, fazendo surgir uma corrente que seria lida pelo galvanômetro.



A experiência, porém, não deu certo, porque, pelo que vimos antes, faltou um componente importantíssimo.

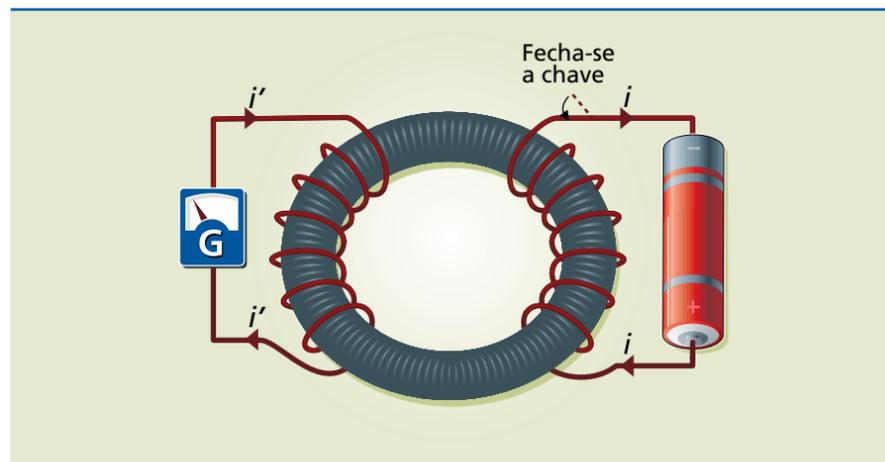
Vamos rever os fenômenos já estudados:  
 campo magnético (magnetismo) = eletricidade + movimento  
 força magnética (movimento) = magnetismo + eletricidade

Portanto, para gerar eletricidade, não basta o magnetismo; é necessário também o movimento. Como as baterias e pilhas fornecem tensão contínua, para obter o movimento (variação), é necessário incluir um interruptor. Foi o que Faraday fez, anos depois (figura 1.54).

No instante em que a chave (interruptor) fecha, ocorre uma variação – a corrente da bateria passa de zero a um valor qualquer – e, durante o intervalo do fechamento da chave, é gerada no segundo enrolamento uma corrente elétrica, chamada corrente induzida.

**Figura 1.54**

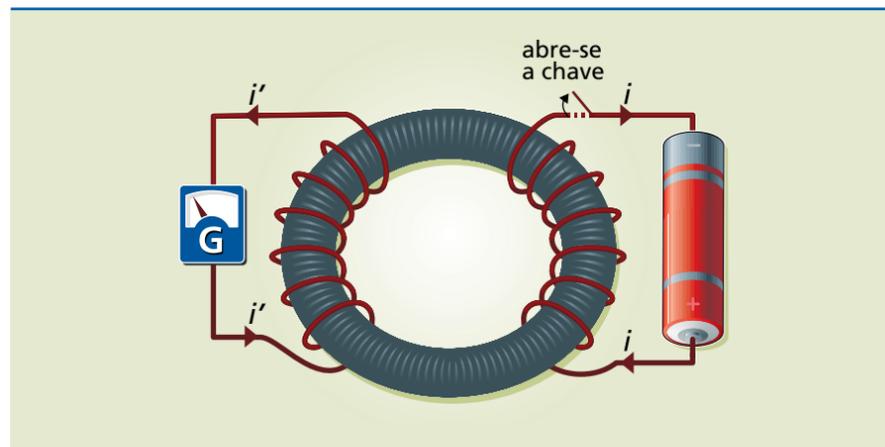
Princípio da indução eletromagnética.



Após esse tempo, não existe mais corrente no galvanômetro. Se a chave é aberta, durante o tempo de abertura (movimento), surge uma corrente no galvanômetro, mas com sentido contrário ao do caso anterior (figura 1.55).

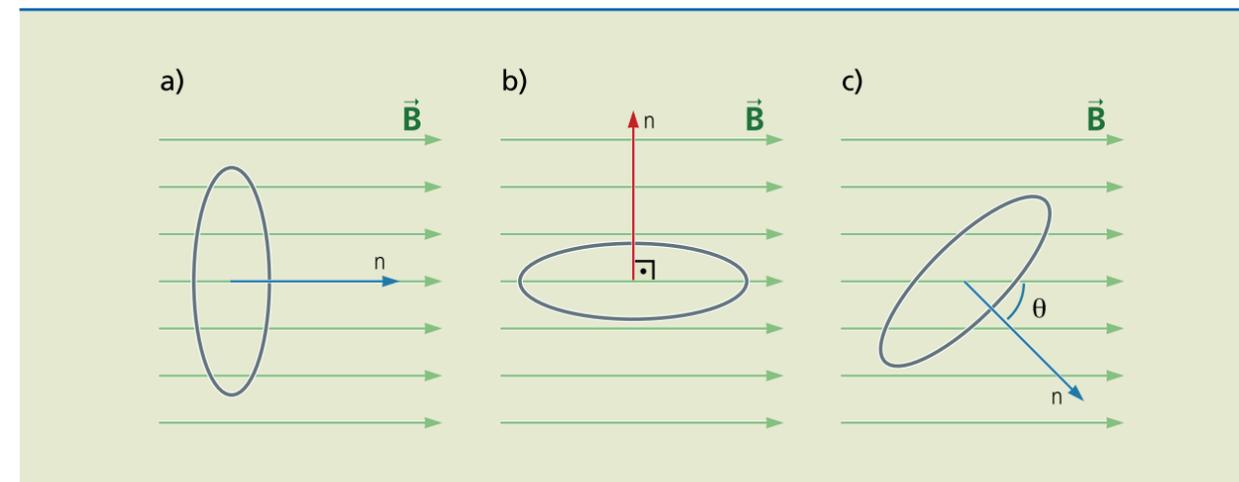
**Figura 1.55**

Geração da corrente induzida.



Faraday concluiu então que só há geração de eletricidade se ocorrer variação de uma grandeza associada ao campo magnético. Essa grandeza é o fluxo magnético ( $\Phi$ ), que nada mais é do que o número de linhas de indução dentro de uma área conhecida (figura 1.56).

**Figura 1.56**  
Fluxo magnético.



Vamos analisar como o fluxo magnético varia:

- Considerando a figura 1.56a, o campo magnético está paralelo ao plano da área circular A (para verificar mais facilmente, foi colocado perpendicularmente ao plano da circunferência um vetor  $\vec{n}$  – normal). O ângulo entre o vetor normal e o campo B vale zero. Nesse caso, o máximo de linhas de indução atravessa a área A: o fluxo então é máximo;
- Na figura 1.56b, nenhuma linha atravessa a área A. O ângulo é de  $90^\circ$  e o fluxo vale zero.
- Na figura 1.56c, parte das linhas atravessa a área A.

Com base nessa análise, podemos concluir que o fluxo magnético depende:

- do campo magnético (T);
- da área ( $m^2$ ) que as linhas atravessam;
- da posição entre a área e as linhas de indução ( $\theta$ ).

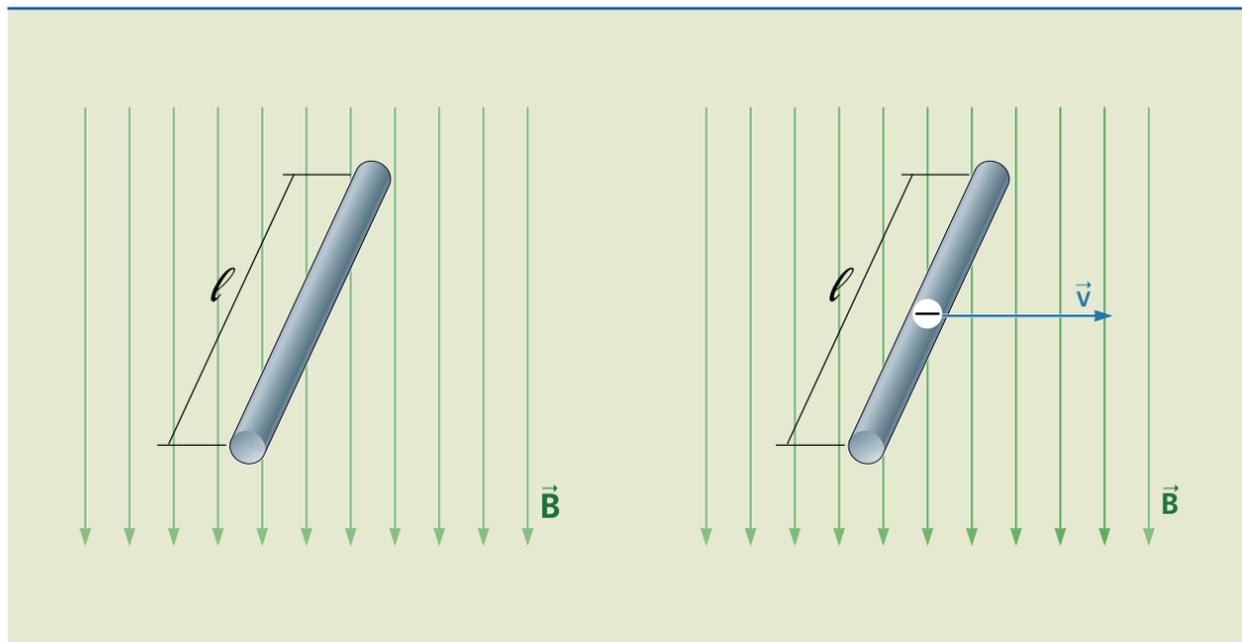
Calcula-se o fluxo magnético, medido em weber (Wb), pela seguinte fórmula:

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos \theta \quad (1.12)$$

A geração de energia elétrica por meio do magnetismo é chamada de indução eletromagnética, mas como ela surge? Para entendê-la, vamos acompanhar as figuras 1.57 e 1.58, que apresentam passo a passo a geração da tensão elétrica.

Na figura 1.57, um condutor metálico está imerso em um campo magnético uniforme. Quando se movimentar esse condutor a uma velocidade v, seus elétrons livres também se movimentam à mesma velocidade.

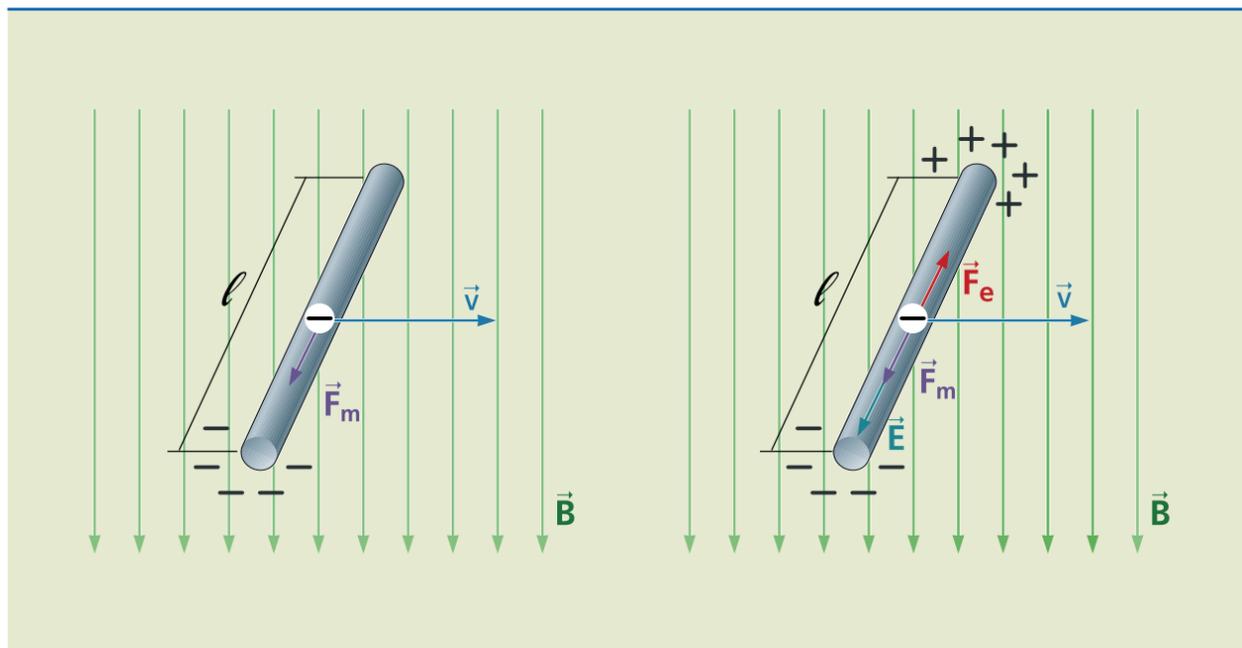




**Figura 1.57**

Geração da tensão induzida – parte 1.

Com isso, surgem campos magnéticos ao redor dos elétrons, que interagem com o campo uniforme  $\vec{B}$ , fazendo com que se manifeste uma força magnética  $\vec{F}_m$ . Essa força magnética, por sua vez, empurra os elétrons para uma das extremidades do condutor.



**Figura 1.58**

Geração da tensão induzida – parte 2.

Com falta de elétrons na outra extremidade, surge um campo elétrico  $\vec{E}$ , fazendo com que os elétrons fiquem submetidos a uma força elétrica  $\vec{F}_e$ , de sentido contrário ao da força magnética. Enquanto as forças não entrarem em equilíbrio, essa separação de cargas continua.

Como o campo elétrico no interior do condutor não será nulo, entre os terminais do condutor existirá uma diferença de potencial, que é a tensão induzida  $e$ .

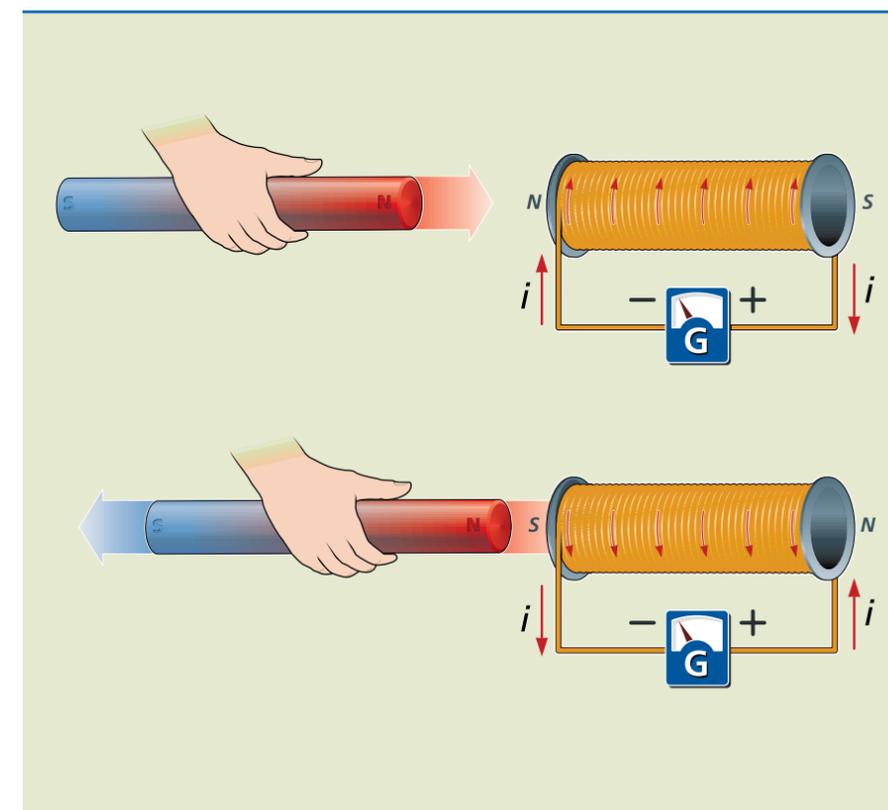
A tensão induzida vale:

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (1.13)$$

em que:

- $e$  é a tensão induzida, em volt (V);
- $B$ , o campo magnético, em tesla (T);
- $l$ , o comprimento do condutor, em metro (m);
- $v$ , a velocidade com que o condutor se move, em metro por segundo (m/s).

### 1.4.1 Lei de Lenz



**Figura 1.59**

Lei de Lenz.

A figura 1.59 mostra que, ao aproximar ou afastar um ímã de uma bobina, verifica-se no galvanômetro a geração de uma tensão na bobina. Essa tensão induzida depende da variação do fluxo magnético e do tempo em que tal variação acontece.

Além disso, quando se aproxima o ímã da bobina, a corrente induzida na bobina cria um campo magnético que tende a repelir o ímã e, quando se afasta o ímã, surge na bobina um campo induzido que tende a atrair o ímã.



Em razão desse comportamento, também é possível determinar o sentido da corrente induzida com a regra da mão direita, que relaciona campo magnético e corrente elétrica. Todas essas informações podem ser reunidas em uma fórmula, a lei de Faraday-Neumann:

$$e = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1.14)$$

em que:

- $e$  é a tensão induzida, em volt (V);
- $\Delta\phi$ , a variação do fluxo magnético, em weber (Wb);
- $\Delta t$ , a variação do tempo, em segundo (s).

O sinal negativo da fórmula representa a oposição que o fluxo magnético induzido cria com relação ao campo indutor (ímã aproximando-se ou afastando-se). Essa oposição é a lei de Lenz.

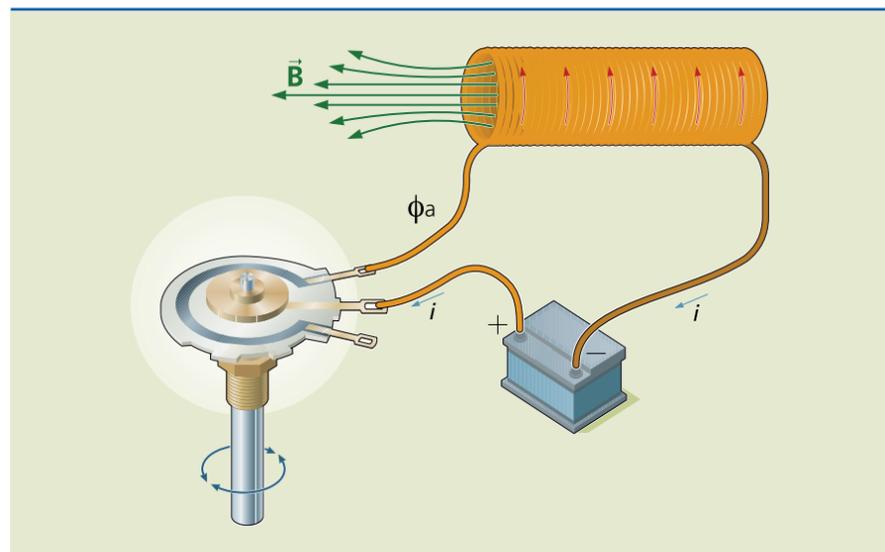
## 1.4.2 Autoindução

A autoindução foi descoberta no século XIX pelo cientista norte-americano Joseph Henry. Lembrando as experiências de Faraday representadas nas figuras 1.53 a 1.55, há dois circuitos bem distintos:

- **Circuito indutor:** aquele com a bateria e o interruptor, que vai gerar o campo magnético variável.
- **Circuito induzido:** aquele que receberá o campo do outro circuito e induzirá a corrente.

A autoindução acontece quando em um mesmo circuito há ao mesmo tempo o circuito indutor e o circuito induzido (figura 1.60).

**Figura 1.60**  
Autoindução.



Analisando o circuito da figura 1.60, percebe-se que, se ocorre variação na resistência do potenciômetro, a corrente elétrica do circuito também varia, assim como o campo magnético e seu fluxo. Como há variação de fluxo magnético, surge no próprio circuito, no caso da bobina, um fluxo magnético autoinduzido, que vale:

$$\Phi_a = L \cdot i \quad (1.15)$$

em que:

- $\Phi_a$  é o fluxo magnético autoinduzido, em weber (Wb);
- $L$ , a indutância, em henry (H).

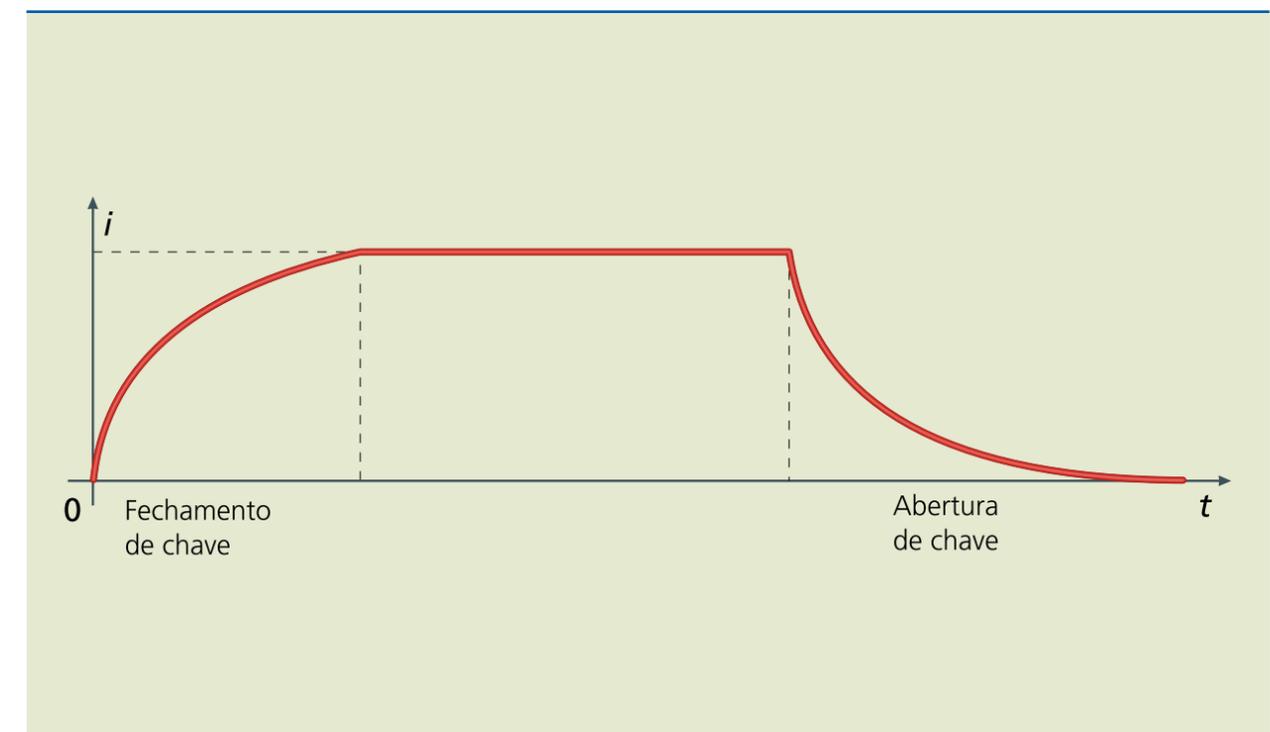
Portanto, autoindução ou indutância é a capacidade que um condutor possui de autoinduzir uma tensão elétrica quando a corrente elétrica que o percorre varia com o tempo:

$$e_a = -\frac{\Delta\phi_a}{\Delta t} = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1.16)$$

em que  $e_a$  é a tensão autoinduzida, em volts (V).

Isso significa que o sentido de  $e_a$  é contrário ao da tensão aplicada no condutor. Em alguns livros, a tensão autoinduzida é denominada força contraeletromotriz (f.c.e.m.). Essa força provoca certo atraso no estabelecimento da corrente em um circuito, assim como ocorre em um desligamento (figura 1.61).

**Figura 1.61**  
Corrente autoinduzida.



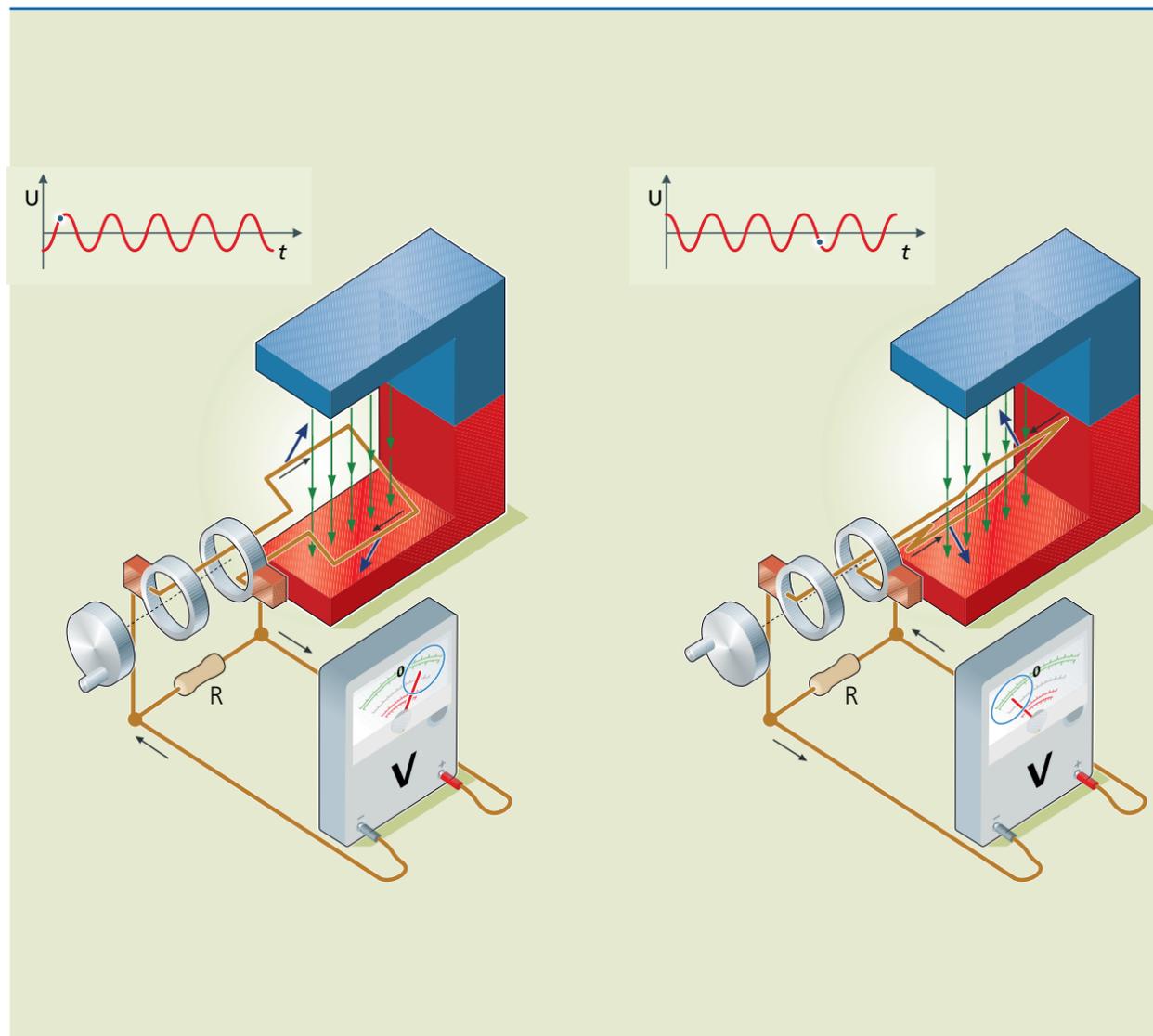
### 1.4.3 Aplicações práticas da indução eletromagnética

Apresentam-se a seguir as principais aplicações práticas da indução eletromagnética.

#### Gerador elétrico

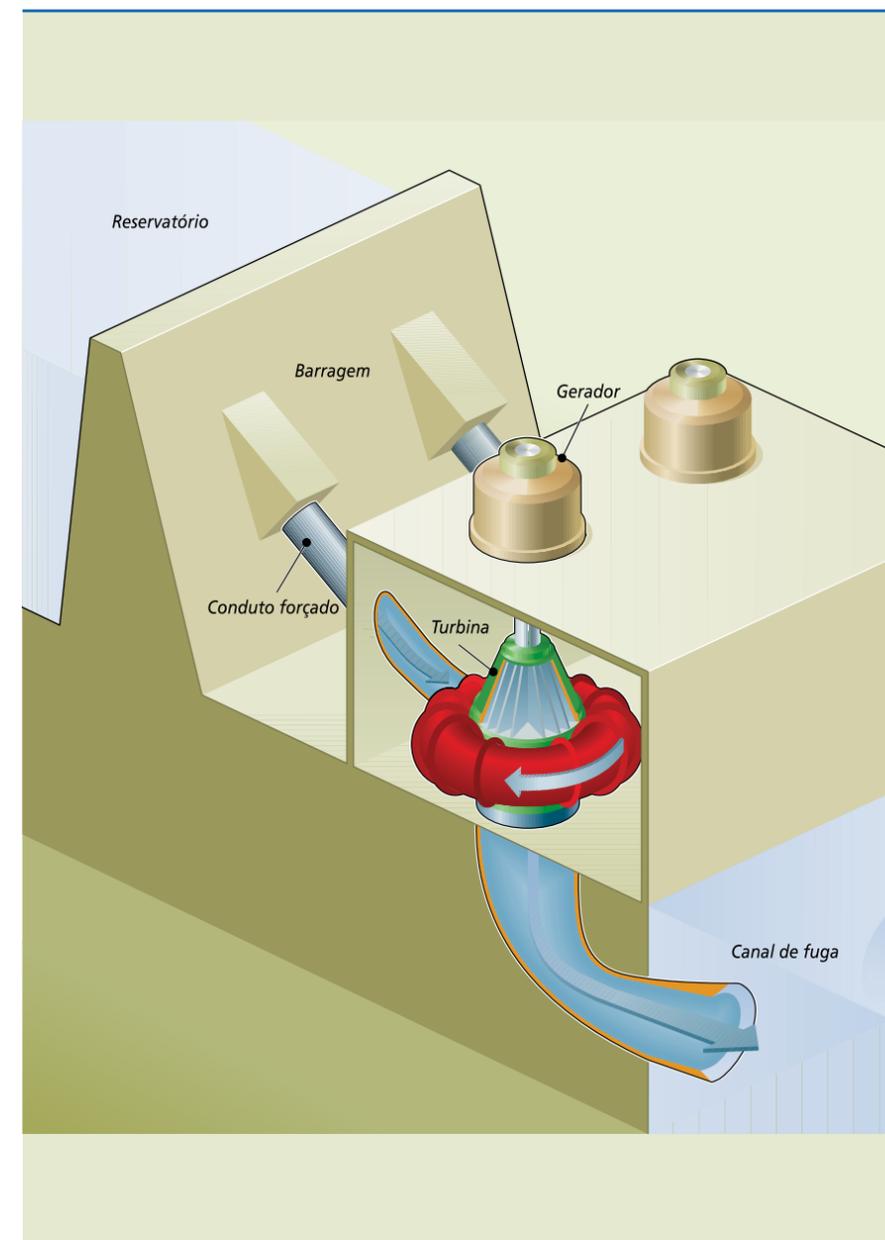
**Figura 1.62**  
Gerador CA.

Ao contrário do motor, o gerador elétrico transforma energia mecânica em energia elétrica.



No circuito da figura 1.62, uma manivela produz a energia mecânica externa necessária para girar as espiras que compõem o rotor. Como elas estão imersas em um campo magnético uniforme, há geração de tensão e corrente elétrica. Vimos que na indução eletromagnética a corrente inverte de sentido. Nesse caso, a tensão e a corrente geradas são denominadas alternadas, pois elas invertem de sentido com o tempo.

Os geradores utilizados nas usinas hidroelétricas e termoeletricas geram energia elétrica com base nesse princípio (figura 1.63). As hidroelétricas usam energia da água, e as termoeletricas, combustíveis fósseis ou energia nuclear para produzir o vapor que faz girar o rotor.



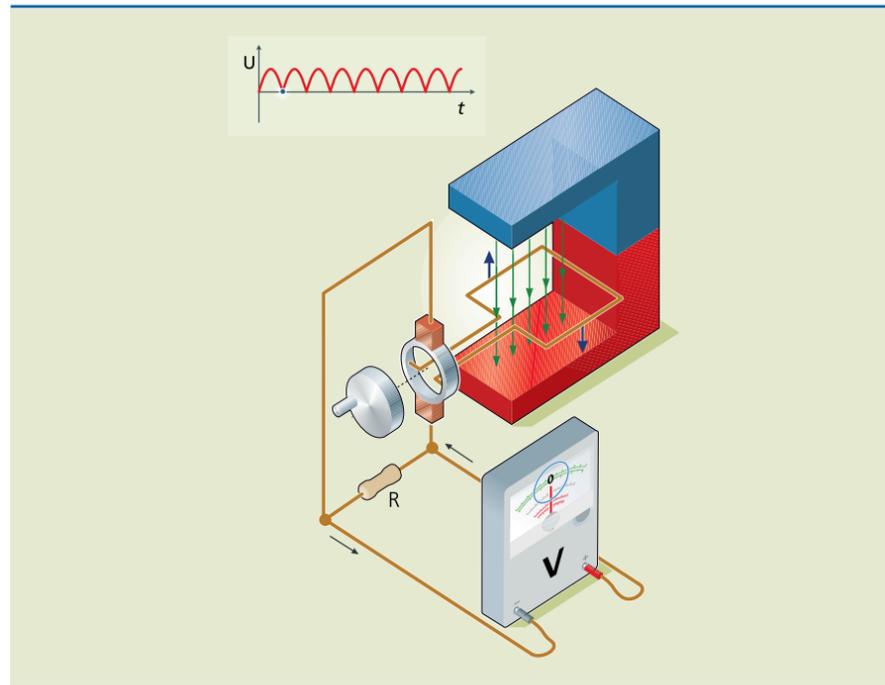
**Figura 1.63**  
Gerador em usina hidroelétrica.

Agora, vamos considerar uma situação em que os anéis coletores são substituídos por um comutador. Nesse caso, a tensão e a corrente geradas são contínuas (não invertem de sentido), apesar de serem pulsantes, como mostra a figura 1.64.

O dínamo que carrega a bateria dos veículos automotores funciona com base nesse princípio; a energia mecânica rotativa é obtida por meio do acoplamento com eixo do motor.



**Figura 1.64**  
Gerador CC.



### Reprodução magnética

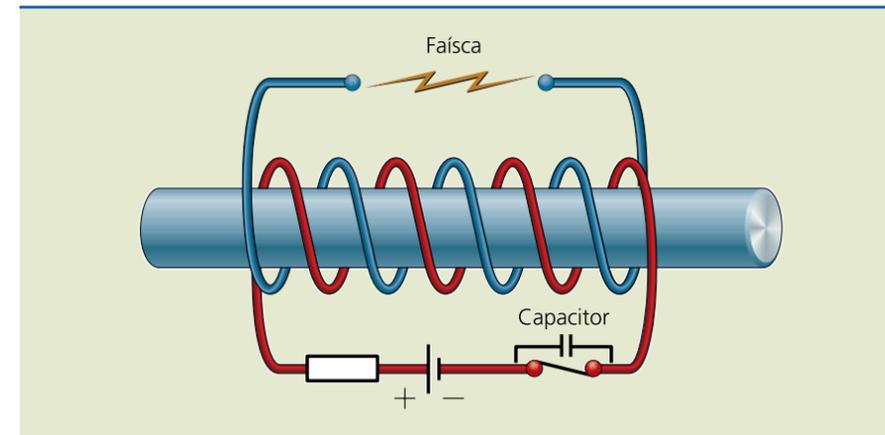
Como vimos, o cabeçote de gravação de um HD (figura 1.65) é um eletroímã, que, além de magnetizar os milhões de ímãs presentes no disco, pode ser utilizado para ler dados gravados no disco rígido, no CD, no DVD etc. Tal leitura é possível porque esses dados geram um campo magnético, devido a sua orientação, que, associado ao movimento do disco, faz com que surja uma tensão elétrica no cabeçote de leitura.

**Figura 1.65**  
Cabeçote de reprodução magnética de HD.



### Bobina de indução

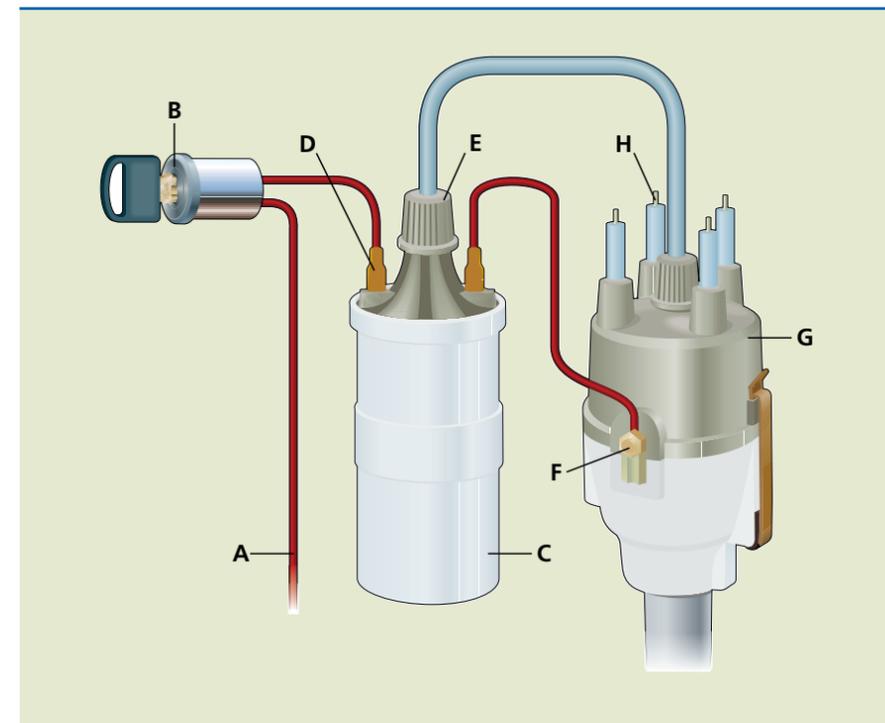
A autoindução pode ser utilizada para gerar altas tensões. Para isso, usa-se uma bobina de autoindução, que consiste em um solenoide composto por um fio grosso, ligado a uma bateria por uma chave (figura 1.66).



**Figura 1.66**  
Bobina de indução.

Esse circuito funciona da seguinte maneira: ao interromper o circuito, surge uma força contraeletromotriz. Como a indutância é alta e o tempo em que isso ocorre é baixo, o valor da tensão induzida também é alto, podendo chegar a milhares de volts. O capacitor em paralelo com o interruptor serve para diminuir o efeito retardatório da interrupção do circuito.

Um exemplo de aplicação é o circuito de ignição de motores a explosão.



**Figura 1.67**  
Circuito de ignição dos motores a explosão que utilizam distribuidor. Nos carros mais modernos o distribuidor foi substituído pela injeção eletrônica.

A figura 1.67 apresenta as partes principais do circuito de ignição. A alimentação proveniente da bateria (A) passa por um interruptor (B) que está associado à chave de ignição do carro. Antes de chegar à bobina (C), a alimentação passa pelo terminal de baixa tensão (D). Observe que o distribuidor (G), que leva a tensão às velas de ignição, também possui um terminal de baixa tensão (F).

A bobina tem alta indutância, fazendo com que, juntamente com o tempo decorrido da interrupção de alimentação (controlado por um circuito eletrônico), a tensão da bateria se eleve no terminal de alta tensão (E). Essa tensão elevada pode chegar a milhares de volts.

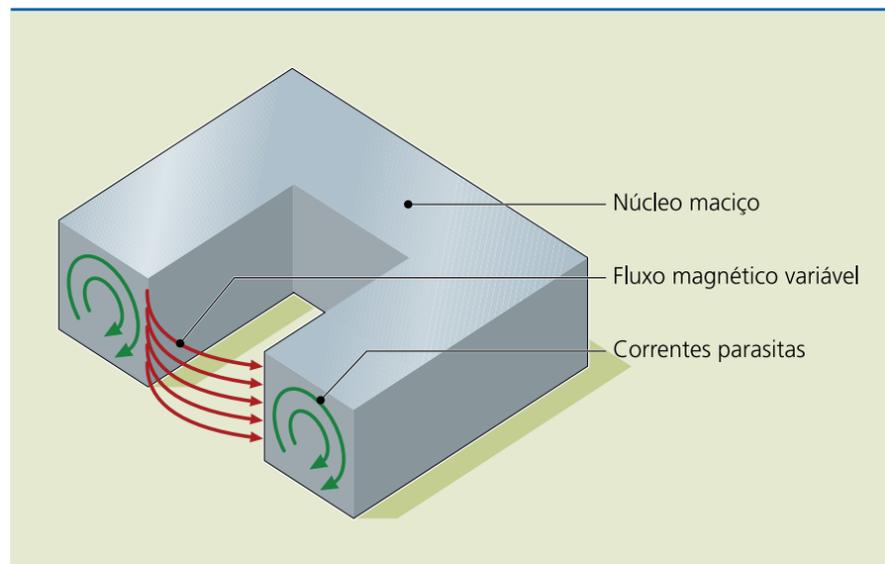
A alta tensão da bobina chega em picos ao distribuidor (G) pelo terminal central. O distribuidor, por sua vez, em determinada sequência, transfere esses picos de tensão às velas de ignição por meio de cabos de alta tensão (H) para gerar a explosão durante a mistura ar-combustível, fazendo o motor se mover.

### Forno de indução

O princípio da indução eletromagnética pode ser utilizado para fundir uma peça metálica. Para isso, é preciso submeter a peça metálica maciça a um campo magnético variável de grande intensidade. Dessa maneira, surgirá no interior da peça pequenas correntes elétricas, conhecidas como correntes de Foucault ou correntes parasitas (figura 1.68).

**Figura 1.68**

Correntes parasitas.

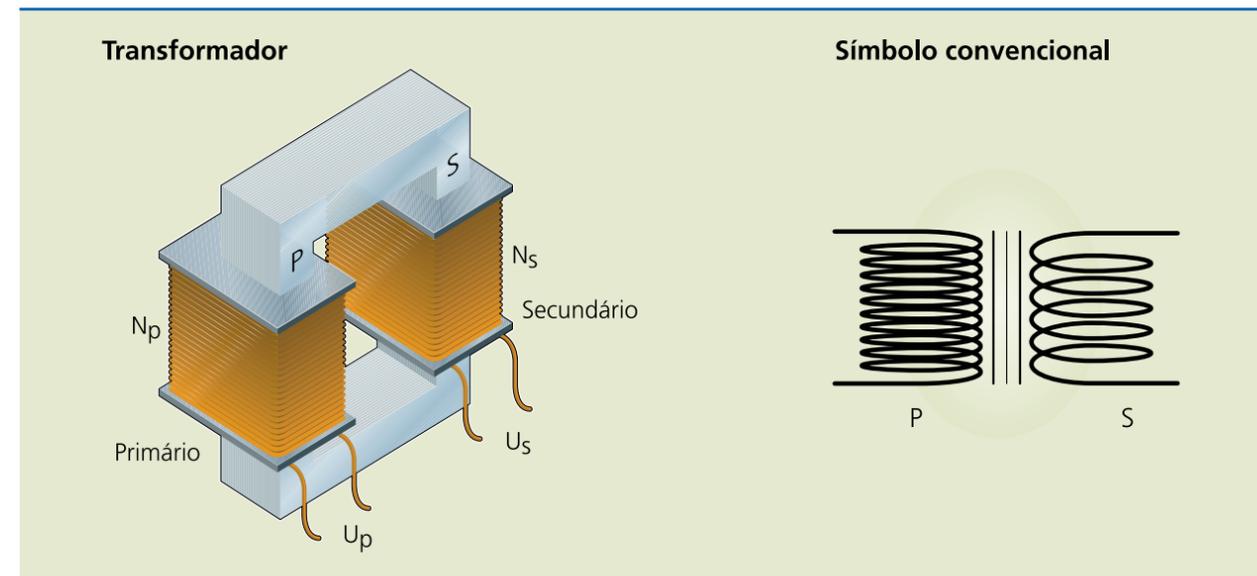


Se a seção transversal da peça for grande, de acordo com a lei de Ohm, sua resistência elétrica será pequena, e as correntes parasitas possuirão intensidade capaz de fundir a peça por meio do efeito Joule.

### Transformador

Utilizado para elevar ou abaixar os valores da tensão e da corrente elétrica em determinadas partes do circuito, esse dispositivo é composto por dois enrolamentos que compartilham o mesmo núcleo magnético (figura 1.69).

Embora parecido com o circuito da experiência de Faraday, o transformador não necessita de um interruptor para causar variação no campo magnético, pois a tensão a ser transformada é alternada.



**Figura 1.69**

Transformador monofásico.

O enrolamento que recebe a tensão da rede é o enrolamento primário, e o que fornece a tensão para a carga, o secundário. A mudança de valores de tensão e corrente é obtida pelo número de voltas (espiras) que cada enrolamento possui, de acordo com a seguinte regra:

- Se o enrolamento secundário possui menos voltas que o primário, o transformador é do tipo que abaixa a tensão.
- Se o enrolamento secundário possui mais voltas que o primário, o transformador é do tipo que eleva a tensão.

Essa regra pode ser descrita como a relação de transformação (RT):

$$RT = \frac{U_P}{U_S} = \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad (1.17)$$

em que:

- $U_P$  é a tensão no enrolamento primário (V);
- $U_S$ , a tensão no enrolamento secundário (V);
- $N_P$ , o número de espiras no enrolamento primário;
- $N_S$ , o número de espiras no enrolamento secundário;
- $I_P$ , a corrente no enrolamento primário (A);
- $I_S$ , a corrente no enrolamento secundário (A).

Perceba que a relação de transformação de corrente é inversa à da tensão, pois a diferença entre potência elétrica primária e secundária deve ser a menor possível para que o transformador tenha eficiência máxima, isto é, para que seja capaz de transformar a tensão elétrica com pouco consumo de energia.

O transformador será abordado com mais detalhes na seção 1.6.

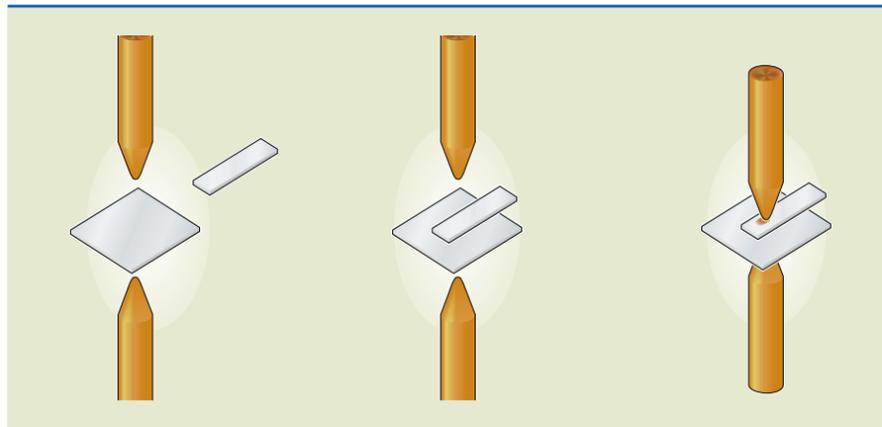


### Ponteadeira

Também chamada de solda a ponto, a ponteadeira é bastante utilizada na indústria automobilística para união de chapas. Seu princípio de funcionamento baseia-se no funcionamento do transformador, com o enrolamento secundário possuindo menos espiras que o primário; assim, a corrente elétrica é mais elevada.

**Figura 1.70**

Ponteadeira: fusão de chapas.



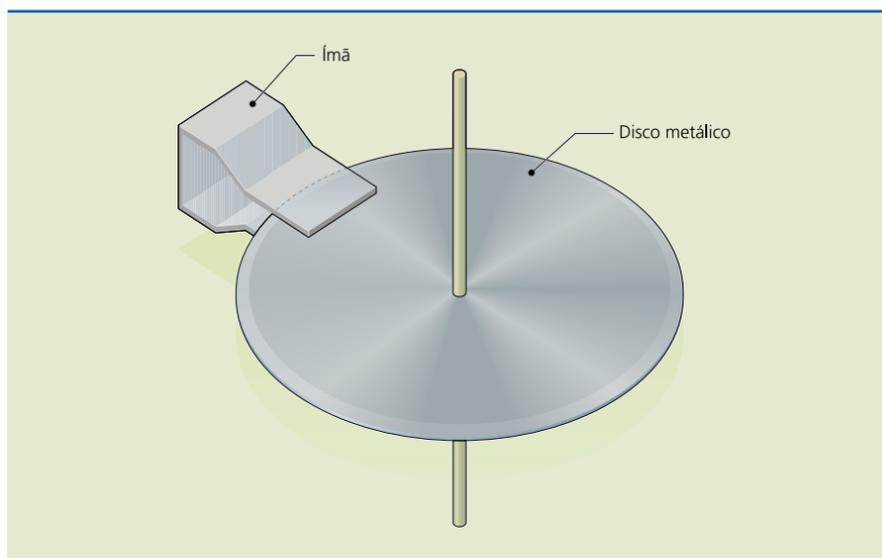
A ponteadeira funde duas chapas sem a necessidade de outro material (figura 1.70). Para isso, ao aproximar os dois eletrodos das chapas que se deseja unir, uma corrente elétrica as percorre, e a temperatura nesse ponto se eleva, fundindo-as sem que seja necessário adicionar outro material, como acontece em uma solda elétrica ou com estanho.

### Freio magnético

As correntes parasitas podem ser utilizadas para a construção de um freio magnético (figura 1.71).

**Figura 1.71**

Princípio do freio magnético.



Ao colocar uma peça maciça, como um disco metálico, em movimento dentro de um campo magnético (gerado pelo ímã permanente), as correntes parasitas que surgem geram outro campo magnético. Como há interação de campos magnéticos (do ímã permanente e das correntes parasitas), uma força magnética entra em oposição ao movimento (lei de Lenz), tendendo a frear o disco.

Os freios magnéticos são utilizados em máquinas operatrizes com CNC (comando numérico computadorizado, torno, fresa, retífica) e bicicletas ergométricas.

### Relógio de medição de energia elétrica

Nas residências, o aparelho que mede a energia elétrica é o relógio de medição (figura 1.72). Normalmente, ele se localiza próximo ao poste que recebe a fiação que alimenta a rede elétrica da residência.



**Figura 1.72**

Relógio de medição de energia elétrica.

O mecanismo de registro do consumo de energia é acionado por uma engrenagem, ligada ao eixo do circuito induzido. Um disco metálico fica submetido a diversos campos magnéticos alternados, fazendo surgir correntes parasitas que provocam o movimento de rotação do disco. Conforme a velocidade com que esse disco se movimenta, ele aciona um sistema de engrenagens que registra o valor em quilowatt-hora (kWh) consumido em determinado período, em geral um mês.

### Alicate-amperímetro

Muitas vezes é necessário medir a corrente elétrica sem interromper o circuito para ligar o amperímetro convencional. Nessas ocasiões, costuma-se utilizar o alicate-amperímetro digital (figura 1.73). Esse equipamento mede a corrente que percorre o campo magnético ao redor do fio sem a necessidade de fazer ligação em série.

No modelo da figura 1.73, quando o botão lateral é acionado, as pontas em formato de garra se abrem. Entre elas, coloca-se o fio cuja corrente elétrica se deseja avaliar. Como a corrente elétrica ao percorrer um fio gera campo magnético, o mecanismo indutivo do aparelho sente a ação desse campo e registra o valor da corrente no visor digital.



**Figura 1.73**

Alicate-amperímetro.



Vale salientar que o alicate-amperímetro mede apenas corrente alternada, e o núcleo que compõe as garras é laminado, para que as perdas por correntes de parasitas sejam minimizadas.

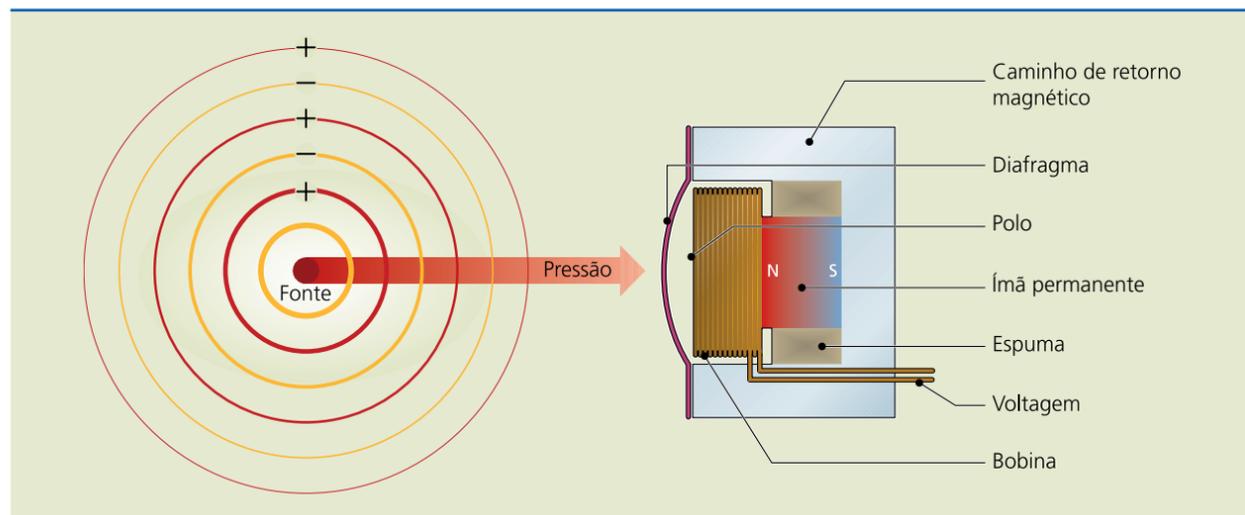
**Microfone**

Esse dispositivo funciona por indução eletromagnética, convertendo energia sonora em energia elétrica, ou seja, o contrário do alto-falante.

O microfone do tipo dinâmico é composto por um diafragma acoplado a uma pequena bobina imersa em um campo magnético uniforme (figura 1.74). Quando o som atinge o diafragma, provoca vibrações nessa membrana e, conseqüentemente, a bobina também se move. Por estar imersa em um campo magnético uniforme, esse movimento induz uma tensão em seus terminais, que varia em intensidade e frequência proporcionais à pressão do ar (som) no diafragma.

**Figura 1.74**

Microfone dinâmico.



**1.5 Circuitos magnéticos**

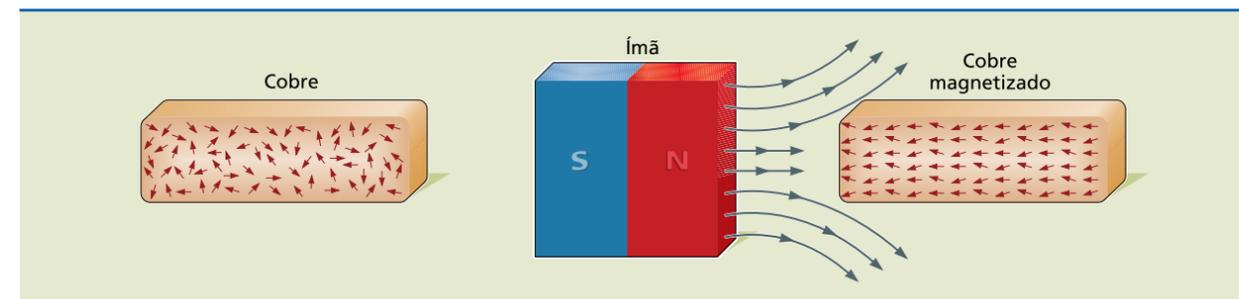
Circuito magnético é o espaço no qual o conjunto de linhas de indução magnética se manifesta. Para analisarmos um circuito magnético, devemos conhecer qual substância magnética é utilizada como núcleo e como o núcleo se comporta durante a magnetização e desmagnetização.

**1.5.1 Substâncias magnéticas**

Ao submeter uma amostra de cobre à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem pequena influência desse campo, ficando ligeiramente orientados em sentido contrário ao do campo magnetizante. Entre o cobre e o ímã manifesta-se, assim, uma pequena força de repulsão. As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas diamagnéticas (figura 1.75).

**Figura 1.75**

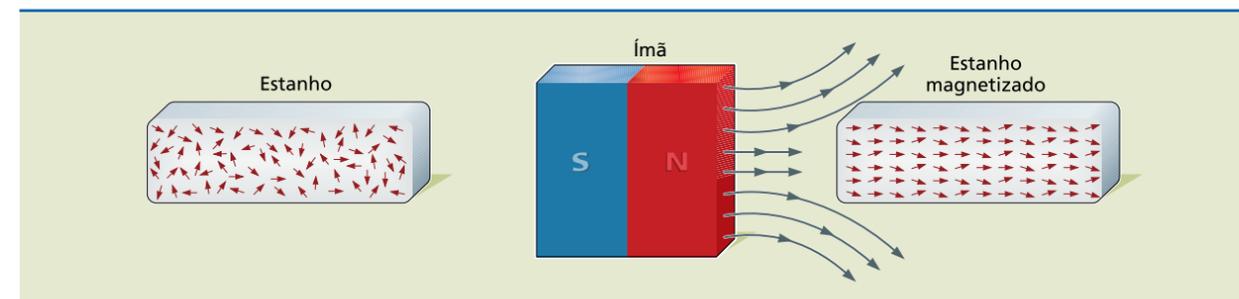
Substância diamagnética.



Ao submeter uma amostra de estanho à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem pequena influência desse campo, ficando ligeiramente orientados no mesmo sentido do campo magnetizante. Entre o estanho e o ímã manifesta-se, assim, uma pequena força de atração. As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas paramagnéticas (figura 1.76).

**Figura 1.76**

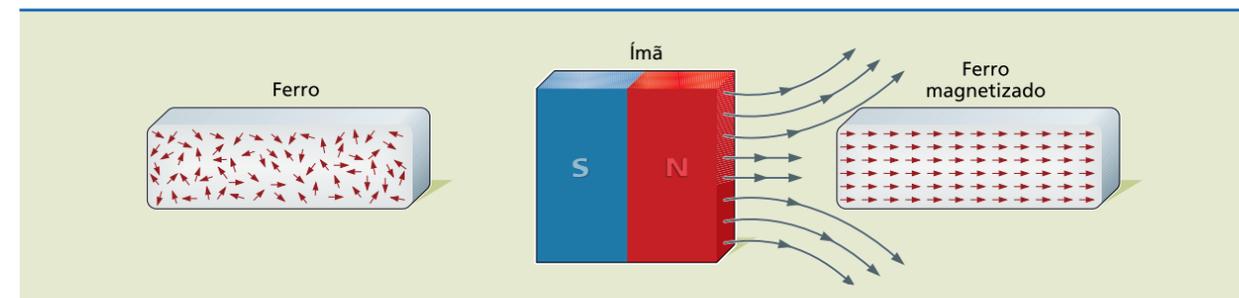
Substância paramagnética.



Ao submeter uma amostra de ferro à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem grande influência desse campo, ficando fortemente orientados no mesmo sentido do campo magnetizante. Entre o ferro e o ímã manifesta-se, assim, uma força de atração muito forte. As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas ferromagnéticas (figura 1.77).

**Figura 1.77**

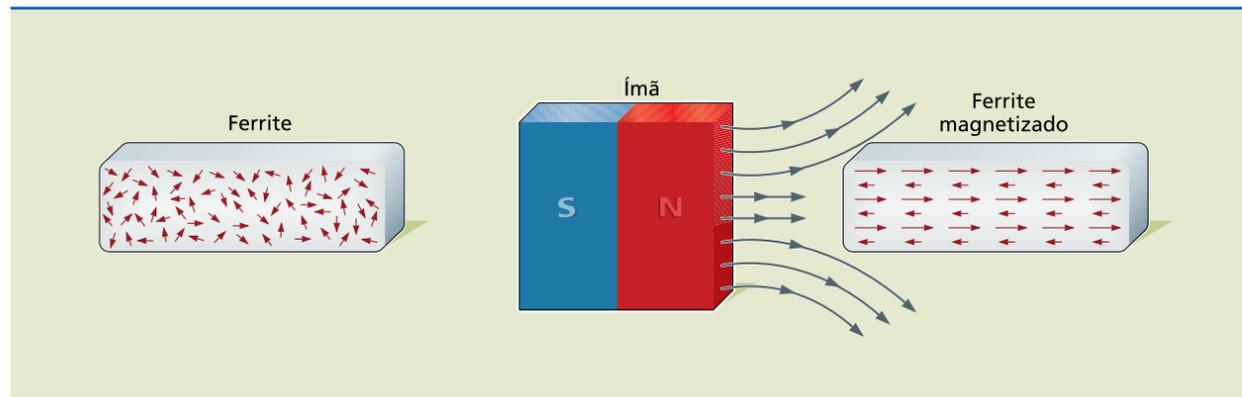
Substância ferromagnética.



Ao submeter uma amostra de ferrite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{FeO}$ ) à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem influência desse campo; a maioria deles fica fortemente orientada no mesmo sentido do campo magnetizante, e a minoria, fracamente alinhada em sentido contrário. As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas ferrimagnéticas (figura 1.78) e costumam ser empregadas na construção de cabeçotes de gravação e reprodução magnética.

**Figura 1.78**

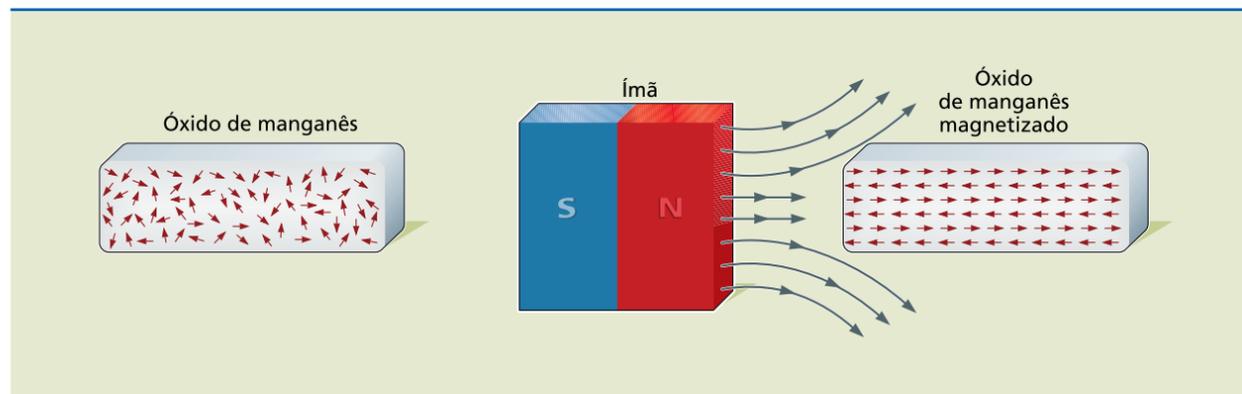
Substância ferrimagnética.



Ao submeter uma amostra de óxido de manganês ( $\text{MnO}$ ) à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem grande influência desse campo; uma parte fica fortemente orientada no mesmo sentido do campo magnetizante, e a outra, fortemente alinhada em sentido contrário.

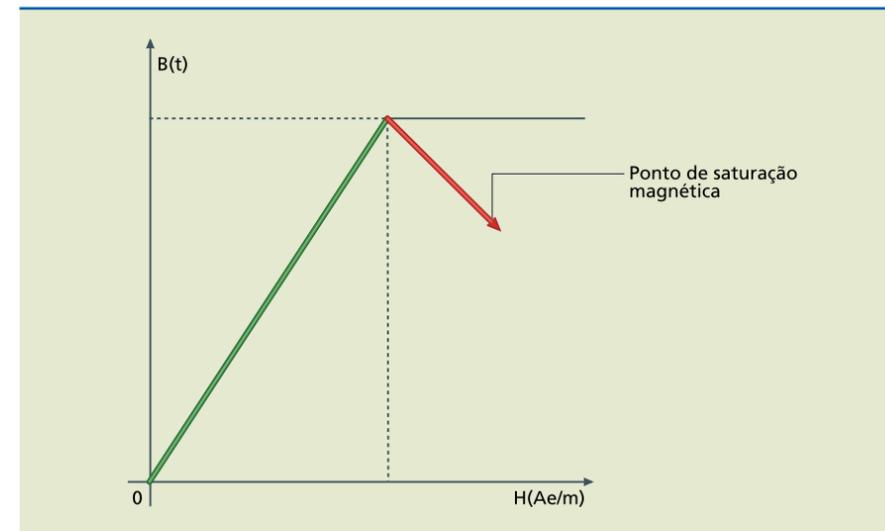
**Figura 1.79**

Substância antiferromagnética.



As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas antiferromagnéticas (figura 1.79) e costumam ser empregadas como blindagem magnética.

De acordo com o comportamento que apresentam ao serem submetidas à ação do campo magnético, as substâncias ferromagnéticas e ferrimagnéticas são usadas como núcleo de circuitos magnéticos. Essa utilização lhes é atribuída porque, na presença de campo magnético, elas se magnetizam fortemente, até um ponto em que todos os seus dipolos estejam orientados. Tal ponto é chamado de saturação magnética (figura 1.80).



**Figura 1.80**

Curva de magnetização.

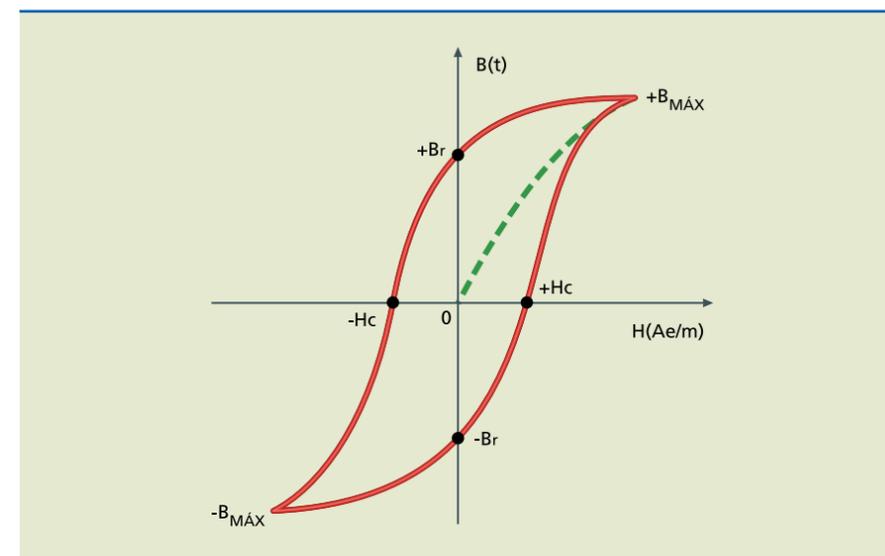
A relação entre B e H é conhecida como permeabilidade magnética:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.18)$$

em que:

- $\mu$  é a permeabilidade magnética, em terametro por ampere (Tm/A);
- B, a densidade magnética ou a densidade de fluxo, medida em tesla (T);
- H, a intensidade de campo magnético, medida em **ampere por metro** (A/m).

As substâncias magnetizáveis levam mais tempo para se desmagnetizar. Esse atraso é denominado histerese magnética (figura 1.81).



**Figura 1.81**

Histerese magnética.

É comum referir-se à unidade de intensidade de corrente quando produzida por espiras como ampere-espira. No entanto, o número de espiras, associado a essa "unidade" é adimensional, ou seja, não tem unidade. Assim, ampere-espira é o mesmo que ampere, a unidade do Sistema Internacional, que adotamos neste livro.



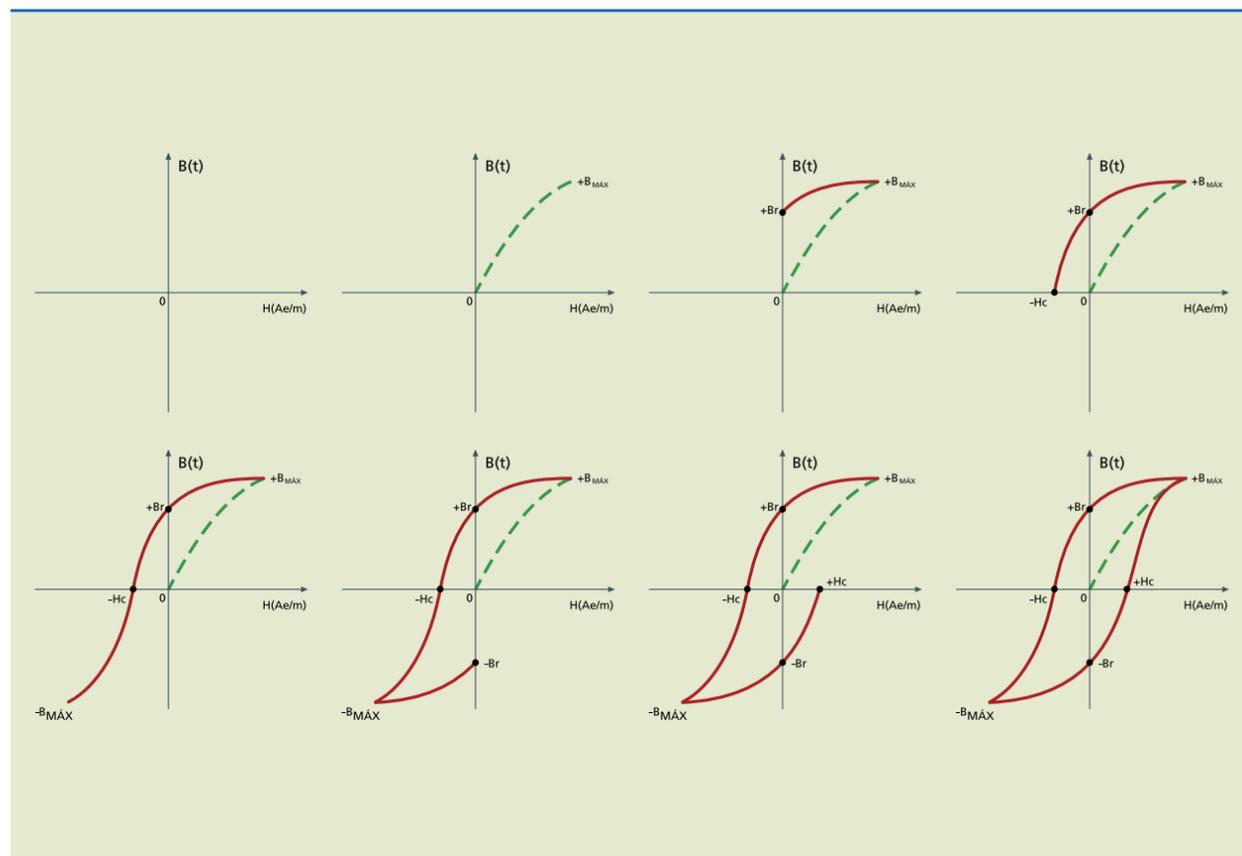
Vamos considerar um material ferromagnético submetido a um campo magnético (+H) proveniente de uma corrente elétrica, com ponto de saturação magnética (+B<sub>MÁX</sub>) atrelado a certa intensidade de corrente elétrica.

Se diminuirmos a corrente elétrica, o valor de H reduzirá. Ao atingir o valor zero, o magnetismo do corpo não desaparece, permanecendo uma densidade de fluxo magnético residual (+Br), denominado remanência ou retentividade.

Para reduzirmos a remanência, invertamos a corrente elétrica, o que origina um campo magnético de sentido contrário ao anterior (-H). Mantendo essa situação, se aumentarmos a intensidade de corrente até um valor em que uma força denominada coerciva (-H<sub>C</sub>) atue, a densidade de fluxo será reduzida a zero. No entanto, se elevarmos a corrente, ocorrerá novamente uma saturação magnética, só que de sentido contrário (-B<sub>MÁX</sub>). Ao reduzirmos a corrente mais uma vez a ponto de zerar o campo H, a remanência não desaparecerá (-Br). Então, invertamos a corrente novamente e aumentamos sua intensidade, a ponto de surgir a força coerciva (+H<sub>C</sub>). Se elevarmos a intensidade de corrente, obteremos o ponto de saturação inicial. Observe na figura 1.82 a representação gráfica das situações descritas anteriormente, finalizando com o laço de histerese, expressão usada para designar a curva fechada do gráfico quando o material adquire o estado de magnetização após um ciclo completo.

Figura 1.82

Laço de histerese magnética.



A substância submetida ao campo magnético realizará magnetização e desmagnetização percorrendo o laço de histerese. A curva de magnetização inicial somente ocorre na primeira magnetização do material.

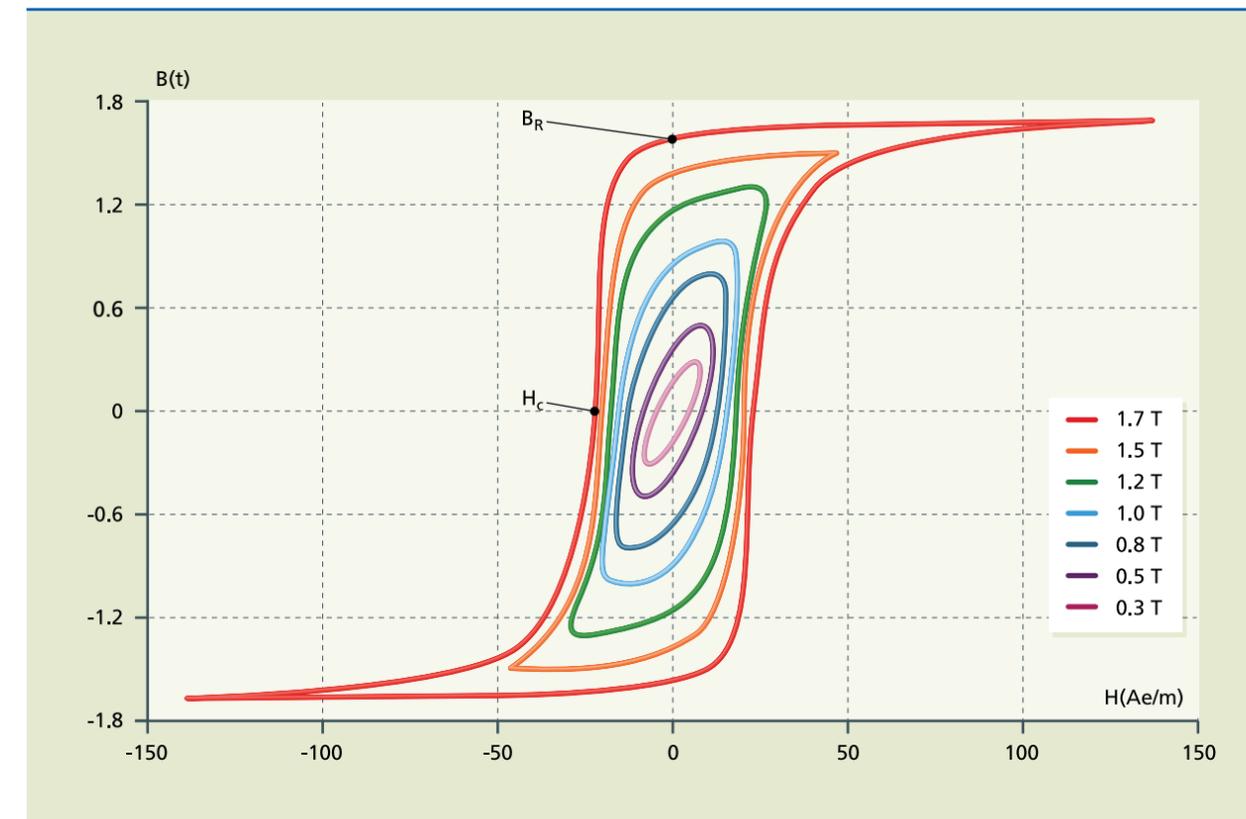
Esse fenômeno provoca perdas de energia, provenientes do aquecimento, pois o material ferromagnético necessita de considerável intensidade de potência elétrica para inverter o sentido de um campo magnético a fim de desmagnetizá-lo, como é o caso de eletroímãs.

Cada material apresenta um laço de histerese específico de acordo com as substâncias que o compõem. A escolha do melhor material depende do tipo de aplicação, para diminuir ao máximo as perdas por histerese magnética (quanto maior a área do laço, maior a perda). Por exemplo, em transformadores de alta potência, utiliza-se como núcleo uma liga de ferro-silício para que as perdas por histerese sejam mínimas.

O gráfico da figura 1.83 apresenta alguns laços de histerese.

Figura 1.83

Curvas típicas de histerese magnética.

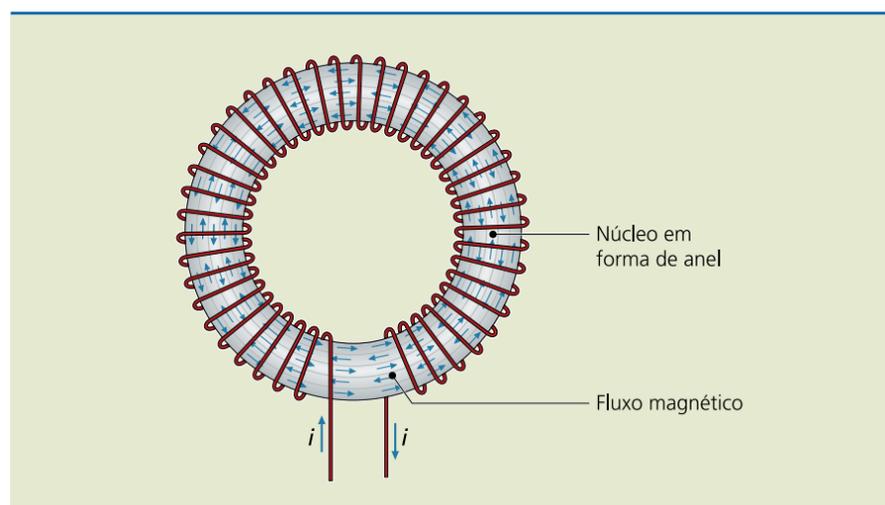


### 1.5.2 Circuitos magnéticos lineares

Circuito magnético é aquele percorrido pelo fluxo magnético (Φ). O toroide é um solenoide fechado (figura 1.84). Recebe a denominação de circuito magnético perfeito porque consegue concentrar em seu interior todo o fluxo magnético, sem dispersão.



**Figura 1.84**  
Toróide.



Se uma corrente  $i$  percorre o toróide de comprimento  $\ell$ , que possui  $N$  espiras, cria um campo magnético  $H$ . A expressão matemática que determina essa análise é:

$$H = \frac{N \cdot i}{\ell} \quad (1.19)$$

A magnetização do circuito ocorre de acordo com a relação  $\mu = \frac{B}{H}$ .

Como  $B = \mu \cdot H$  e  $\varphi = B \cdot A$ , portanto:

$$\varphi = B \cdot A \rightarrow \varphi = \mu \cdot H \cdot A \rightarrow \varphi = \mu \cdot \frac{N \cdot i}{\ell} \cdot A$$

$$N \cdot i = \varphi \cdot \frac{\ell}{\mu \cdot A} \quad (1.20)$$

Essa equação é a lei de Hopkinson, ou equação do circuito magnético. Fazendo uma analogia entre essa lei e a lei de Ohm, obtém-se:

$$U = i \cdot R \rightarrow N \cdot i = \varphi \cdot \frac{\ell}{\mu \cdot A} \quad (1.21)$$

O produto  $N \cdot i$  representa o trabalho realizado para que o fluxo magnético atravessasse o circuito (na verdade, é essa grandeza que origina o fluxo), comportando-se como tensão elétrica (ou força eletromotriz); o produto  $N \cdot i$  é chamado de força magnetomotriz (f.m.m.). O fluxo magnético é como se fosse a corrente  $i$ .

A grandeza  $\frac{\ell}{\mu \cdot A}$  pode ser relacionada com a resistência elétrica por analogia

com a lei de Ohm:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} \rightarrow \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\ell}{A} \quad (1.22)$$

em que  $R_M$  é a relutância magnética, medida em ampere-espira por weber (Ae/Wb):

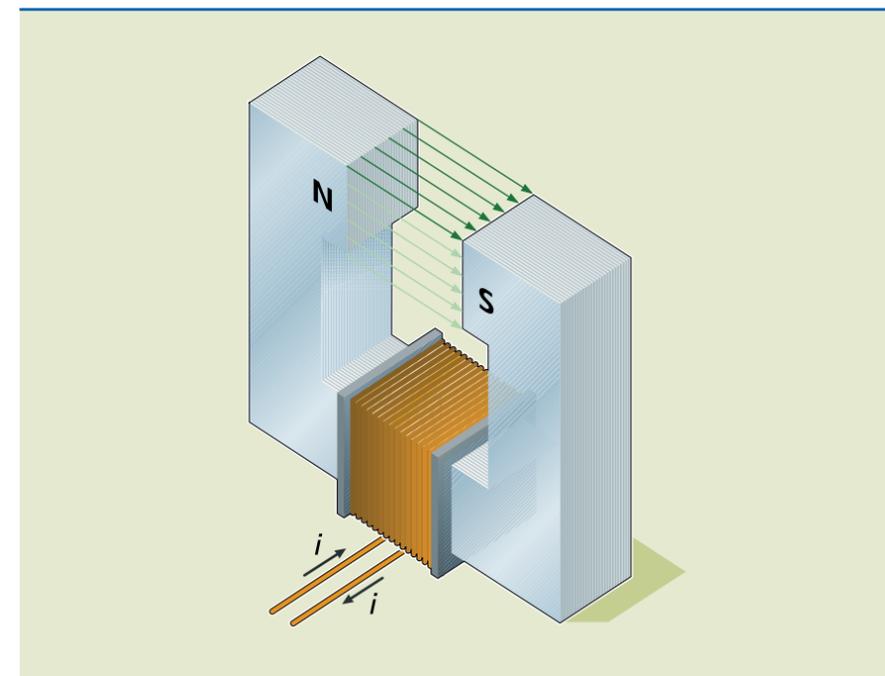
$$R_M = \frac{\ell}{\mu \cdot A} \quad (1.23)$$

Então, a equação do circuito magnético pode ser expressa por:

$$\text{f.m.m.} = \varphi \cdot R_M \quad (1.24)$$

em que f.m.m. =  $N \cdot i$  e  $\varphi = B \cdot A$ .

Além da bobina, responsável pelo campo magnético, e da substância magnetizável, alguns circuitos magnéticos apresentam um espaço entre os polos, conhecido como entreferro. A existência de um entreferro de ar (figura 1.85) aumenta a relutância magnética do circuito, uma vez que a permeabilidade do ar é muito baixa.



**Figura 1.85**  
Entreferro de ar.

### 1.5.3 Circuitos magnéticos não lineares

Aplicando em amostras de materiais ferromagnéticos um campo magnético crescente de intensidade  $H$ , obtêm-se os valores correspondentes de densidade de fluxo  $B$ , como mostra a figura 1.86. Vimos anteriormente que alguns materiais são melhores que outros em termos de magnetização, respeitada a devida aplicação prática. Contudo, esses materiais podem ter uma resposta não linear à magnetização, obrigando a uma análise por meio de gráficos, caso sejam utilizados em circuitos magnéticos. Os gráficos das figuras 1.86 e 1.87 mostram os aspectos de não linearidade para alguns materiais ferromagnéticos.



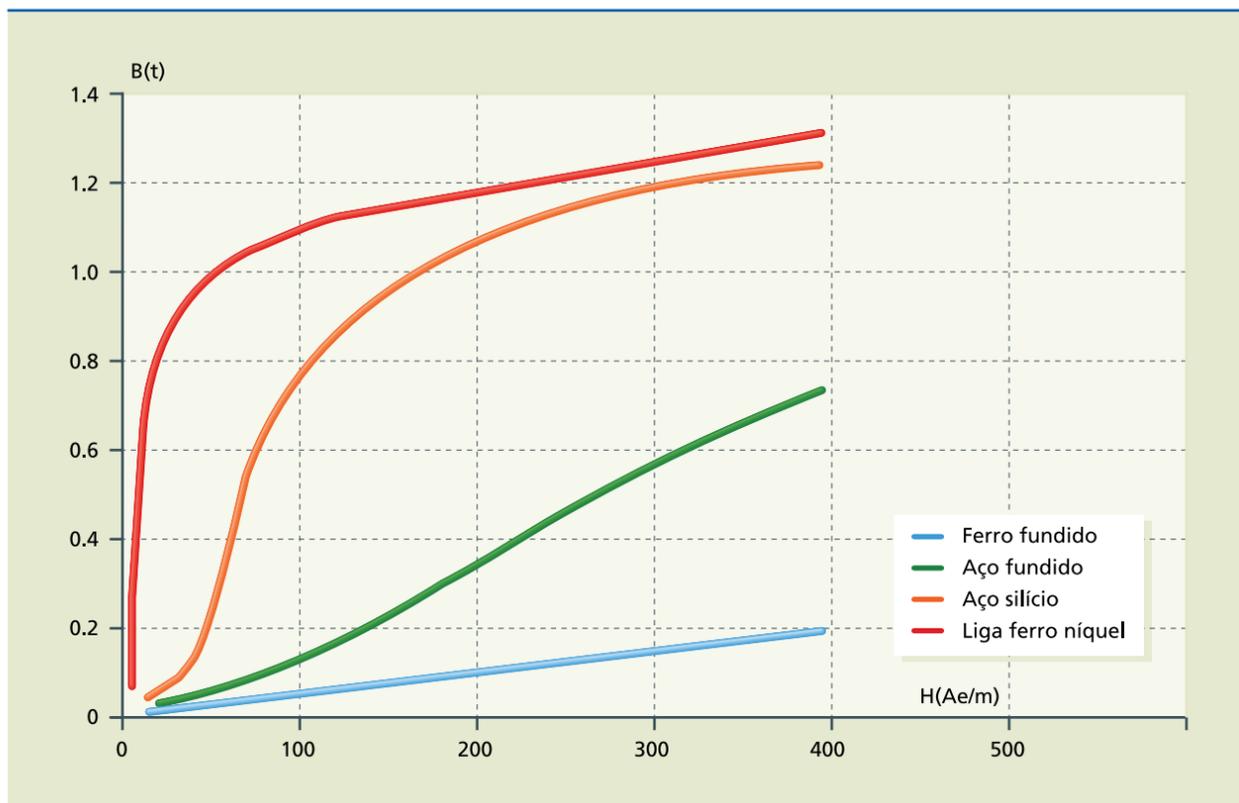
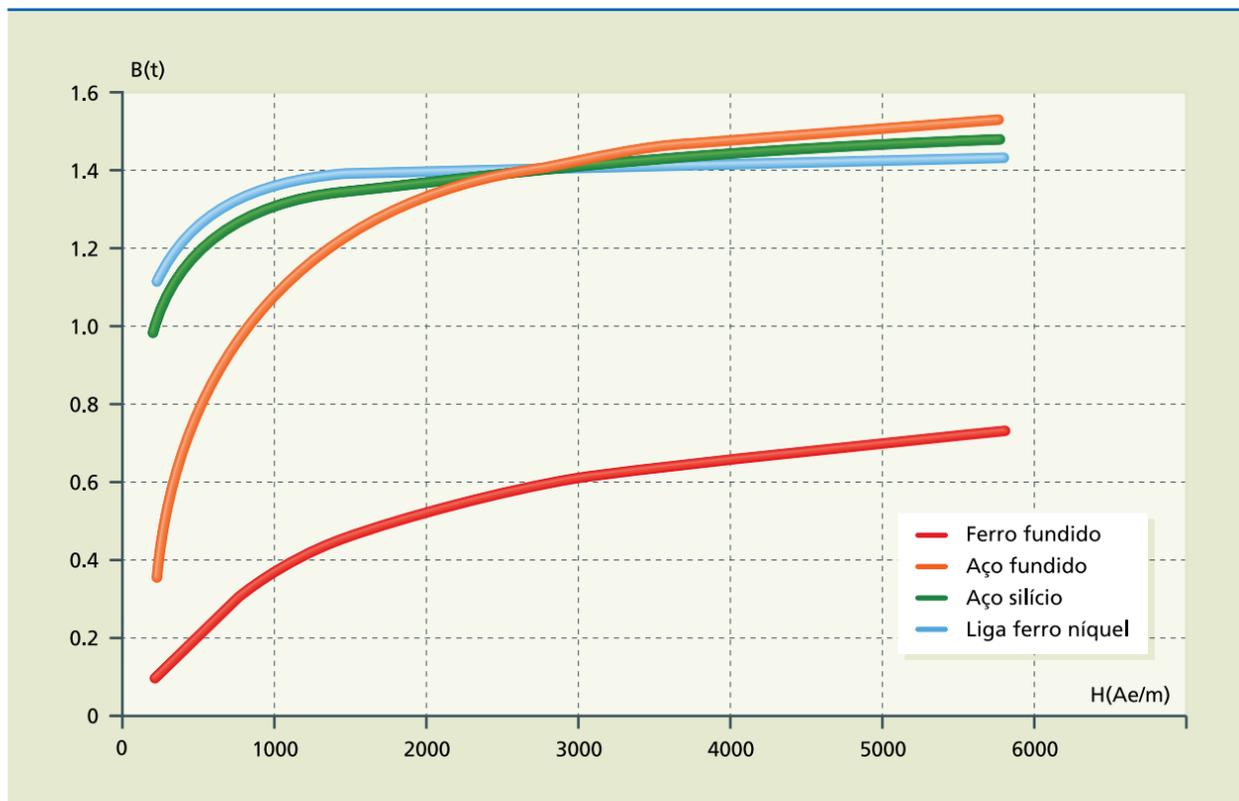


Figura 1.86

Curvas de magnetização para  $H < 400$  Ae/m.

Figura 1.87

Curvas de magnetização para  $H > 400$  Ae/m.



### Circuito magnético em série sem entreferro

Uma bobina com  $N$  espiras, percorrida por uma corrente  $i$ , produz uma força magnetomotriz (f.m.m.) que faz com que o fluxo magnético circule pelo núcleo formado por três materiais ferromagnéticos distintos e não lineares. Cada um desses materiais possui relutância magnética ( $R_M$ ) específica, o que provoca uma espécie de “queda” da f.m.m., definida pelo produto  $H \cdot \ell$ .

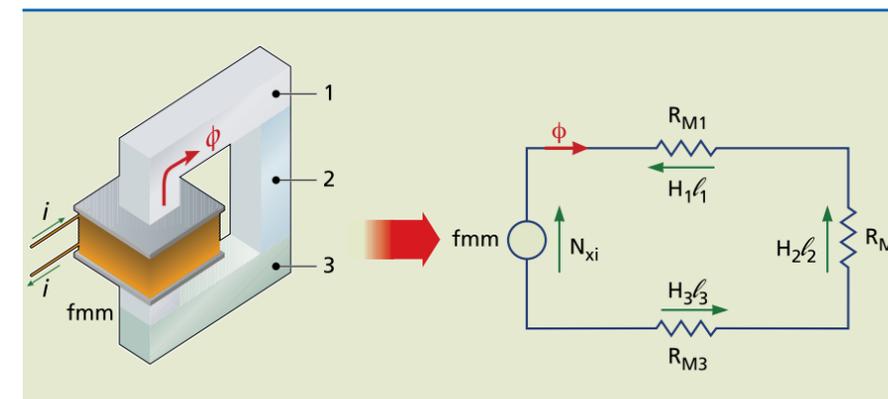


Figura 1.88

Circuito magnético não linear em série sem entreferro.

Analisando o circuito da figura 1.88, podem-se admitir:

$$fmm = N \cdot i$$

$$fmm = \phi \cdot R_{M_{EQU}}$$

e

$$R_{M_{EQU}} = R_{M1} + R_{M2} + R_{M3} \quad (1.25)$$

em que  $R_{M_{EQU}}$  é a relutância magnética equivalente do circuito.

Lembrando que  $R_M = \frac{\ell}{\mu \cdot A}$ , obtém-se:

$$fmm = \phi \cdot R_{M_{EQU}}$$

$$fmm = \phi \cdot (R_{M1} + R_{M2} + R_{M3})$$

$$fmm = \phi \cdot \left( \frac{\ell_1}{\mu_1 \cdot A_1} + \frac{\ell_2}{\mu_2 \cdot A_2} + \frac{\ell_3}{\mu_3 \cdot A_3} \right)$$

Efetuada a distributiva:

$$fmm = \left( \frac{\phi \cdot \ell_1}{A_1 \cdot \mu_1} + \frac{\phi \cdot \ell_2}{A_2 \cdot \mu_2} + \frac{\phi \cdot \ell_3}{A_3 \cdot \mu_3} \right)$$



Como  $B = \frac{\phi}{A}$ , então:

$$fmm = \left( \frac{B_1 \cdot l_1}{\mu_1} + \frac{B_2 \cdot l_2}{\mu_2} + \frac{B_3 \cdot l_3}{\mu_3} \right)$$

Sabe-se que  $H = \frac{B}{\mu}$ , logo:

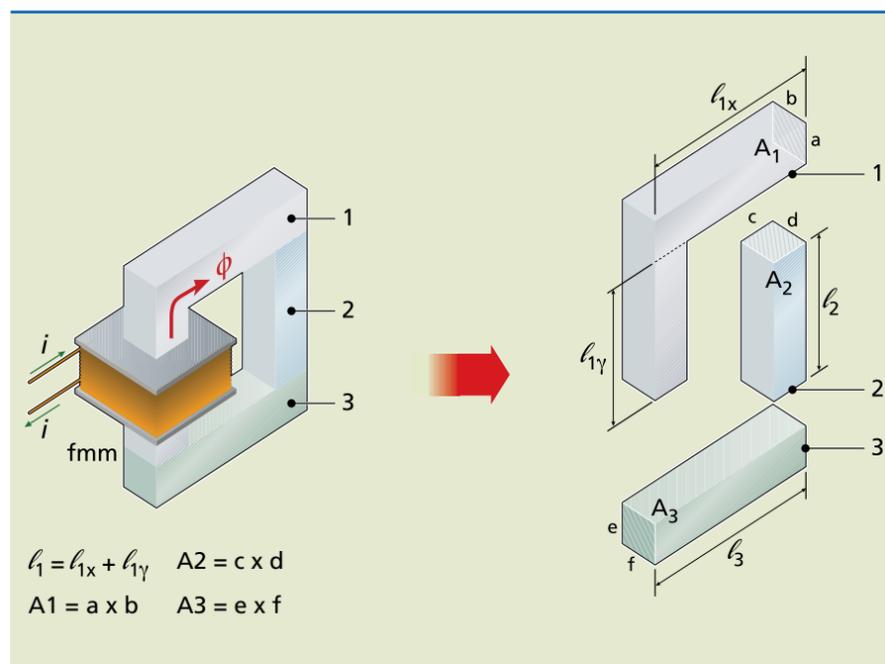
$$fmm = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3$$

Uma vez que o circuito é não linear, é preciso consultar os gráficos das curvas B-H (figuras 1.86 e 1.87) para obter os valores de H, desde que se conheçam os valores de B e os materiais ferromagnéticos a serem utilizados já estejam determinados.

A figura 1.89 mostra como se determinam os comprimentos e as áreas dos entreferros. Cada parte é calculada separadamente.

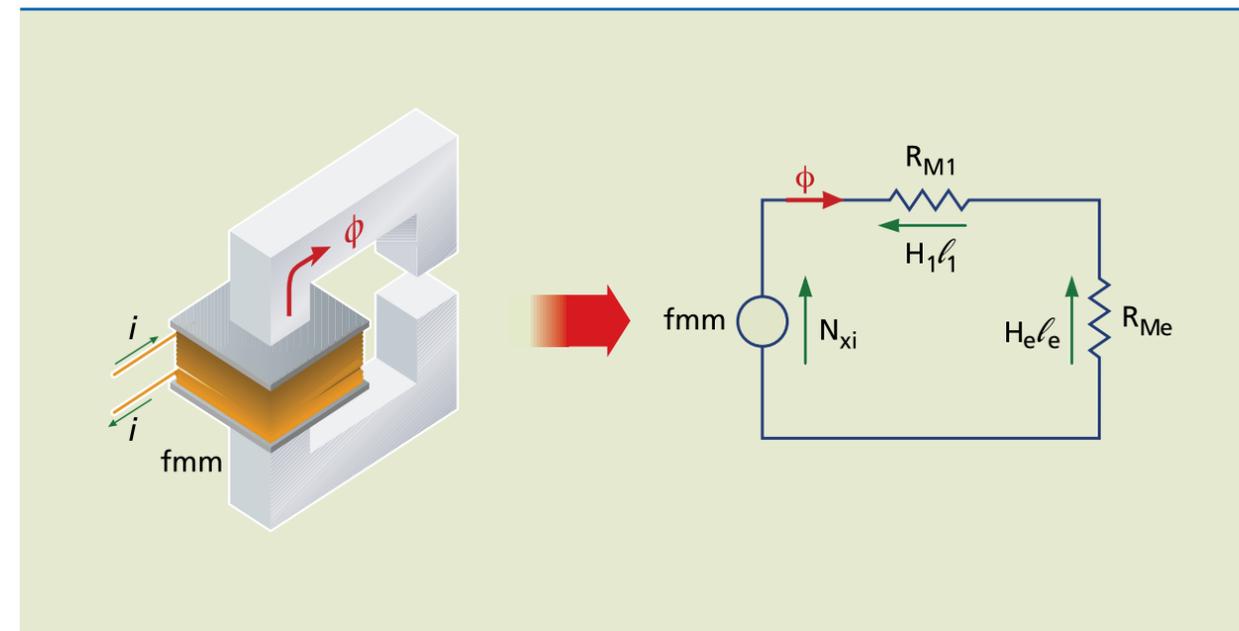
**Figura 1.89**

Circuito magnético não linear em série com entreferro de material não magnético.



**Circuito magnético em série com entreferro**

Os circuitos magnéticos com entreferro de ar são bastante utilizados. Suas dimensões têm de ser muito pequenas (o comprimento do entreferro não deve ultrapassar um décimo da menor dimensão do núcleo), pois a relutância do ar é muito alta, resultando em “queda” da f.m.m. maior que a do núcleo. Um exemplo de circuito de entreferro de ar é o do cabeçote de gravação magnética dos HDs (figura 1.90).



**Figura 1.90**

Circuito magnético não linear em série com entreferro de ar.

Nessas condições, as equações do circuito podem ser:

$$fmm = N \cdot i$$

$$fmm = \phi \cdot R_{MEQU} \quad (1.26)$$

ou

$$fmm = H_1 \cdot l_1 + H_e \cdot l_e$$

Calcula-se a relutância magnética equivalente por:

$$R_{MEQU} = R_{M1} + R_{Me}$$

lembrando que:

$$R_{M1} = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot A_1}$$

$$R_{Me} = \frac{l_e}{\mu_0 \cdot A_e}$$

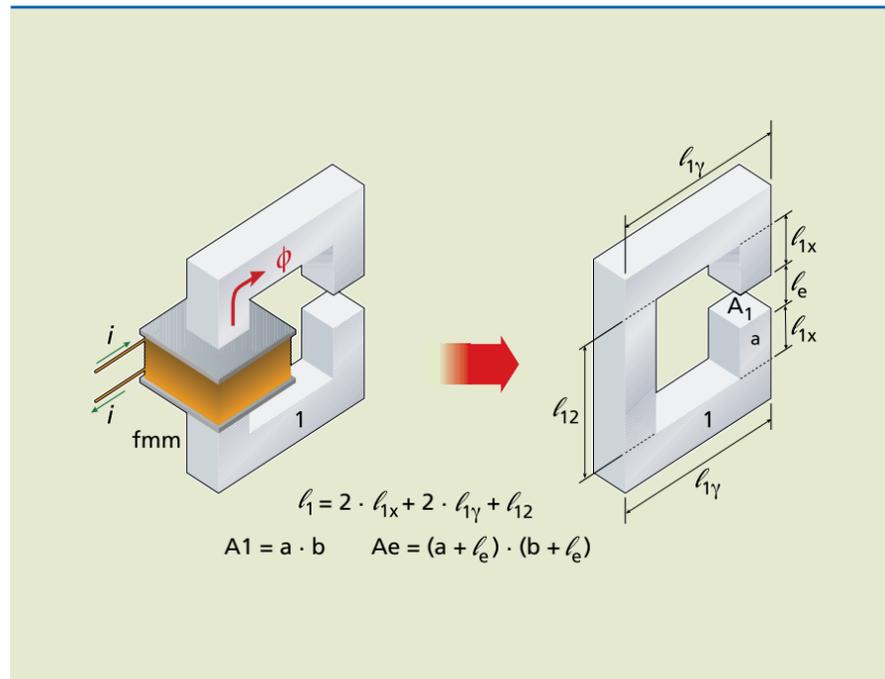
em que:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$$

Para determinar as dimensões do núcleo e do entreferro, procede-se como apresentado na figura 1.91.



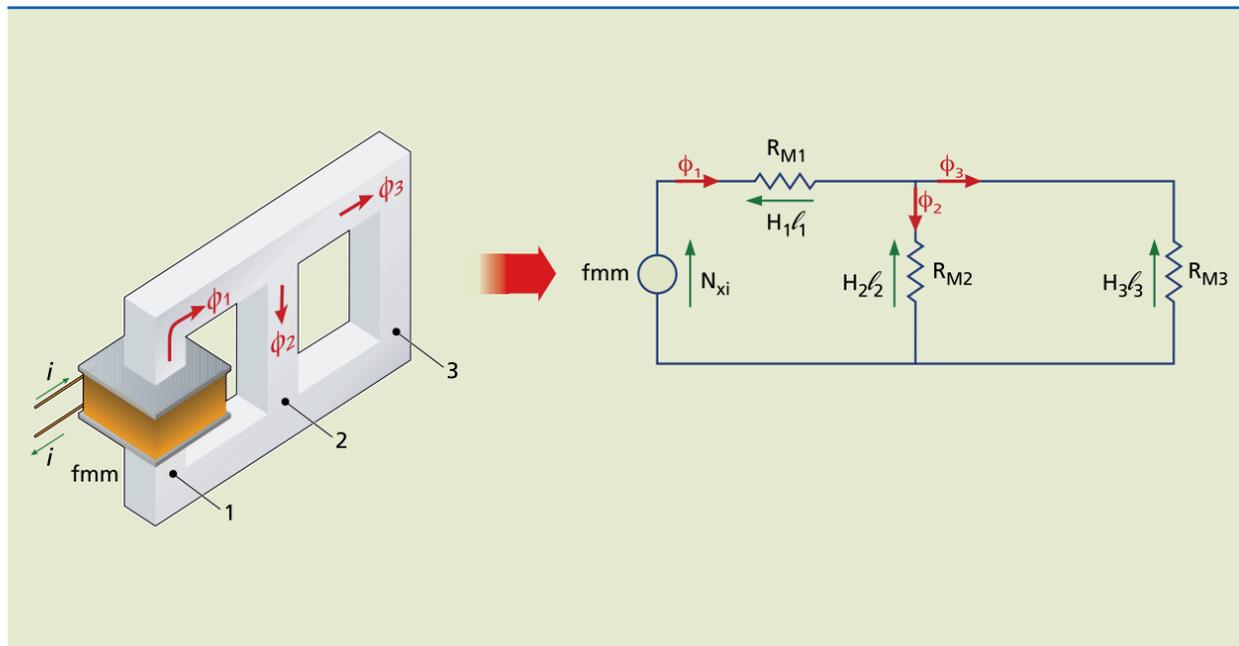
**Figura 1.91**  
Circuito magnético não linear em série com entreferro.



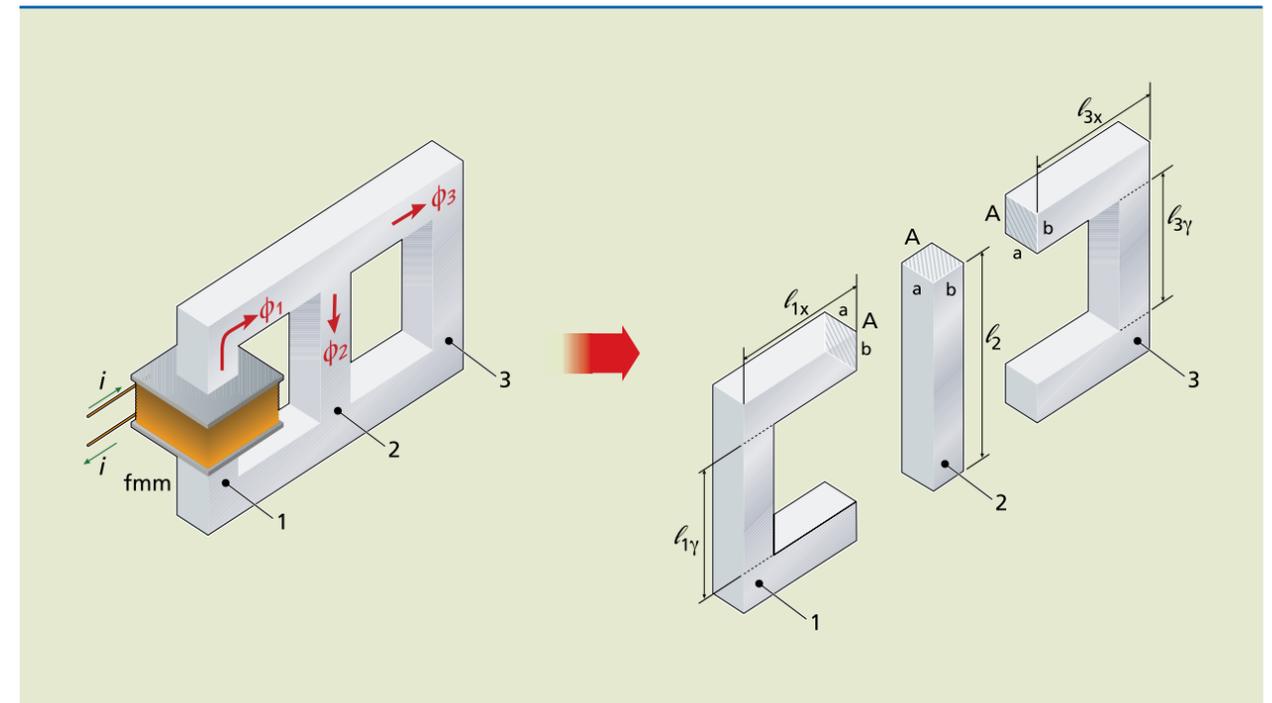
**Figura 1.92**  
Circuito magnético não linear paralelo sem entreferro.

**Circuito magnético em paralelo**

A análise de um circuito magnético paralelo é semelhante à de um circuito elétrico em paralelo (figura 1.92).



Nesse caso, o fluxo magnético total ( $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$ ), que não são iguais (mesmo que o núcleo seja homogêneo), pois os comprimentos das partes 2 e 3 são diferentes (figura 1.93).



**Figura 1.93**  
Circuito magnético não linear paralelo sem entreferro.

Como:

$$H_1 \cdot l_1 = R_{M1} \cdot \Phi_1, \text{ em que } R_{M1} = \frac{l_1}{\mu \cdot A_1},$$

$$H_2 \cdot l_2 = R_{M2} \cdot \Phi_2, \text{ em que } R_{M2} = \frac{l_2}{\mu \cdot A_2}, \text{ e}$$

$$H_3 \cdot l_3 = R_{M3} \cdot \Phi_3, \text{ em que } R_{M3} = \frac{l_3}{\mu \cdot A_3} \quad (1.27),$$

então, a força magnetomotriz é:

$$fmm = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2$$

ou

$$fmm = H_1 \cdot l_1 + H_3 \cdot l_3, \text{ já que } H_2 \cdot l_2 = H_3 \cdot l_3,$$

ou

$$fmm = N \cdot i \quad fmm = \Phi_1 \cdot R_{M_{EQU}}$$

em que:

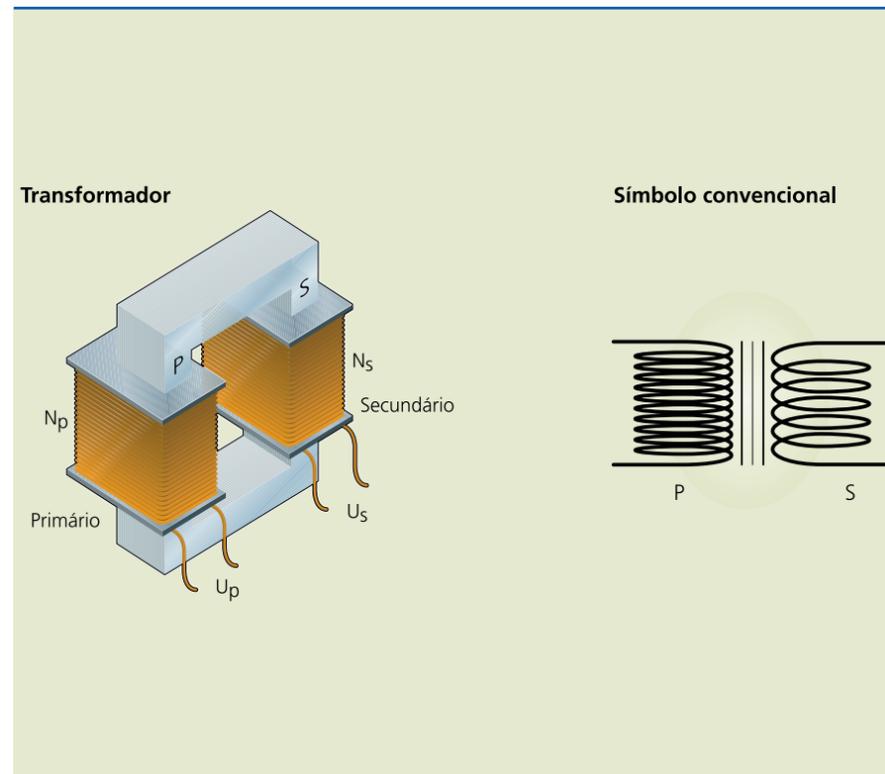
$$R_{M_{EQU}} = R_{M1} + \frac{R_{M2} \cdot R_{M3}}{R_{M2} + R_{M3}}$$



## 1.6 Transformadores

O fenômeno da indução eletromagnética possibilitou o desenvolvimento de inúmeros dispositivos, entre eles o transformador, capaz de alterar os valores da tensão e da corrente elétrica alternada (figura 1.94).

**Figura 1.94**  
Transformador elétrico.

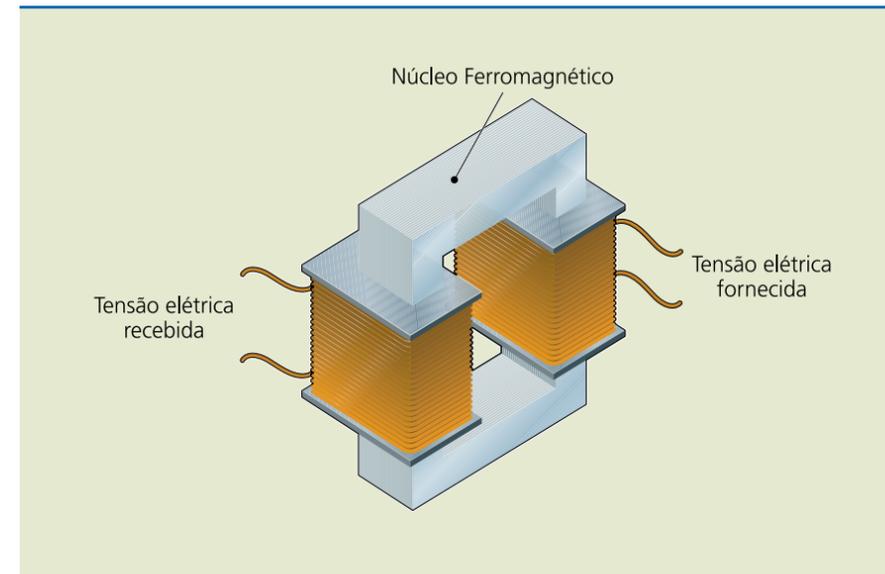


Em 1884, na exposição de eletricidade realizada na cidade de Turim, Itália, o inventor francês Lucien Gaulard apresentou um aparelho destinado a transmitir energia elétrica em grandes distâncias. Esse dispositivo, que funcionava por meio de corrente alternada, foi o primeiro transformador de uso industrial. A patente do invento foi comprada pelo empresário norte-americano George Westinghouse.

Anos mais tarde, Nikola Tesla, cientista sérvio naturalizado norte-americano, realizou estudos no campo do eletromagnetismo e foi autor de invenções importantíssimas utilizando transformadores. Pode ser atribuído a ele o desenvolvimento de todo o conceito e sistema de geração e transmissão de energia elétrica na forma alternada, além do aperfeiçoamento dos transformadores.

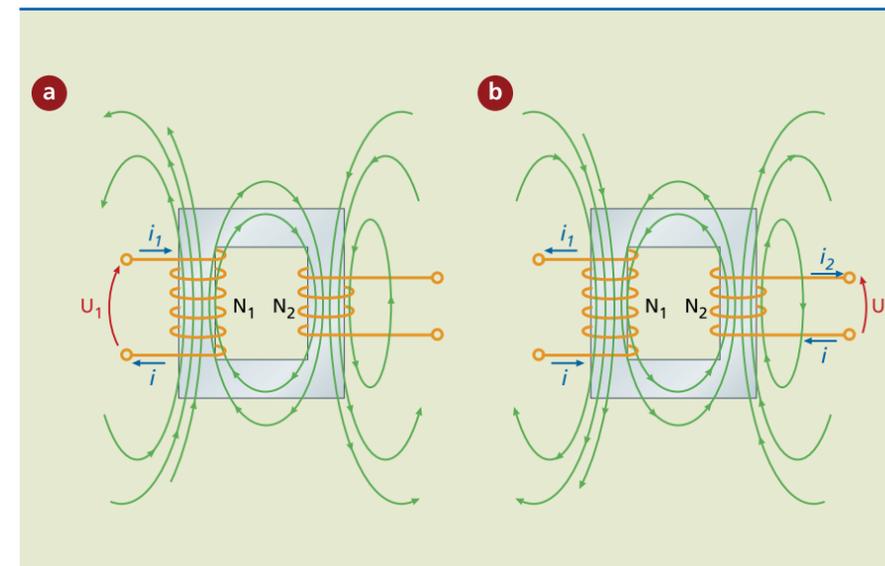
### 1.6.1 Transformador monofásico

O transformador é uma máquina elétrica estática, que altera a tensão e a corrente elétrica para valores adequados de acordo com a aplicação específica do projeto. Na figura 1.95, um transformador monofásico representado de maneira elementar.



**Figura 1.95**  
Transformador elétrico monofásico.

O enrolamento que recebe a tensão da rede é o enrolamento primário, e o que fornece tensão para a carga, o secundário. Os enrolamentos primário e secundário estão enrolados em um núcleo ferromagnético, porém eletricamente isolados. Essa separação entre o primário e o secundário está representada na figura 1.96.



**Figura 1.96**  
Princípio de funcionamento de um transformador.

Na figura, as grandezas indicadas são:

- $U_1$ , a tensão elétrica primária (V);
- $I_1$ , a corrente elétrica primária (A);
- $N_1$ , o número de espiras do enrolamento primário;
- $U_2$ , a tensão elétrica secundária (V);
- $I_2$ , a corrente elétrica secundária (A);
- $N_2$ , o número de espiras do enrolamento secundário.



Vamos analisar a figura 1.96a. Quando se aplica ao enrolamento primário uma tensão elétrica, cria-se uma corrente. Surge, então, um campo magnético, que alcança o enrolamento secundário, pois ambos compartilham o mesmo núcleo.

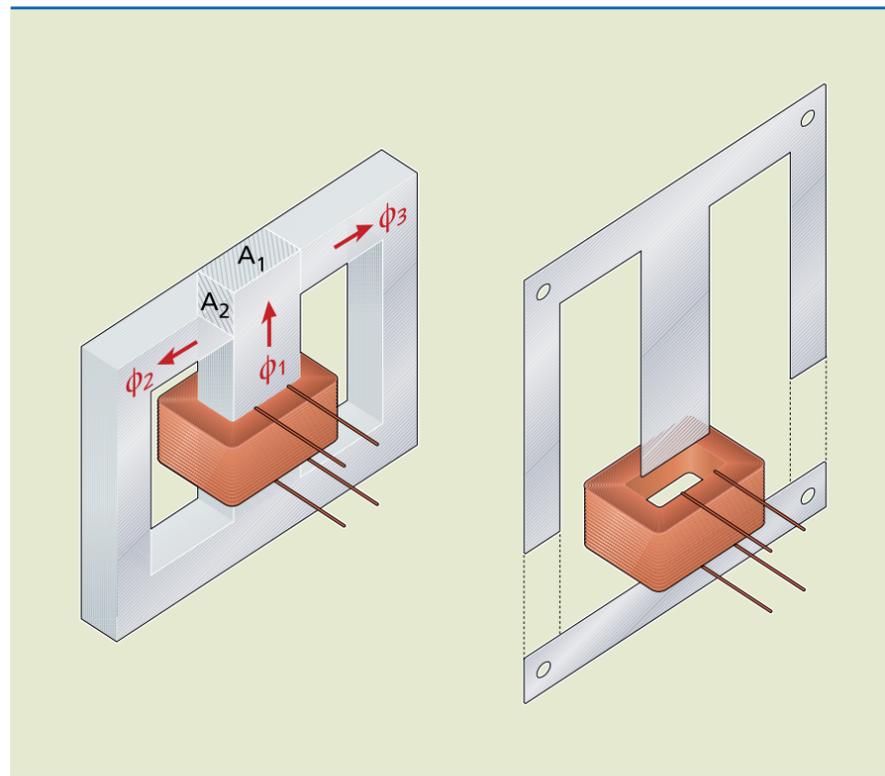
Observando agora a figura 1.96b, percebemos que, ao inverter o sentido da tensão no primário, o campo magnético também inverte de sentido. A inversão de sentido pode ser interpretada como movimento, e, de acordo com o princípio da indução eletromagnética, magnetismo associado a movimento gera eletricidade. Portanto, no enrolamento secundário, gera-se uma tensão elétrica, que, ao ser aplicada em uma carga, fornece uma corrente elétrica.

O transformador apresenta dispersão do fluxo magnético por correntes parasitas. Para minimizar essas perdas por histerese, seu núcleo é composto por lâminas, feitas de uma liga metálica especial.

O transformador monofásico é construído de maneira diferente do transformador elementar (figura 1.97).

**Figura 1.97**

Transformador monofásico.

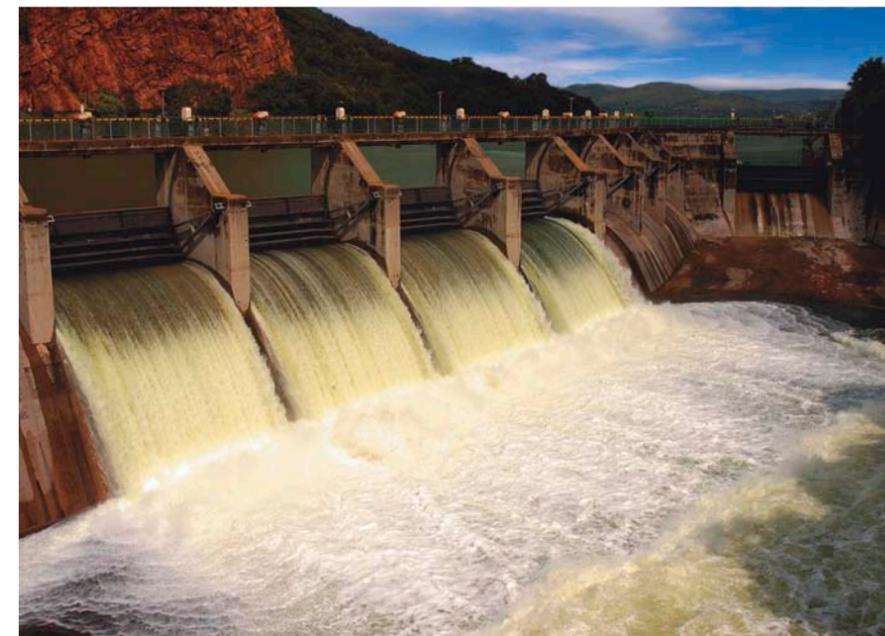


Os enrolamentos, montados em um carretel e separados por papel isolante, ficam posicionados no centro do núcleo. O núcleo é composto por lâminas nos formatos “E” e “I”. Na lâmina “E”, a área da seção transversal do centro é o dobro da área da seção transversal das laterais; com isso, o fluxo magnético gerado no centro se divide em duas partes iguais nas laterais. Assim, a densidade de fluxo magnético  $B$  ( $B = \frac{\Phi}{A}$ ) é constante para todo o núcleo.

Uma das aplicações dos transformadores é na alteração da tensão e da corrente elétrica nas usinas geradoras de energia elétrica, possibilitando que elas atendam o maior número possível de consumidores finais que utilizam a tensão em diferentes valores: industrial, comercial e residencial. As usinas hidroelétricas usam a água dos reservatórios de grandes lagos ou rios para mover as turbinas (figura 1.98). Já as usinas termoeletricas empregam combustíveis fósseis ou energia nuclear, cujo vapor faz girar as turbinas. Em geral, as usinas hidroelétricas e termoeletricas ficam distantes dos grandes consumidores de energia elétrica, e esta chega até eles por meio de linhas de transmissão, estações e subestações. Durante o percurso, são utilizados inúmeros transformadores, que não apenas alteram o valor da tensão e controlam a corrente, como mantêm a potência elétrica estável e reduzem as perdas por efeito Joule. Outra vantagem dos transformadores é que os cabos usados na linha de transmissão não precisam ser muito grossos.

**Figura 1.98**

Usina hidroelétrica.



Vamos acompanhar o percurso desde a usina de geração de energia até os consumidores. Normalmente, a usina gera tensão na ordem de 10 000 V, que o transformador elevador de tensão aumenta para 150 000 a 400 000 V. Não se eleva a tensão acima de 400 000 V para evitar o efeito corona (uma espécie de descarga elétrica através do ar), que causa perda de energia.

Para ser transportada em grandes distâncias, a energia elétrica segue por cabos instalados em linhas de transmissão (figura 1.99). Por ficarem suspensos, os cabos da linha de transmissão não oferecem risco às pessoas, motivo pelo qual não recebem revestimento isolante. Eles são compostos por um trançado de alumínio com aço que garante a condutibilidade e resistência mecânica para suportar o próprio peso, as mudanças climáticas e os fortes ventos.



**Figura 1.99**  
Linha de transmissão.



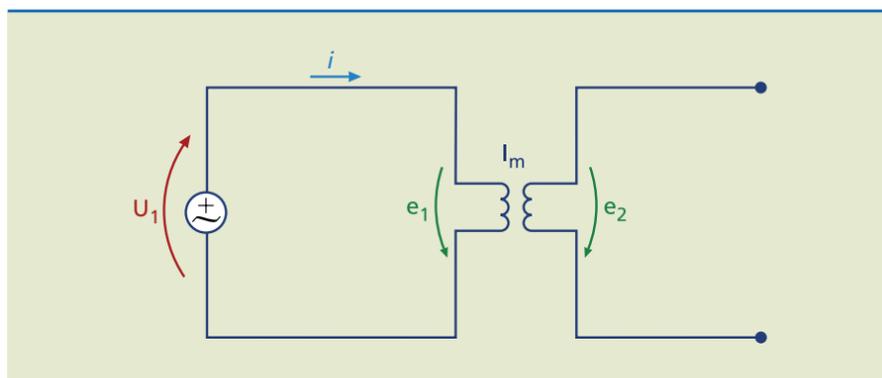
Durante a transmissão, ocorrem perdas de energia nos cabos, porque estes, apesar de apresentarem baixa resistência elétrica, são muito longos. Para amenizar as perdas, instalam-se subestações de energia. Assim, quando a tensão é mais uma vez elevada, as perdas são compensadas.

Ao chegar próximo aos consumidores, a tensão deve ser reduzida, para não oferecer risco à vida e também para fazer funcionar os aparelhos elétricos, eletrônicos e eletroeletrônicos na tensão adequada.

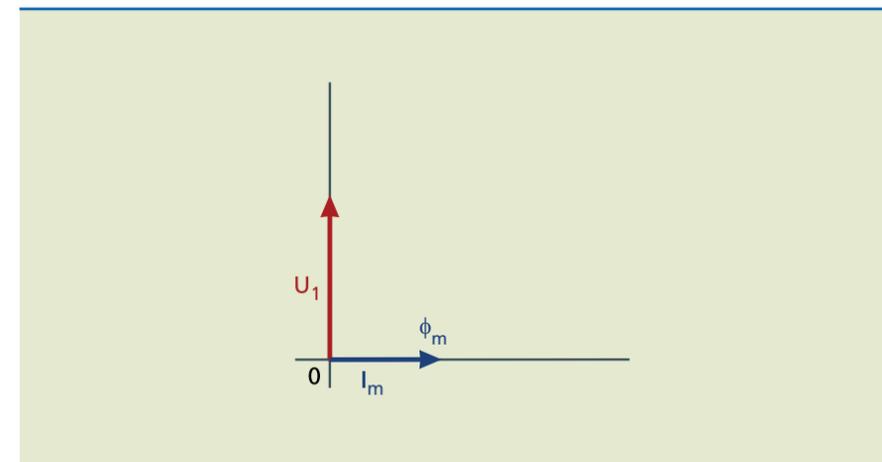
### 1.6.2 Transformador ideal

O transformador ideal é aquele que funciona sem apresentar perdas. Na prática, ele não existe, mas, na teoria, pode ser representado conforme a figura 1.100.

**Figura 1.100**  
Transformador em vazio.

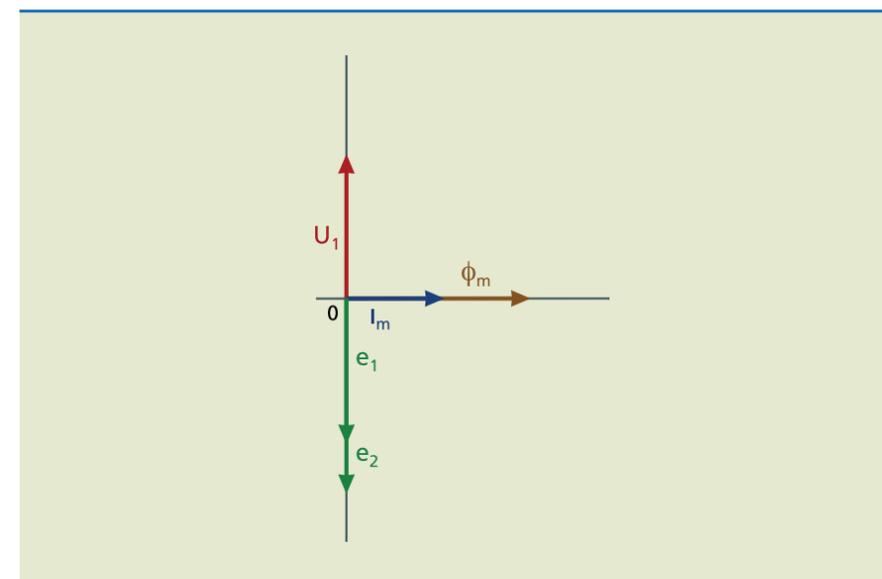


Analisando essa figura, percebemos que, ao aplicar a tensão  $U_1$  no primário, com o secundário sem carga (em aberto), o transformador absorve uma corrente elétrica de magnetização ( $I_m$ ). Como o circuito é indutivo, a tensão  $U_1$  está adiantada em  $90^\circ$  em relação a essa corrente (figura 1.101).



**Figura 1.101**  
Tensão no primário e corrente de magnetização.

A corrente  $I_m$  gera o fluxo magnético ( $\phi_m$ ) no núcleo do transformador, o qual induz a força contraeletromotriz (f.c.e.m.) nos enrolamentos primário ( $e_1$ ) e secundário ( $e_2$ ), conforme ilustrado na figura 1.102.



**Figura 1.102**  
Tensões induzidas no transformador.

As forças contraeletromotrices  $e_1$  e  $e_2$  estão defasadas de  $180^\circ$  em relação a  $U_1$  (o motivo dessa defasagem foi abordado na seção 1.4.1, sobre a lei de Lenz). Então, pela lei de Faraday-Neumann, temos:

$$e_1 = -N_1 \cdot \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t} \quad e \quad e_2 = -N_2 \cdot \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t} \quad (1.28)$$



A relação entre  $e_1$  e  $e_2$  pode ser determinada por:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1 \cdot \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t}}{-N_2 \cdot \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t}} \quad \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.29)$$

Como o núcleo apresenta relutância magnética, a força magnetomotriz ( $N_1 \cdot I_m$ ) vale  $f.m.m. = R_m \cdot \phi_m$ , ou seja, o transformador funciona graças à relação entre  $U_1$  e  $e_1$ . Desse modo, como estamos considerando um transformador ideal, podemos substituir  $e_1$  por  $U_1$  e  $e_2$  pela tensão que se manifesta nos terminais do secundário,  $U_2$ . Assim, a relação de transformação da tensão é:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.30)$$

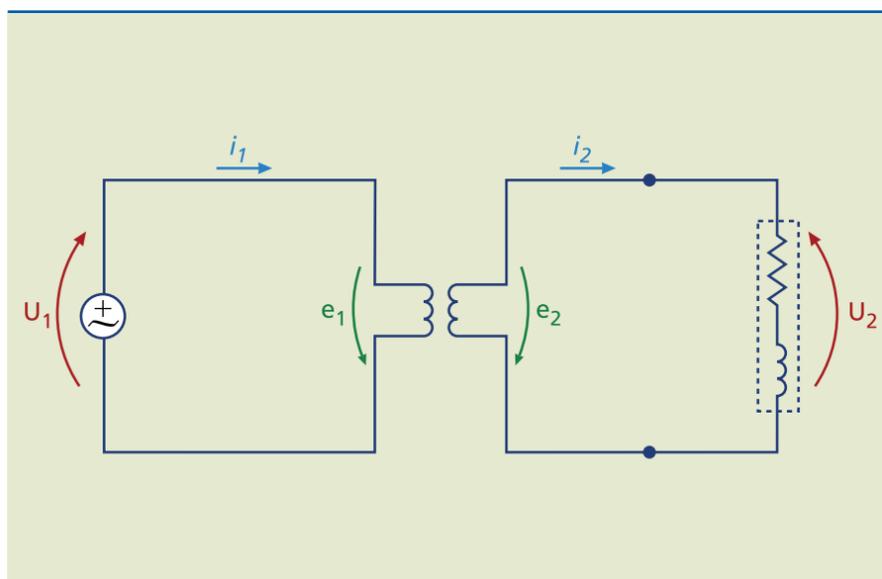
Observando essa equação, notamos que:

- Para que um transformador eleve a tensão, o número de espiras do enrolamento secundário deve ser maior que o do primário.
- Para que um transformador abaixe a tensão, o número de espiras do enrolamento secundário deve ser menor que o do primário.

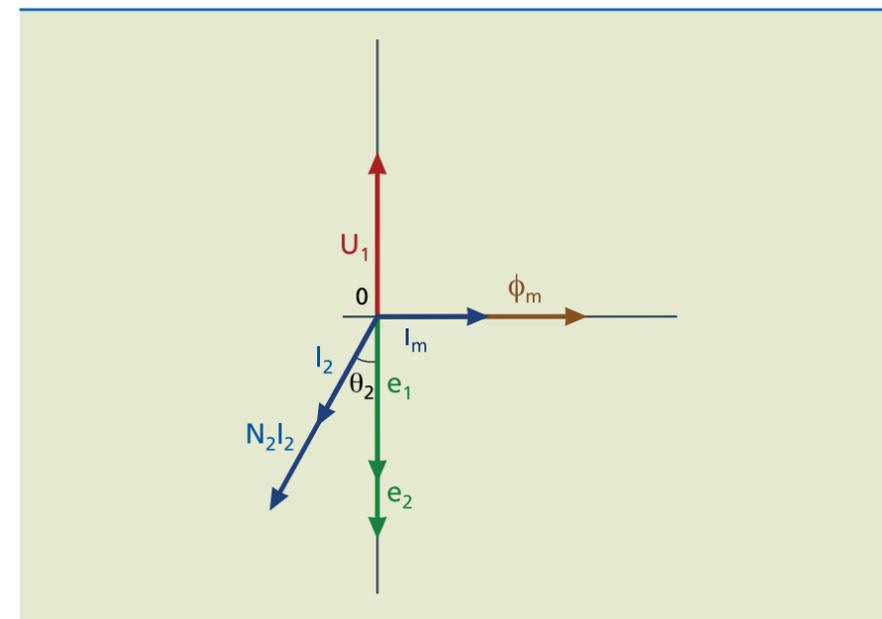
Vamos analisar agora o funcionamento de um transformador com carga no secundário (figura 1.103).

**Figura 1.103**

Transformador com carga.



Ao colocar uma carga no secundário, haverá uma corrente  $I_2$  circulando, atrasada de um ângulo  $\theta_2$  em relação a  $e_2$  (figura 1.104).



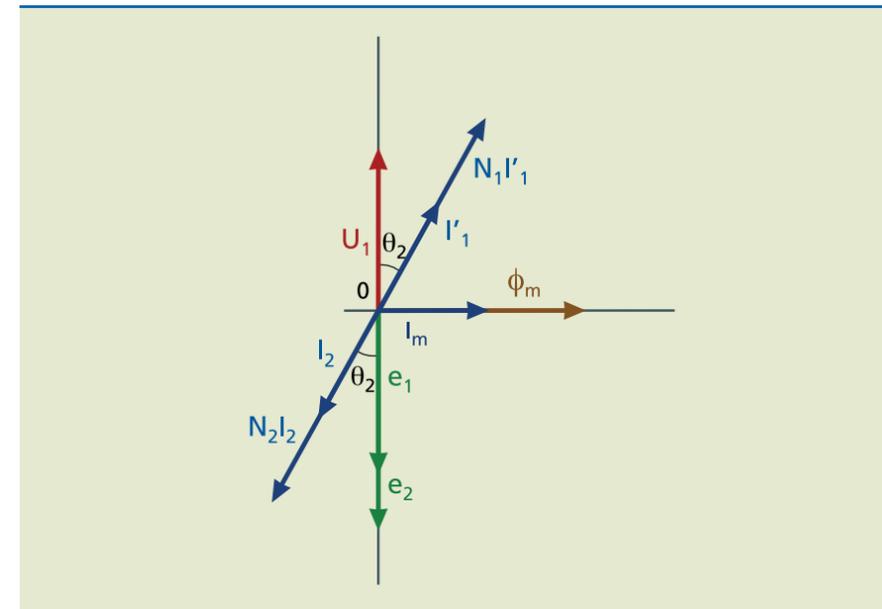
**Figura 1.104**

Corrente no secundário.

A corrente  $I_2$  gera uma força magnetomotriz  $f.m.m._2$ . Essa força, conseqüentemente, altera o equilíbrio do sistema obtido em função do fluxo mútuo  $\phi_m$ , que foi proporcionado pela  $f.m.m.$  produzida ( $N_1 \cdot I_m$ ). Nessas condições, o transformador absorve uma corrente elevada de tal maneira que o equilíbrio entre  $U_1$  e  $e_1$  se restabelece. Assim, além de circular uma corrente magnetizante  $I_m$  no primário, haverá uma corrente de reação  $I'_1$ , cuja finalidade é gerar uma  $f.m.m.$  para compensar a  $f.m.m._2$ . Com isso, a  $f.m.m.$  resultante do sistema continuará sendo a gerada por  $N_1 \times I_m$ . A figura 1.105 ilustra essa situação.

**Figura 1.105**

Corrente de reação  $I'_1$ .



Essa corrente de reação deve variar juntamente com a corrente no secundário, o que acontecerá se a carga instalada no secundário variar de valor.



Temos, então:

$$N_2 \cdot I_2 = N_1 \cdot I'_1$$

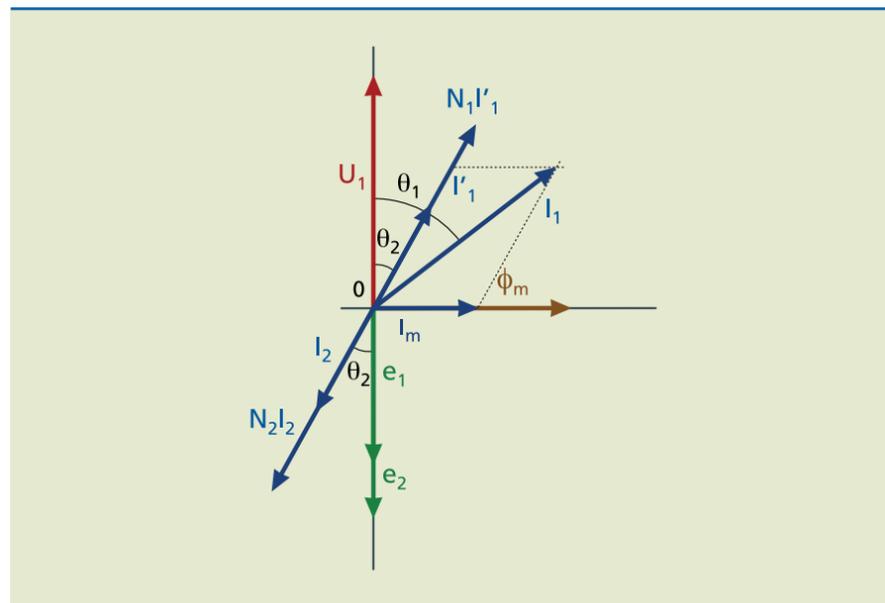
ou seja:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I'_1} \quad (1.31)$$

A resultante entre as correntes de magnetização e de reação é a corrente no primário (figura 1.106).

**Figura 1.106**

Corrente do enrolamento primário.



Com base nessas análises, é possível concluir que a corrente elétrica do enrolamento primário é formada por duas parcelas: a primeira magnetiza o núcleo e a segunda contrabalança a força magnetomotriz secundária. Podemos, então, analisar esse diagrama fasorial de duas maneiras:

- **Com carga reduzida** – A corrente no secundário é muito baixa; assim, a corrente de reação  $I'_1$  também será baixa. Então, o ângulo  $\theta_1$  tende a ser de  $90^\circ$ , aproximando  $I_1$  de  $I_m$ .
- **A plena carga** – A corrente no secundário é alta; assim, a corrente de reação  $I'_1$  também será alta, resultando em uma corrente de magnetização muito baixa, e um ângulo  $\theta_1$  tendendo a  $0^\circ$ , o que aproxima  $I_1$  de  $I'_1$ .

Como na maioria das vezes o transformador estará ligado a plena carga, podemos utilizar a expressão que representa a relação de transformação da corrente elétrica:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.32)$$

Analisando essa equação, podemos concluir que, se a tensão no secundário for aumentada, sua corrente diminuirá e vice-versa; assim, um transformador ideal manteria a potência elétrica inalterada ( $P_1 = P_2$ ), com eficiência de 100%. No entanto, como o transformador tem características indutivas, os enrolamentos apresentam impedância, medida em ohms, que pode ser determinada por:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad \text{e} \quad Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (1.33)$$

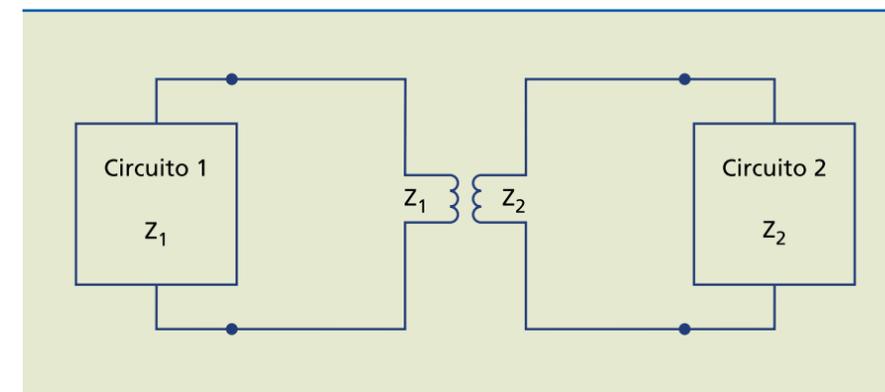
Dividindo  $Z_1$  por  $Z_2$ , a relação entre as impedâncias passa a ser:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\frac{U_1}{I_1}}{\frac{U_2}{I_2}} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{I_1} \cdot \frac{I_2}{U_2} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1}$$

ou seja:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

Conhecendo essa relação, é possível utilizar o transformador para acoplar dois circuitos de impedâncias distintas. Por exemplo, para que haja máxima transferência de potência entre um circuito e outro, suas impedâncias têm de ser iguais. Como na maioria das vezes isso não ocorre, pode-se usar o transformador para realizar o casamento de impedâncias (figura 1.107), bastando proceder à relação de espiras dos enrolamentos.



**Figura 1.107**

Transformador utilizado para casamento de impedâncias.

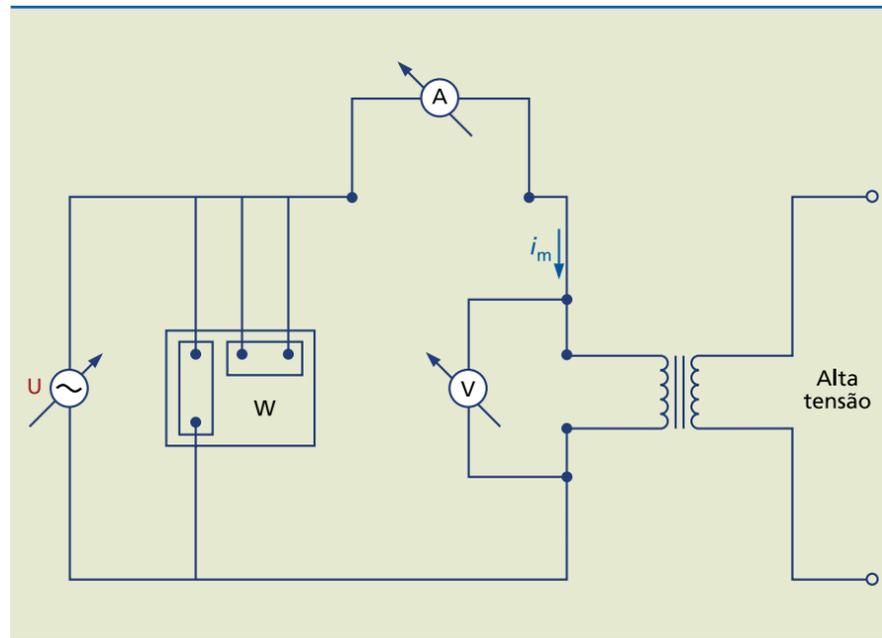
### 1.6.3 Transformador real

Um transformador real não possui 100% de eficiência, porque ocorrem perdas magnéticas no ferro. As perdas no ferro ou no núcleo ( $P_N$ ) dependem da densidade de fluxo  $B$ , ou seja, da tensão elétrica aplicada no enrolamento.



Para determinar experimentalmente as perdas magnéticas em um transformador, efetua-se um teste conhecido como ensaio a vazio (figura 1.108), tomando o cuidado de deixar o lado de alta tensão em aberto.

**Figura 1.108**  
Ensaio a vazio.



Para realizar o ensaio a vazio, é necessário monitorar algumas grandezas elétricas por meio de instrumentos de medida e compará-las com as especificadas pelo fabricante. Por exemplo: se a tensão  $U$  sofrer variação até que o voltímetro registre a tensão nominal, o valor específico da corrente de magnetização do núcleo  $i_m$  será indicada no amperímetro. Nessas condições, a potência registrada no wattímetro deve ser proporcional à perda que ocorre no núcleo do transformador, originada pela histerese magnética – reduzida quando se escolhe o melhor material para compor as lâminas – e por correntes parasitas – reduzidas quando o núcleo é formado por lâminas finas.

As perdas por histerese magnética ( $P_H$ ) e por correntes parasitas ( $P_P$ ) podem ser calculadas pelas seguintes fórmulas:

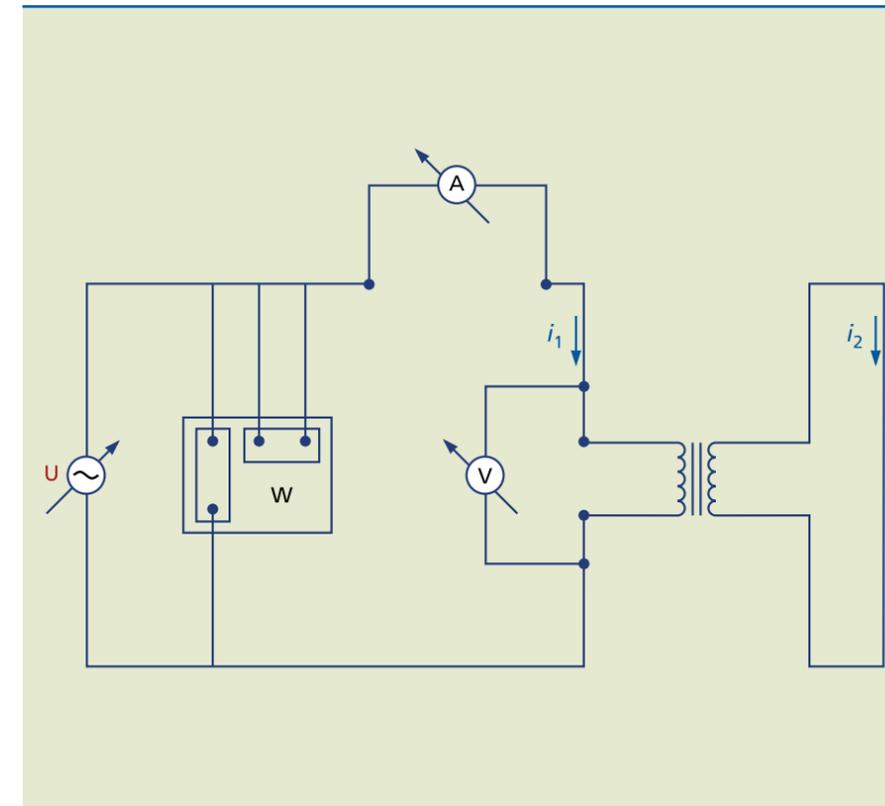
$$P_H = 10^{-7} \cdot \xi \cdot B^{1.6} \cdot f \cdot V \quad \text{e} \quad P_P = 10^{-12} \cdot \frac{\pi^2}{8 \cdot \rho} \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot \delta^2 \cdot V \quad (1.34)$$

em que:

- $\xi$  é o coeficiente de Steinmetz, que depende do material;
- $B$  a densidade do fluxo magnético;
- $f$  a frequência do fluxo magnético;
- $V$  o volume das lâminas que compõem o núcleo;
- $\rho$  a resistividade específica do material que compõe o núcleo;
- $\delta$  a espessura das lâminas que compõem o núcleo.

Para determinar experimentalmente as perdas no cobre em um transformador, efetua-se o ensaio em curto-circuito (figura 1.109).

**Figura 1.109**  
Ensaio em curto-circuito.



Como os enrolamentos são compostos por fios de cobre, a resistência elétrica desses fios pode ser responsável por perdas bastante consideráveis. Para definir essas perdas, deve-se realizar um curto-circuito do lado de baixa tensão do transformador e variar a tensão  $U$  até que a tensão (voltímetro) e a corrente (amperímetro) nominais se manifestem no primário. Nesse caso, a potência lida no wattímetro será referente à perda no cobre.

As perdas no cobre ( $P_C$ ) podem ser calculadas pela seguinte fórmula:

$$P_C = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \quad (1.35)$$

em que:

- $R_1$  é a resistência elétrica do enrolamento primário;
- $R_2$ , a resistência elétrica do enrolamento secundário.

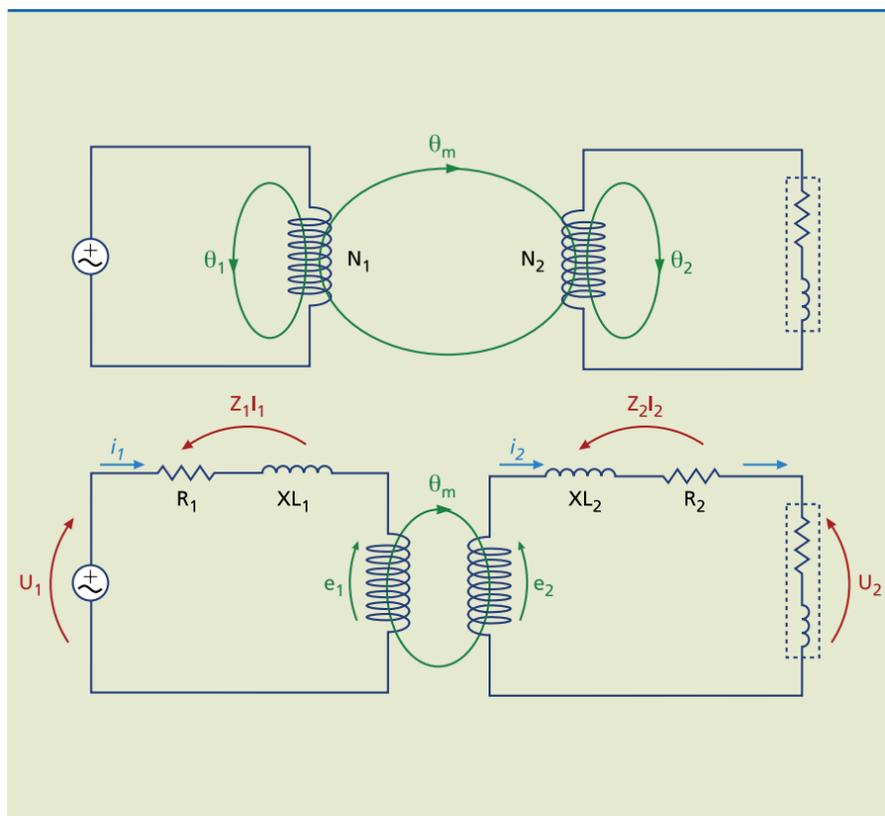
Então, a eficiência de um transformador real é expressa por:

$$E_f = \frac{P_2}{P_2 + P_C + P_N} \quad (1.36)$$



Um transformador real com suas perdas pode ser representado pelo circuito da figura 1.110.

**Figura 1.110**  
Transformador real.



Como mencionado, o transformador não é um circuito magnético perfeito; então, aplicando a tensão  $U_1$  no primário e ligando uma carga de natureza indutiva ( $Z_L$ ) ao secundário, haverá correntes circulando pelos enrolamentos. Parte do fluxo magnético do núcleo é dispersa no primário ( $\phi_1$ ) e no secundário ( $\phi_2$ ). Esses fluxos dispersos geram uma reatância indutiva ( $XL$ ) em ambos os enrolamentos.

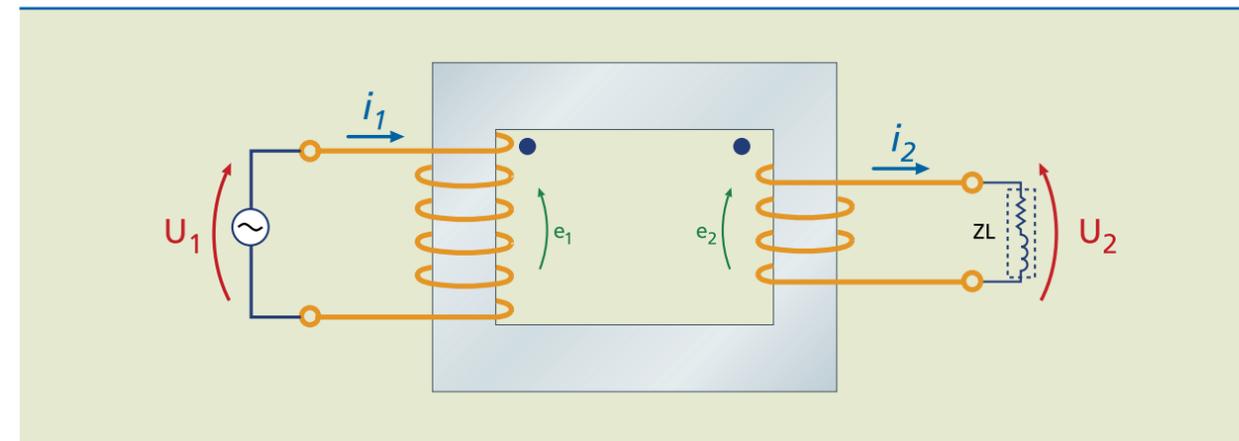
Com a circulação das correntes primária e secundária, as impedâncias formadas por  $R$  e  $XL$  provocam quedas de tensão internas no transformador, representadas pelos produtos  $Z_1 I_1$  e  $Z_2 I_2$ . Assim, podemos deduzir que:

- 1) No enrolamento primário:  $e_1 = U_1 - Z_1 I_1$ , sendo  $U_1 > e_1$ .
- 2) No enrolamento secundário:  $e_2 = U_2 + Z_2 I_2$ , sendo  $e_2 > U_2$ .

em que:

$$Z_1 = R_1 + jXL_1 \text{ e } Z_2 = R_2 + jXL_2$$

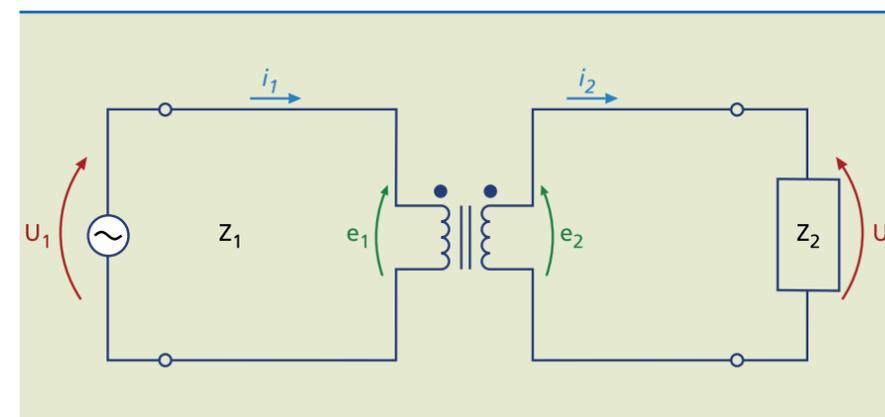
Podemos simplificar a representação do transformador utilizando um método chamado impedância refletida, como mostra a figura 1.111.



**Figura 1.111**  
Transformador ideal com carga indutiva  $Z_L$ .

Colocando o transformador em vazio, ou seja,  $Z_L = \infty$ , a corrente secundária tende a zero. Então, para qualquer valor de  $Z_L$ , a impedância secundária  $Z_2$ , tendo como referência os terminais do enrolamento secundário a partir da carga, vale:

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2}, \text{ conforme representado na figura 1.112.}$$



**Figura 1.112**  
Transformador com as impedâncias de entrada e de saída equivalentes.

Da mesma forma, a impedância equivalente de entrada, tomando como referência os terminais do enrolamento primário a partir da fonte de tensão  $U_1$ , vale:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1}.$$

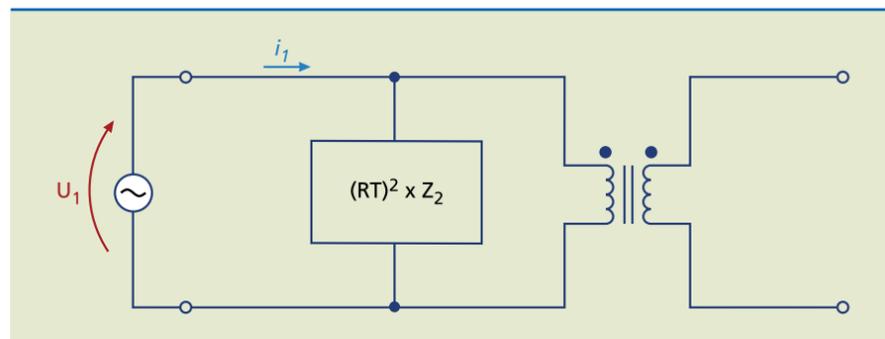
Com base na equação anterior, concluímos que qualquer alteração na carga implica alteração na corrente do secundário e, conseqüentemente, na intensidade de corrente primária.

Assim, podemos refletir a impedância do secundário no primário, simplificando a representação de um transformador (figura 1.113).



**Figura 1.113**

Transformador com a impedância do secundário refletida no primário.



Dessa maneira, com o secundário em aberto e com  $Z_1$  de valor desprezível, em comparação com  $Z_L$  (que é igual a  $Z_2$ ), temos:

$$Z_1 = (RT)^2 \cdot Z_2$$

em que:

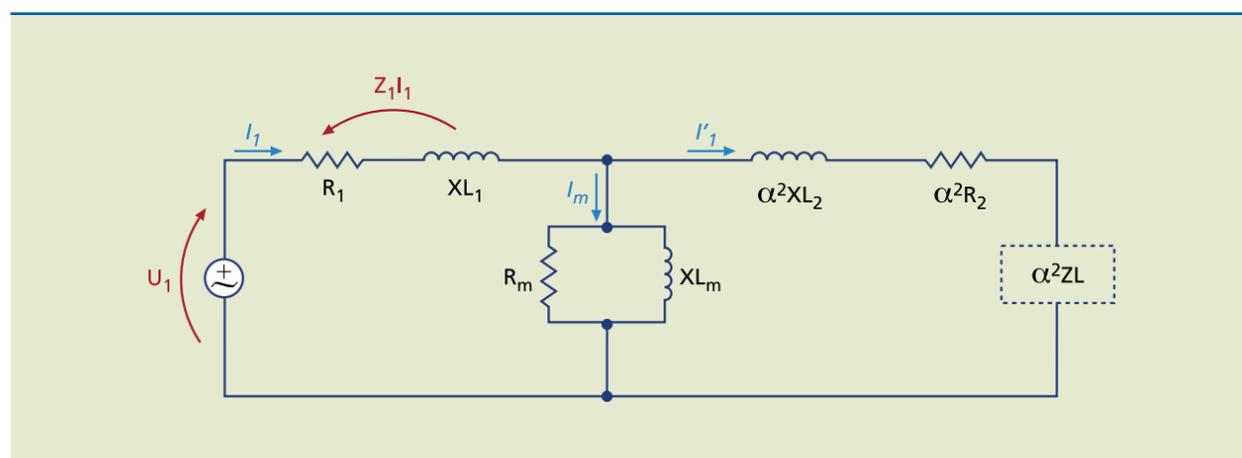
$$RT = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.37)$$

Essa expressão é verdadeira, pois o transformador pode ser utilizado para casamento de impedâncias, como descrito anteriormente.

É possível, então, desenhar o circuito que equivale a um transformador, com suas perdas no ferro, relutâncias e impedâncias secundárias refletidas no primário (figura 1.114).

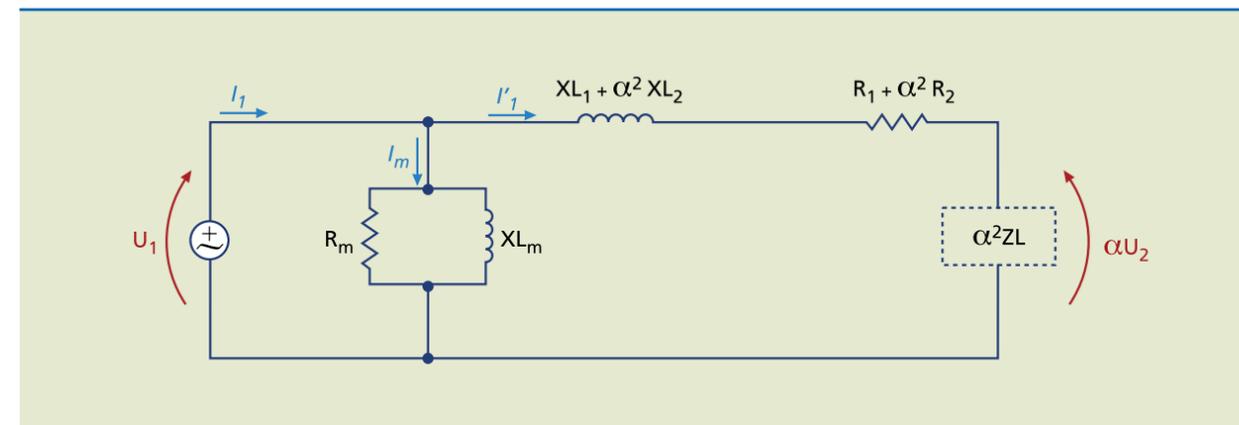
**Figura 1.114**

Circuito equivalente de um transformador em vazio ou com carga. O termo  $XL_m$  representa a componente reativa do transformador em aberto, e o parâmetro  $\alpha$ , a relação de transformação  $RT$ .



Se colocarmos o secundário em aberto, a corrente do secundário será zero. Nessa condição, a corrente de reação  $I'_1$  é anulada e apenas a corrente de magnetização circula, produzindo pequena queda de tensão em  $Z_1$ .

Se a impedância  $Z_1$  e a queda de tensão  $Z_1 I_1$  forem pequenas, podemos construir outro circuito equivalente, conforme descrito na figura 1.115.



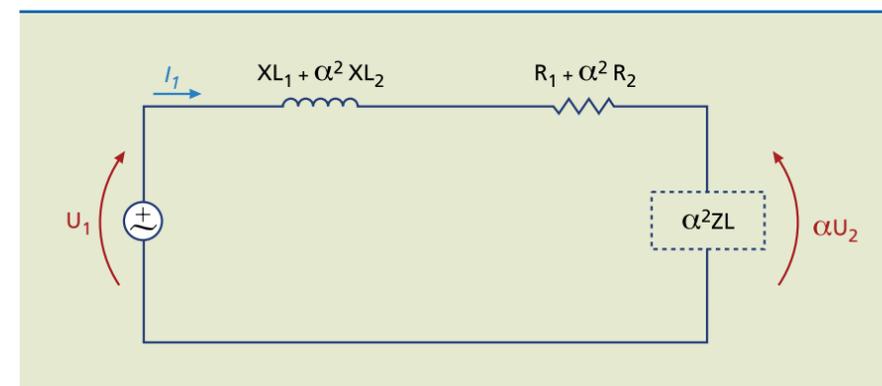
**Figura 1.115**

Circuito equivalente de um transformador com impedâncias refletidas.

Nesse circuito, deslocando o ramo  $R_m - XL_m$ , as impedâncias internas do primário e do secundário podem ser agrupadas, resultando nos seguintes parâmetros:

- Impedância equivalente referida ao primário:  $Z_{e1} = R_{e1} + j XL_{e1}$
- Resistência equivalente referida ao primário:  $R_{e1} = R_1 + \alpha^2 R_2$
- Reatância equivalente referida ao primário:  $XL_{e1} = XL_1 + \alpha^2 XL_2$

Ainda analisando o mesmo circuito, se colocarmos uma carga no primário, a corrente de reação  $I'_1$  será bem maior que a corrente de magnetização  $I_m$ , como já explicado. Assim, desprezando a corrente de magnetização, o circuito equivalente simplificado pode ser representado conforme a figura 1.116.



**Figura 1.116**

Circuito equivalente de um transformador com corrente de magnetização desprezada.

Nessas condições, a corrente primária  $I_1$  passa a valer:

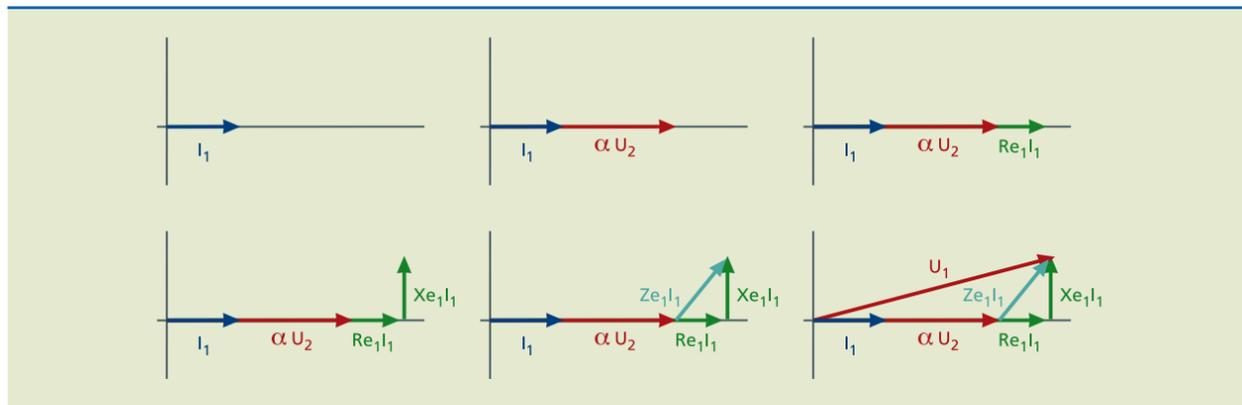
$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{e1} + \alpha^2 ZL} \quad (1.38)$$

Considerando que a carga a ser ligada ao secundário pode ter caráter resistivo, indutivo ou capacitivo, podemos fazer uma análise fasorial das correntes e tensões para saber que efeito a carga tem no primário, como ilustram as figuras 1.117 a 1.119.



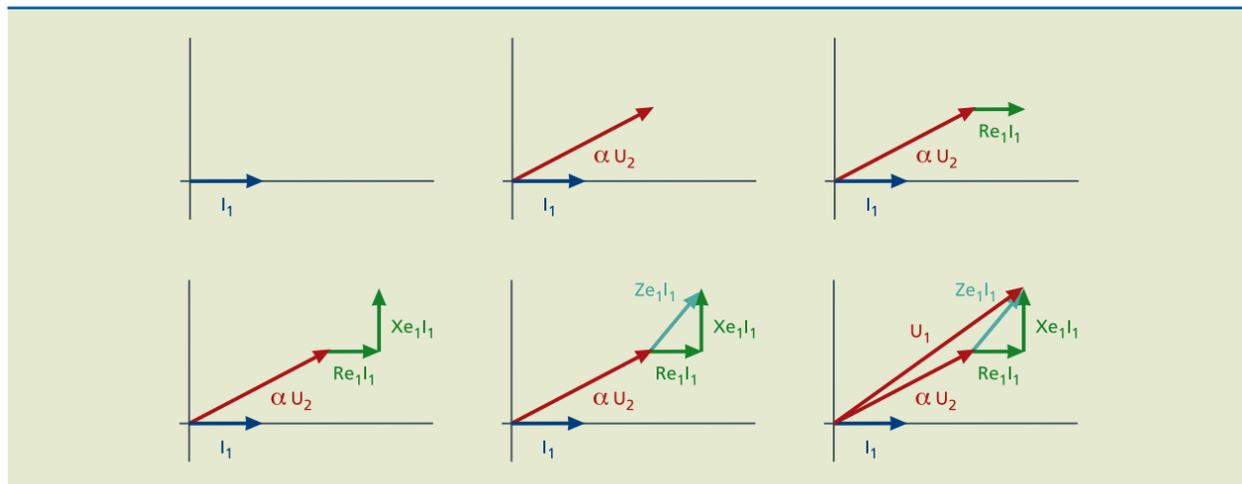
**Figura 1.117**

Diagrama fasorial com carga de caráter resistivo – impedância refletida no primário.



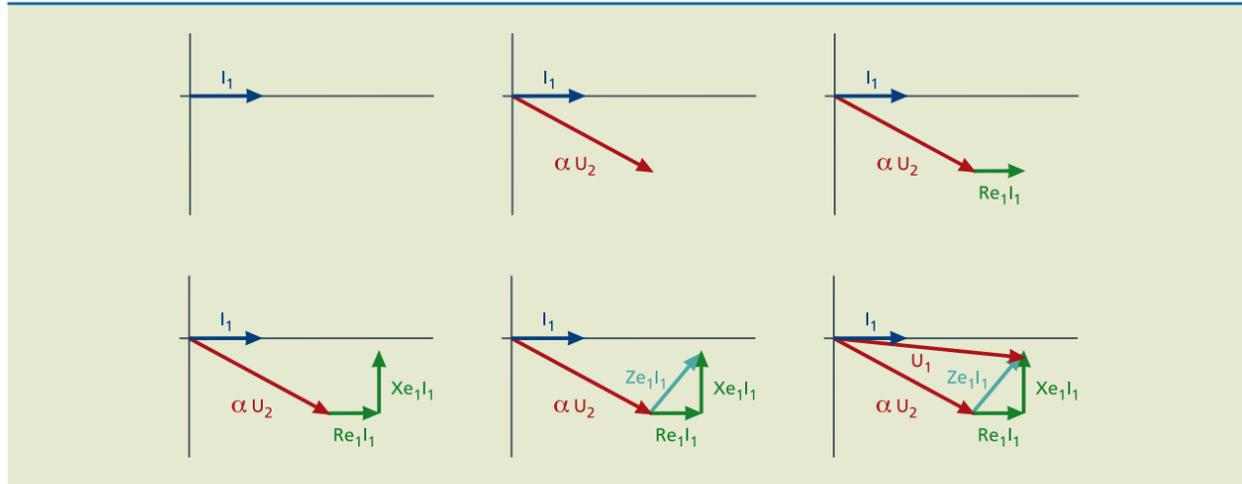
**Figura 1.118**

Diagrama fasorial com carga de caráter indutivo – impedância refletida no primário.



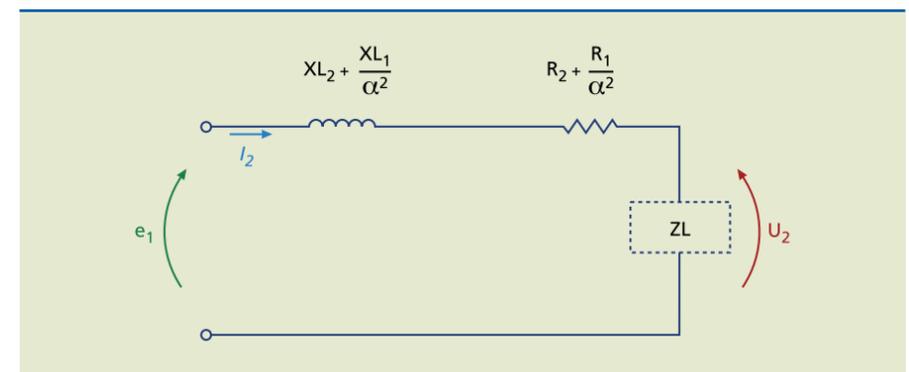
**Figura 1.119**

Diagrama fasorial com carga de caráter capacitivo – impedância refletida no primário.



Nos três casos apresentados, verificamos que a diferença fasorial entre  $U_1$  e  $\alpha U_2$  será sempre proporcional à queda de tensão  $Z_{e1} I_1$ , ou seja, a relação entre  $\alpha U_2$  e  $U_1$  terá a mesma proporção que existe na relação entre a tensão nos terminais do secundário e a tensão em vazio, respectivamente.

É possível também refletir os valores do primário no secundário e verificar o diagrama fasorial considerando as cargas resistiva, indutiva e capacitiva, conforme ilustra a figura 1.120.



**Figura 1.120**

Circuito equivalente com impedância refletida no secundário.

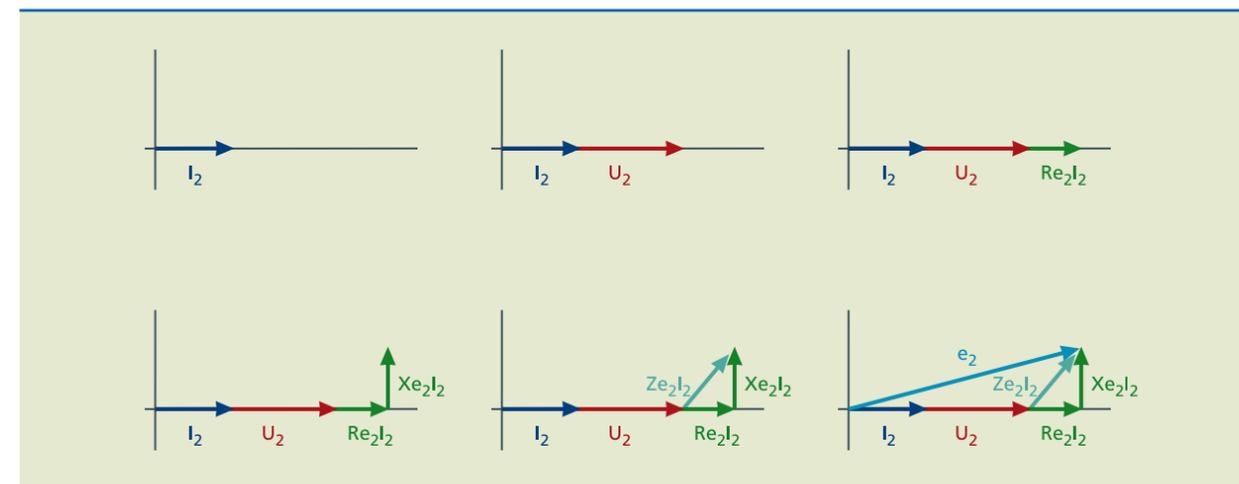
Com base nesse circuito e nas expressões representadas em seus componentes, pode-se concluir que:

- Impedância equivalente referida ao secundário:  $Z_{e2} = R_{e2} + j X_{L_{e2}}$
- Resistência equivalente referida ao secundário:  $R_{e2} = R_2 + \frac{R_1}{\alpha^2}$
- Reatância equivalente referida ao secundário:  $X_{L_{e2}} = X_{L_2} + \frac{X_{L_1}}{\alpha^2}$

**Figura 1.121**

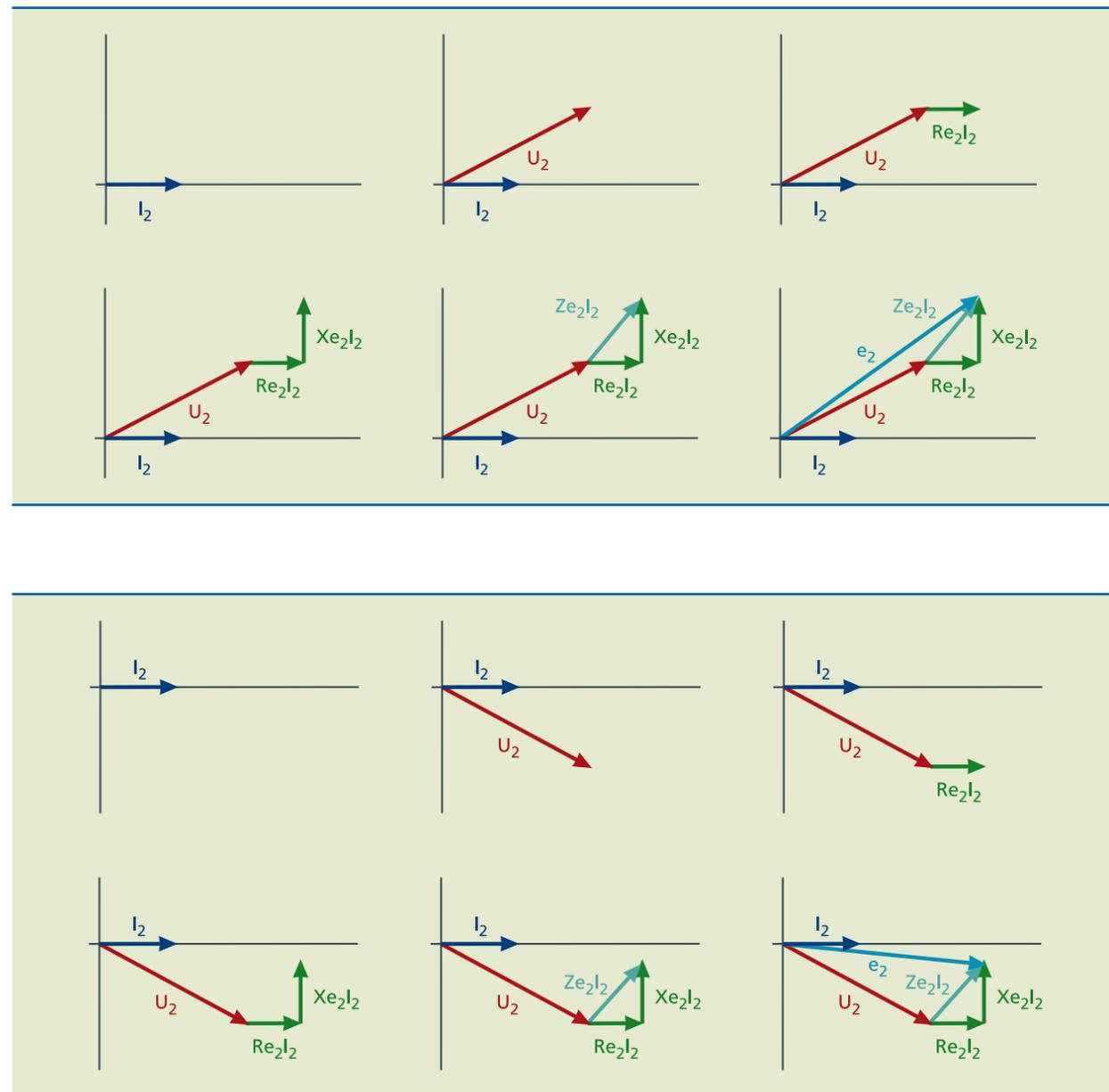
Diagrama fasorial com carga de caráter resistivo – impedância refletida no secundário.

As figuras 1.121 a 1.123 representam os diagramas fasoriais com cargas de caráter resistivo, indutivo e capacitivo, respectivamente, para a nova situação.



**Figura 1.122**

Diagrama fasorial com carga de caráter indutivo – impedância refletida no secundário.



**Figura 1.123**

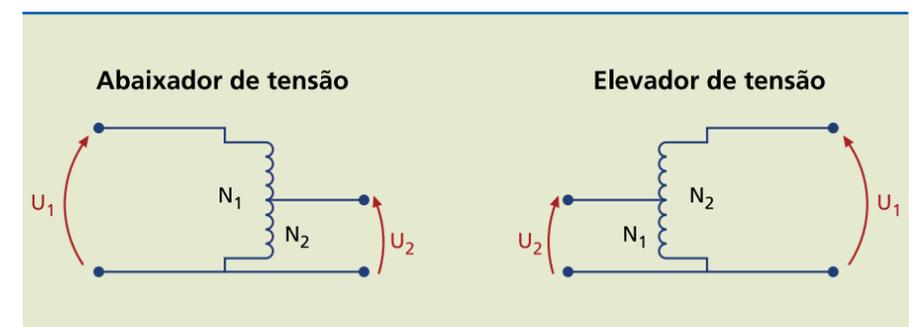
Diagrama fasorial com carga de caráter capacitivo – impedância refletida no secundário.

### 1.6.4 Autotransformador

O autotransformador é um transformador que possui somente um enrolamento, em que, efetuando-se diversas derivações, podem ser obtidos diferentes valores de tensão. O transformador monofásico tem dois enrolamentos isolados eletricamente. Na figura 1.124, verifica-se a colocação de um terminal em um deles para construir um autotransformador.

Emprega-se o autotransformador para tensões mais baixas, pois, como ele utiliza o mesmo enrolamento para primário e secundário, seria arriscado usá-lo em altas tensões, principalmente se ocorresse interrupção no enrolamento (circuito

aberto). Por exemplo, vamos imaginar que em um transformador abaixador de tensão utilizado na distribuição de energia elétrica há abertura do enrolamento primário, que tem uma tensão de dezenas de milhares de volts e relação de transformação de 100:1. Em razão desse rompimento, nada chegará ao secundário, uma vez que os enrolamentos são isolados eletricamente. No entanto, se fosse um autotransformador, a interrupção do enrolamento implicaria uma tensão primária na carga. Dessa maneira, em vez de receber 220 V, receberia cem vezes mais, 22 000 V. Por causa desse risco, sua aplicação é restrita a algumas aplicações da área de eletrotécnica, mas, comparado com o transformador convencional, ele apresenta perdas menores e utiliza menos núcleo de ferro.



**Figura 1.124**

Autotransformador.

### 1.6.5 Princípio da transformação trifásica

A forma mais eficaz de transmitir uma corrente elétrica em longas distâncias é por corrente alternada. O uso em escala industrial da corrente alternada teve início no século XIX, quando George Westinghouse contratou Nikola Tesla para montar uma linha de transmissão que pudesse transportar a energia elétrica produzida pela energia hidráulica das Cataratas do Niágara até as indústrias da cidade de Buffalo, no estado norte-americano de Nova York.

Tesla estudava o campo magnético girante (abordado no capítulo 4) e sistemas polifásicos e patenteou o termo “corrente alternada”. A Westinghouse Electric Corporation, usando a patente de Tesla, ganhou o contrato de comissão internacional das Cataratas, contrariando a ideia de fornecer energia elétrica por corrente contínua, proposta por Thomas Edison, representante da General Electric (GE). No final das negociações, porém, o contrato de construção das linhas de transmissão de energia para Buffalo foi concedido à GE.

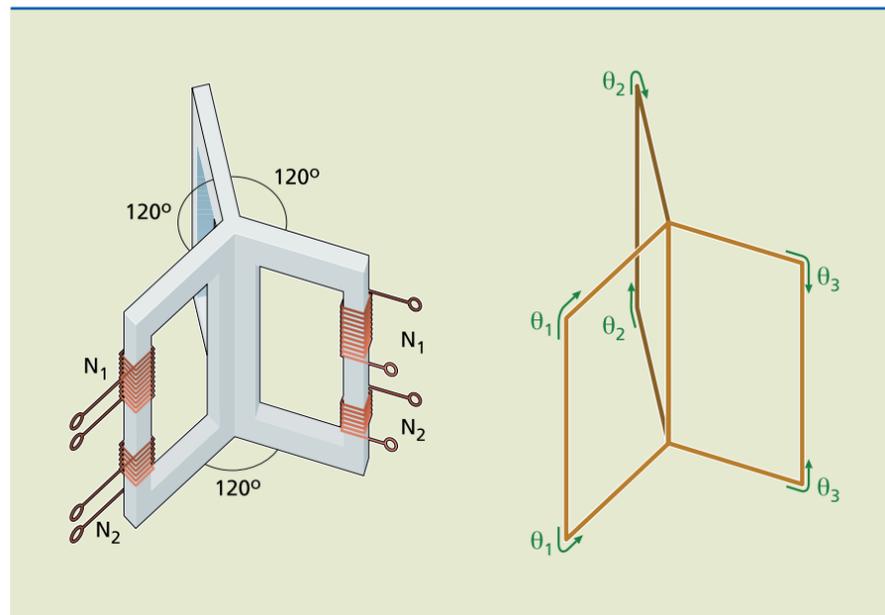
Desde aquela época, a forma mais comum de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em corrente alternada é o sistema trifásico, pois as máquinas trifásicas são mais eficientes que as monofásicas. Atribui-se esse ganho de eficiência à utilização plena dos circuitos magnéticos (dispersão reduzida ao mínimo de fluxo magnético).

Um transformador trifásico é desenvolvido com três transformadores monofásicos reunidos em um núcleo trifásico. O princípio de funcionamento dessa união de três circuitos magnéticos em um único conjunto está ilustrado na figura 1.125.



**Figura 1.125**

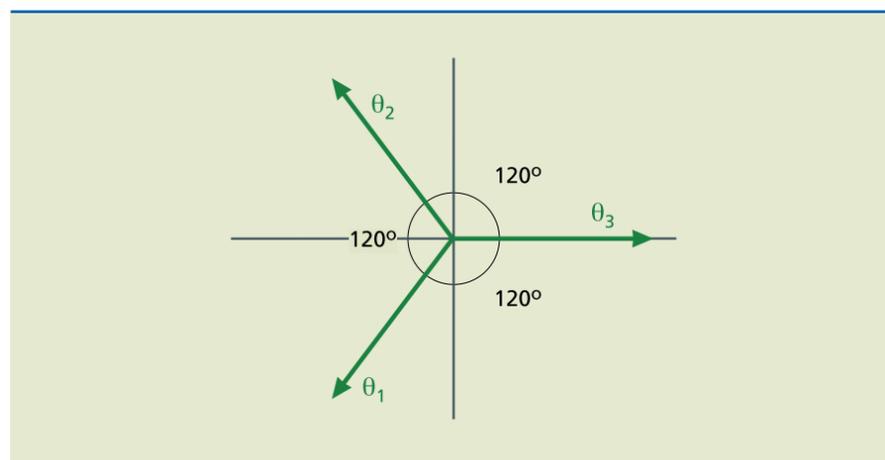
Princípio de funcionamento de um transformador trifásico.



Esse conjunto é formado por três núcleos montados de maneira que suas colunas externas fiquem distanciadas fisicamente de  $120^\circ$ . Cada coluna externa possui enrolamento primário ( $N_1$ ) e secundário ( $N_2$ ), e cada enrolamento primário recebe uma tensão elétrica de mesmo valor numérico, mas com defasagem de  $120^\circ$ . Dessa maneira, os fluxos magnéticos  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  e  $\Phi_3$  também estão defasados de  $120^\circ$  (figura 1.126).

**Figura 1.126**

Diagrama fasorial do fluxo magnético.

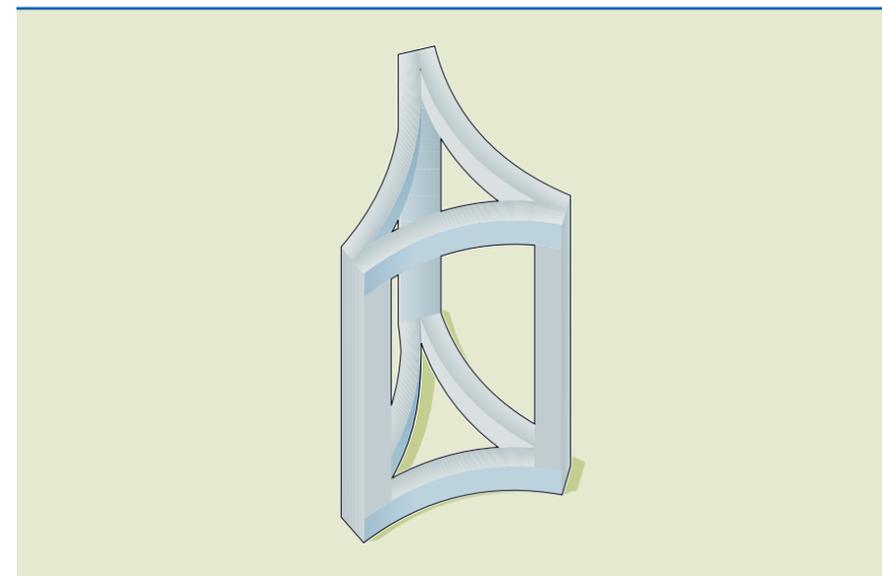


Como a resultante dos três fluxos magnéticos é nula, a coluna central do núcleo não é atravessada por fluxo magnético, podendo, então, ser eliminada da constituição do núcleo (figura 1.127).

Esse formato é simétrico em relação às três colunas e os três circuitos magnéticos apresentam a mesma relutância magnética e as mesmas correntes magnetizantes, resultando em um sistema de tensão trifásico simétrico ( $120^\circ$  de defasagem em cada tensão) e equilibrado (mesmo valor para cada tensão).

**Figura 1.127**

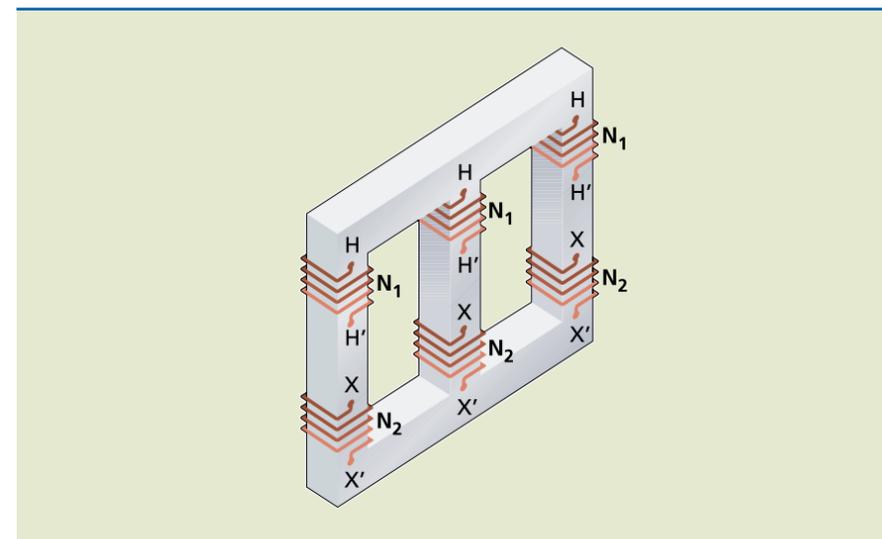
Núcleo trifásico.



No entanto, como a construção de um núcleo com essa disposição é muito trabalhosa, a condição de simetria não é levada em consideração – praticamente não possui importância – e constrói-se o núcleo do transformador trifásico como mostrado na figura 1.128.

**Figura 1.128**

Transformador trifásico.



Nesse conjunto, os fluxos magnéticos têm de ser equilibrados e simétricos, pois devem induzir em cada enrolamento primário uma força contraeletromotriz em relação à tensão aplicada.

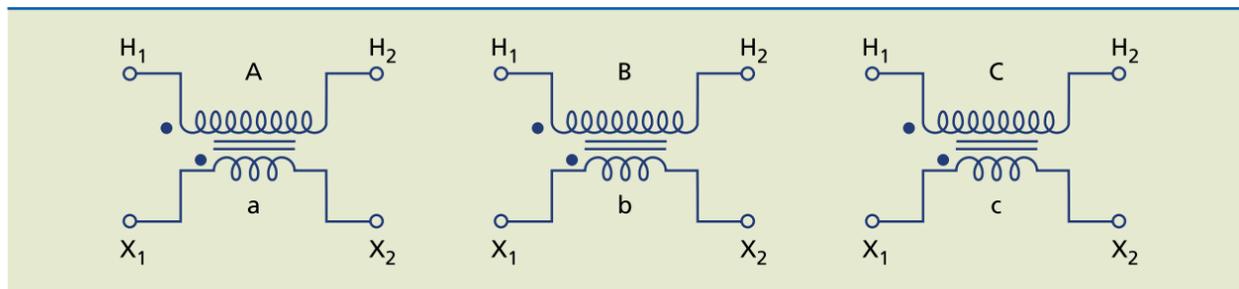
Pode-se notar que a relutância magnética no braço central é menor que nas laterais, o que faz com que a corrente magnetizante central seja menor, gerando, então, um desequilíbrio, na verdade desprezível, pois somente com o transformador em vazio esse desequilíbrio se manifesta (como visto, a corrente magnetizante pode ser desprezada com o transformador com carga).



**Figura 1.129**

Três transformadores monofásicos idênticos.

Assim, um transformador trifásico não é muito diferente de três transformadores monofásicos idênticos (figura 1.129).



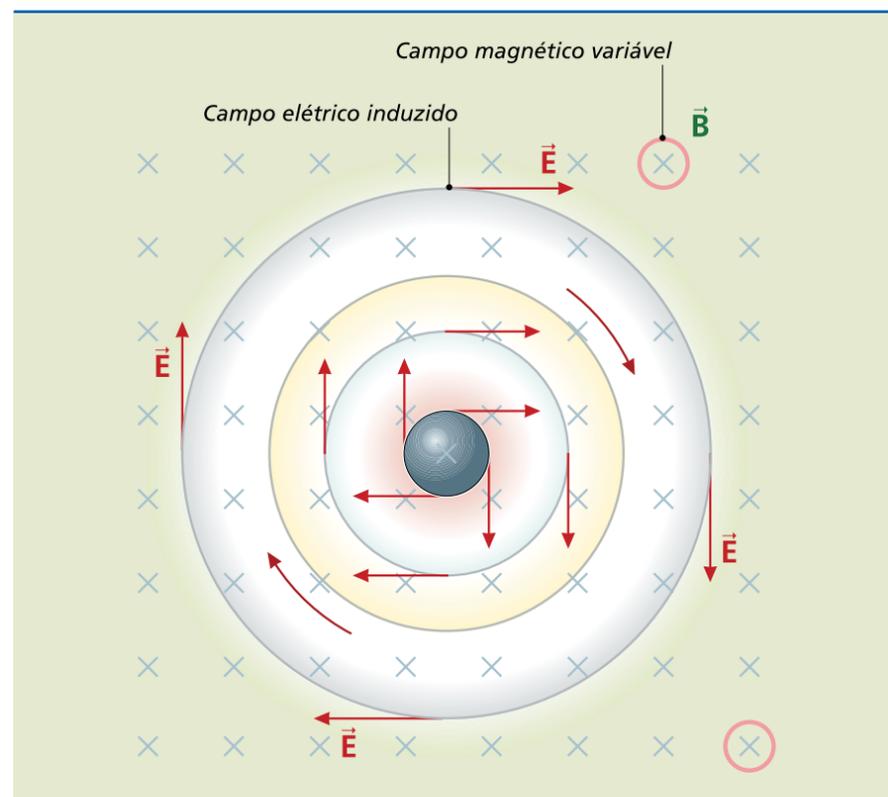
### 1.7 Geração de campo elétrico pela variação do fluxo magnético

Os tratados científicos relatados por alguns cientistas e pesquisadores (Coulomb, Ørsted, Ampère, Faraday e outros) citados no decorrer deste capítulo estabeleceram os princípios do magnetismo e da eletricidade. O físico escocês James Maxwell revolucionou esses princípios ao generalizá-los em uma teoria, ao afirmar:

- Um campo magnético que varia com o tempo tem os efeitos equivalentes de um campo elétrico (figura 1.130).

**Figura 1.130**

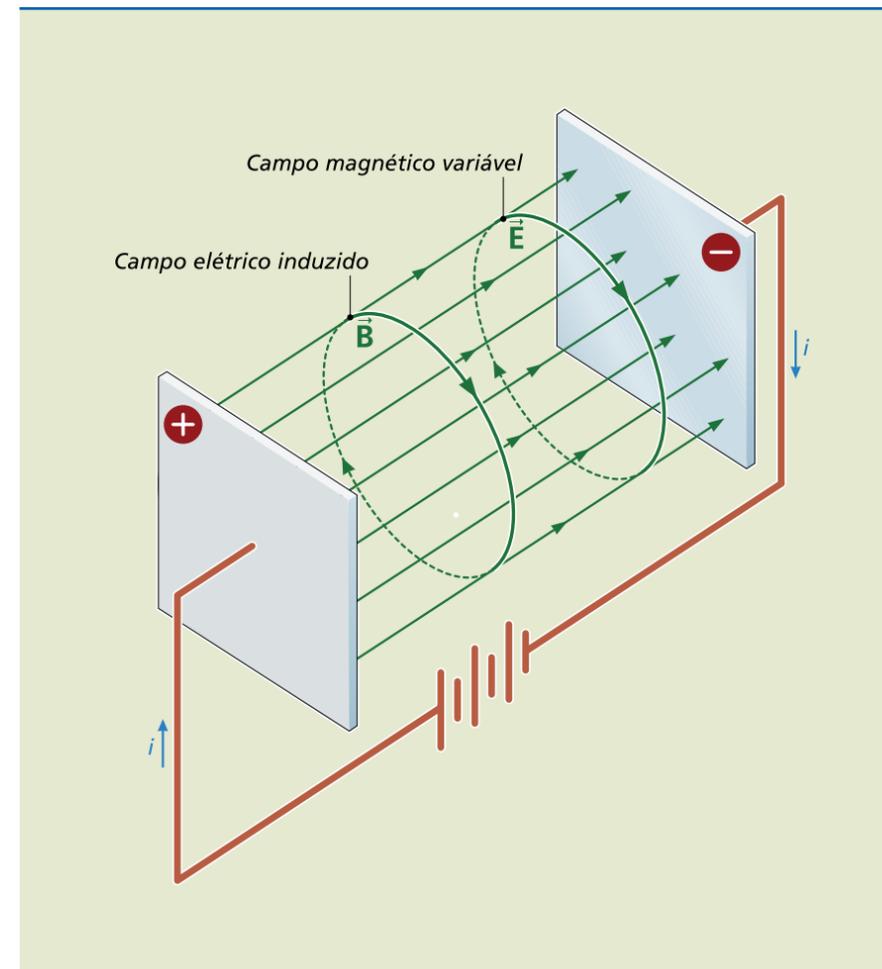
Geração de campo elétrico pela variação do campo magnético.



- Um campo elétrico que varia com o tempo tem os efeitos equivalentes de um campo magnético (figura 1.131).

**Figura 1.131**

Geração de campo magnético pela variação do campo elétrico.



Em outras palavras, Maxwell propôs que, além da corrente elétrica, um campo elétrico variável poderia gerar um campo magnético. Com isso, formulou matematicamente a existência de uma perturbação oriunda de dois efeitos: um campo elétrico variável que produz um campo magnético, também variável, que, por sua vez, produz um campo elétrico, igualmente variável. Isso significa que essa perturbação se propaga pelo espaço porque um campo induz o outro. Tal perturbação é chamada de onda eletromagnética.

#### 1.7.1 Onda eletromagnética

Maxwell considerou que as ondas eletromagnéticas eram transversais, mesmo comportamento que seu contemporâneo Augustin Fresnel, cientista francês, atribuía à luz.

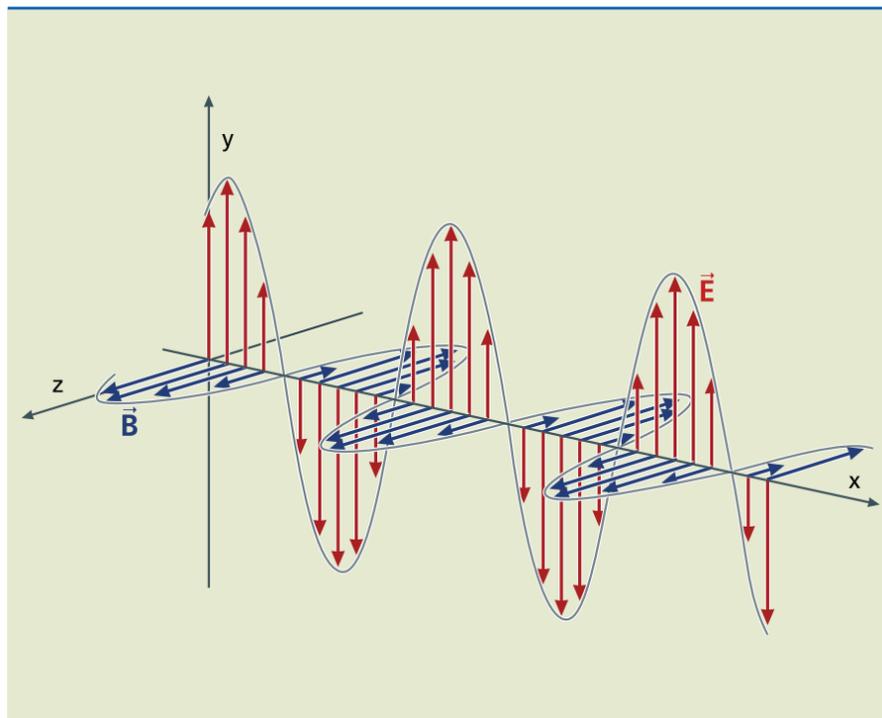
Em suas observações, Maxwell considerou que, se em um ponto A qualquer do espaço surgir uma perturbação elétrica variável, esse campo elétrico ( $\vec{E}$ ) induzirá um campo magnético ( $\vec{B}$ ) variável e de direção perpendicular ao campo



elétrico, distante do ponto A. O campo magnético variável induzirá um campo elétrico variável, também de direção perpendicular e distante do campo magnético. Portanto, os vetores que representam esses campos formam um ângulo de  $90^\circ$ . O movimento da onda está em um vetor cuja direção é perpendicular tanto a  $\vec{E}$  como a  $\vec{B}$ , formando uma figura geométrica conhecida como triedro direto (figura 1.132), que posteriormente ficou conhecido como vetor de Poynting.

**Figura 1.132**

Onda eletromagnética.



Em sua teoria ondulatória, Maxwell estabeleceu que a velocidade com que as ondas eletromagnéticas se propagam é:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (1.39)$$

em que:

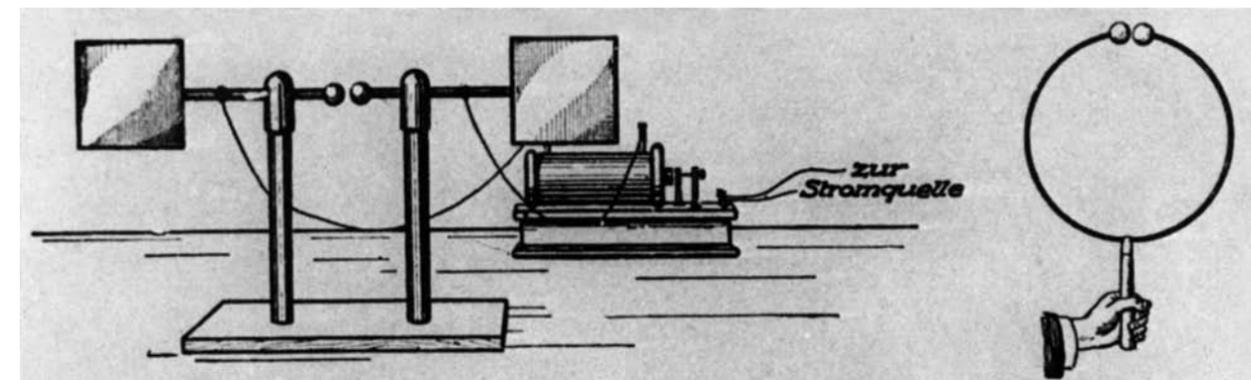
- $\epsilon_0$  é a constante dielétrica do vácuo;
- $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo.

Conhecendo os valores dessas constantes, podemos aplicá-los na fórmula anterior e determinar a velocidade da luz.

$$c = \sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} \rightarrow c = \sqrt{9 \cdot 10^{16}} \rightarrow c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (1.40)$$

Portanto, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo é idêntica à velocidade da luz no vácuo. Essa constatação fez com que Maxwell suspeitasse que a luz fosse uma onda eletromagnética e realizasse vários experimentos com o objetivo de comprovar a existência desse tipo de onda.

Após a morte prematura de Maxwell, o alemão Heinrich Hertz montou, em 1887, um experimento utilizando circuitos oscilantes com receptores ressonadores que operavam na mesma frequência dos osciladores (figura 1.133).



**Figura 1.133**

Esquema do experimento.

Hertz, finalmente, comprovou as hipóteses de Maxwell e começou a preparar o caminho para o desenvolvimento da tecnologia das transmissões sem meios físicos, popularizada pelo telégrafo sem fio do italiano Guglielmo Marconi.

Mesmo considerando que a luz era uma onda eletromagnética, os pesquisadores da época também atribuíam a ela um comportamento de partícula. Essa dualidade onda-partícula ainda é defendida por muitos cientistas.

Em 1887, Heinrich Hertz observou um fenômeno que, mais tarde, foi chamado de efeito fotoelétrico: a expulsão de partículas negativas da superfície de um metal ao se incidir sobre ela uma radiação eletromagnética. Naquele tempo, por ausência de elementos teóricos, esse fenômeno foi pouco explorado, pois só poderia ser mais bem compreendido com a descoberta do elétron.

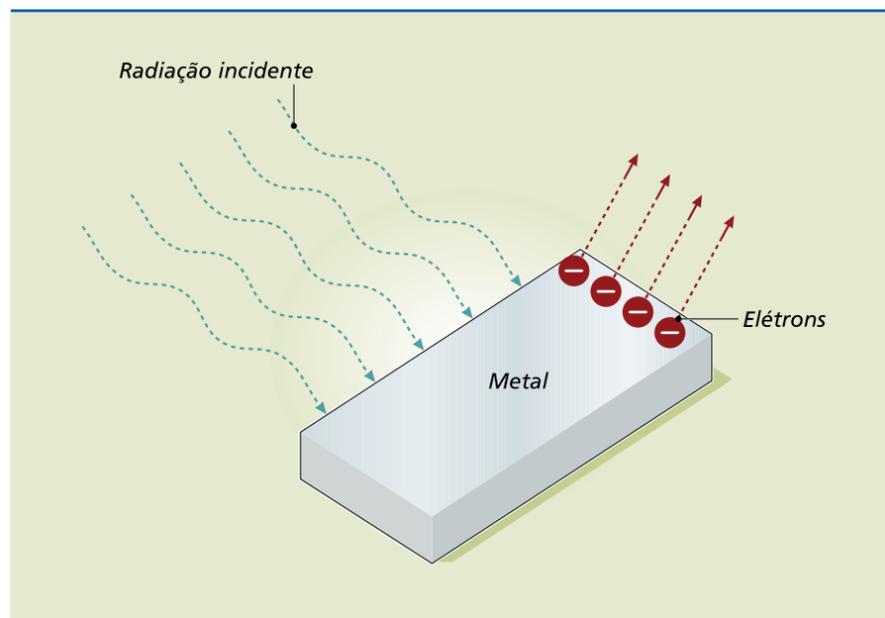
Quem conseguiu explicar o efeito fotoelétrico de maneira definitiva foi o alemão Albert Einstein, no século XX. Ele sugeriu que a luz era composta de partículas denominadas fótons, estendendo a teoria proposta pouco antes pelo também alemão Max Planck, com base na seguinte hipótese: “ao interagir com a matéria, a radiação eletromagnética (como a luz) comporta-se como partícula (denominada fóton), cuja energia, chamada quanta, é proporcional à frequência da radiação. Essa descoberta de que a energia é da radiação é transferida em pacotes (os quanta) de energia deu origem à Teoria Quântica, que explica a radiação eletromagnética e também o elétron como entidades que ora se comportam como ondas ora como partículas. Assim, a luz é uma



entidade que possui as características de partícula e de onda. Ou seja, as teorias corpuscular e ondulatória não estão erradas: elas se complementam.

Durante a interação com a matéria, a energia desse fóton é totalmente transferida para o elétron. Ou seja, o elétron só absorve quantidades discretas (bem definidas) de energia. Essa energia pode ser suficiente para arrancá-lo do átomo. Mas isso só acontece quando a energia da radiação tem um valor mínimo, ao qual se dá o nome de quanta. Radiação de baixa frequência, como a luz vermelha ou azul, não arranca elétrons dos átomos. Mas a luz ultravioleta, de maior frequência e, portanto, maior energia, é capaz de arrancá-los.

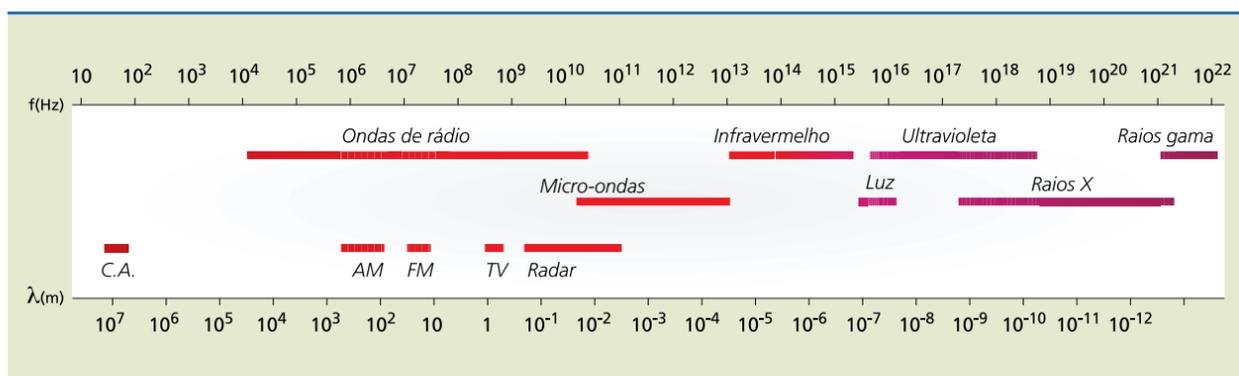
**Figura 1.134**  
Efeito fotoelétrico.



### 1.7.2 Espectro eletromagnético

Na famosa experiência de Hertz, o cientista produziu ondas eletromagnéticas estacionárias, chamadas posteriormente de ondas hertzianas, determinando a velocidade e o comprimento de onda. Há grande variação de comprimentos e frequências das ondas eletromagnéticas, que podem ser reunidas em um conjunto denominado espectro eletromagnético (figura 1.135).

**Figura 1.135**  
Espectro eletromagnético.

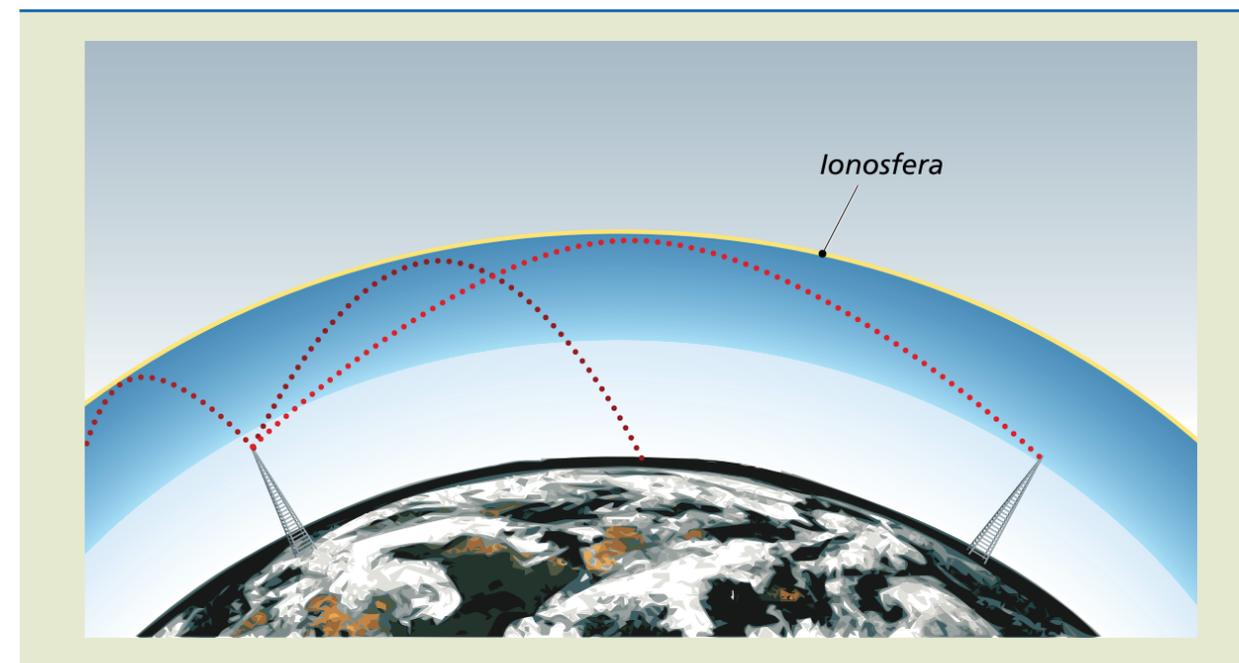


### Ondas de rádio

Marconi realizou diversas experiências com seu telégrafo sem fio, instalando estações e antenas cada vez mais distantes, até mesmo em navios. Mas como essas ondas eram capazes de cruzar o oceano Atlântico?

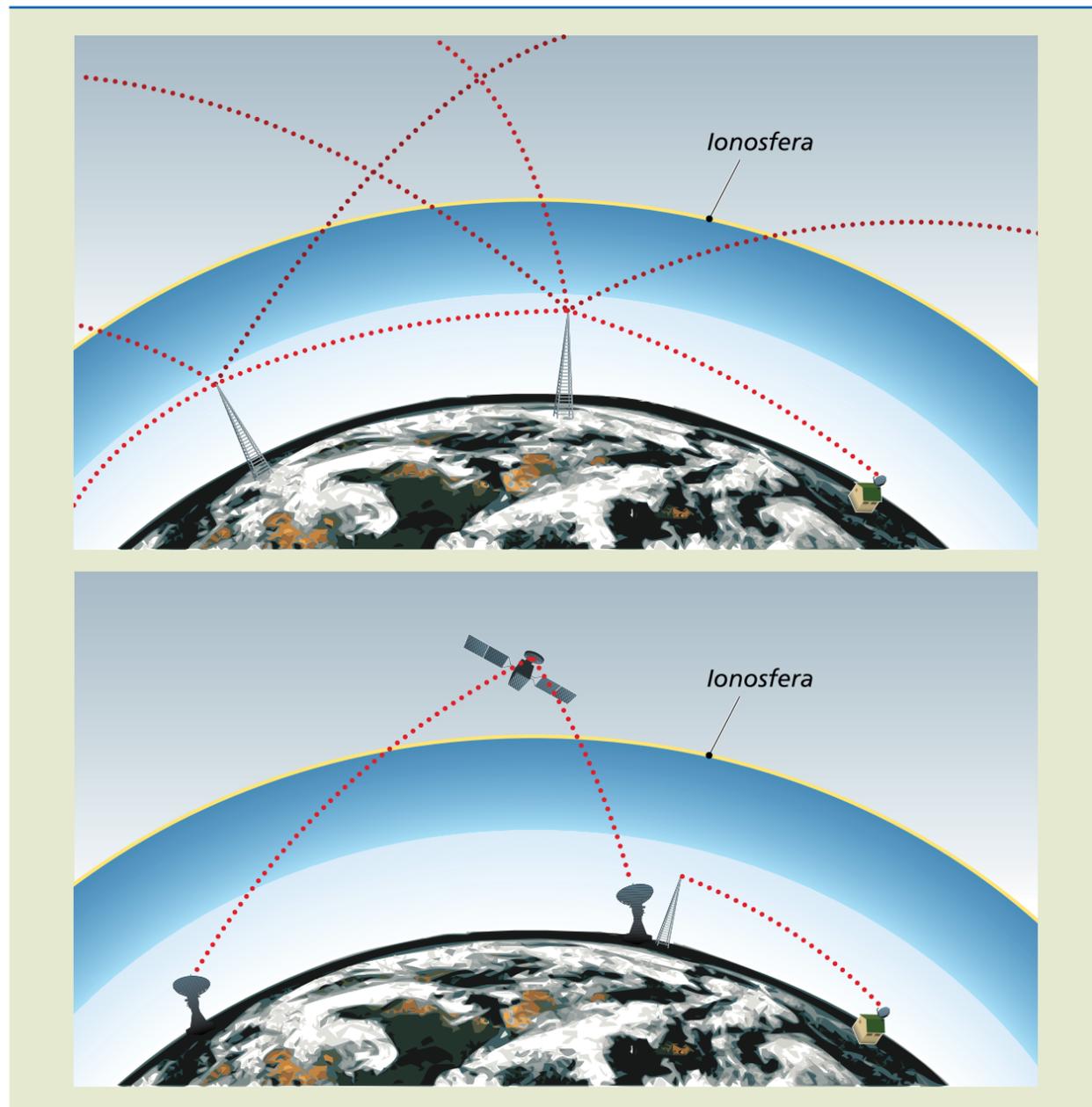
Para explicar esse fenômeno, o norte-americano Arthur Edwin Kennelly e o inglês Oliver Heaviside sugeriram a existência de uma camada da atmosfera, a ionosfera, onde essas ondas seriam refletidas, o que permitiria captá-las a grandes distâncias da fonte emissora (figura 1.136).

**Figura 1.136**  
Representação das ondas de rádio refletindo na ionosfera.



A atmosfera possui várias camadas. Em uma delas, denominada camada de Heaviside, a pressão do ar é tão baixa que sofre a ação da luz solar, causando interferência nas transmissões de ondas eletromagnéticas de certa frequência e comprimento de onda. As ondas eletromagnéticas que mais sofrem interferência são as ondas de rádio (AM e FM), conhecidas como ondas hertzianas. Como essas ondas têm grande comprimento, elas difratam facilmente de árvores e prédios e são refletidas por grandes cadeias montanhosas. As ondas de rádio com frequência em torno de  $10^8$  Hz e cerca de 1 m de comprimento são as utilizadas para TV (VHF e UHF). Entretanto, como elas não são refletidas pela ionosfera, são necessários satélites para transmissões a longas distâncias (figura 1.137).



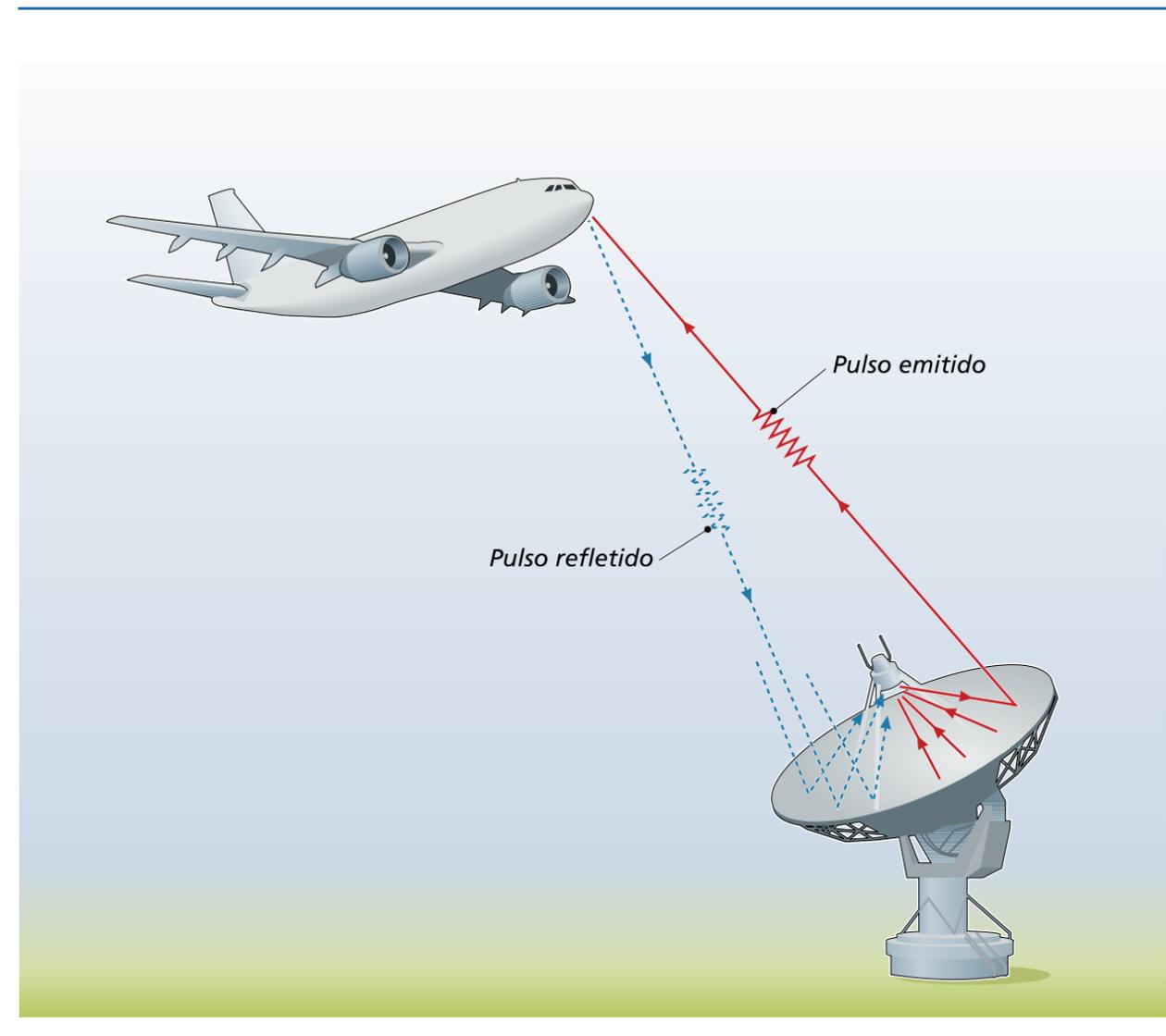


**Figura 1.137**  
Ondas de TV.

### Micro-ondas

São ondas eletromagnéticas cuja frequência está compreendida entre  $10^9$  e  $10^{11}$  Hz, e comprimento entre 1 e 0,001 m. Podem ser utilizadas na transmissão de sinais de TV, em telefonia e em modelos antigos de radares.

Marconi estabeleceu os princípios de funcionamento de um radar, e o inglês Robert Alexander Watson Watt desenvolveu o primeiro radar de utilização prática, em 1935. Basicamente, é um instrumento que, ao emitir um pulso de micro-ondas, refletido por um anteparo (um avião, por exemplo), permite a localização desse anteparo por causa da diferença de tempo entre a emissão e a reflexão do pulso (figura 1.138).



**Figura 1.138**  
Radar que utiliza micro-ondas.

### Radiação infravermelha

Como o calor do Sol chega à Terra? O Sol emite ondas com comprimento entre  $10^{-4}$  e  $10^{-7}$  m e frequência superior à das micro-ondas. Essas ondas interagem com os corpos, produzindo aquecimento. São chamadas infravermelhas pelo fato de estarem próximas, no espectro eletromagnético, da cor vermelha da luz visível. Dependendo do tipo de aplicação e do ambiente industrial, os sensores de presença ópticos podem utilizar o infravermelho para detecção de objetos.

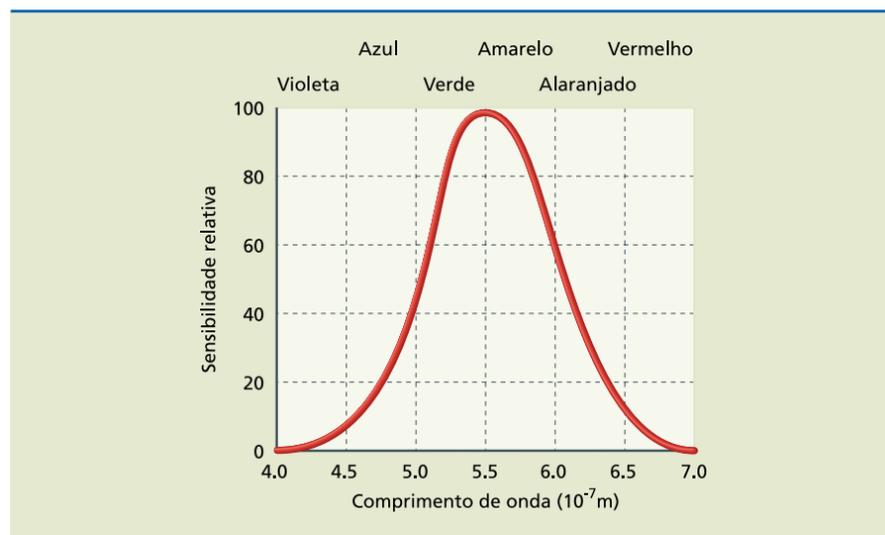
### Luz visível

Luz é toda onda eletromagnética que sensibiliza a retina do ser humano (pode ser enxergada). Esse tipo de onda possui pequena faixa de comprimento, entre  $6,9 \cdot 10^{-7}$  e  $4,3 \cdot 10^{-7}$  m. A luz visível com o maior comprimento de onda é o vermelho e, conforme o comprimento aumenta, a cor da luz se altera na sequência: alaranjado, amarelo, verde, azul e violeta (figura 1.139).



**Figura 1.139**

Espectro eletromagnético da luz visível.



### Radiação ultravioleta

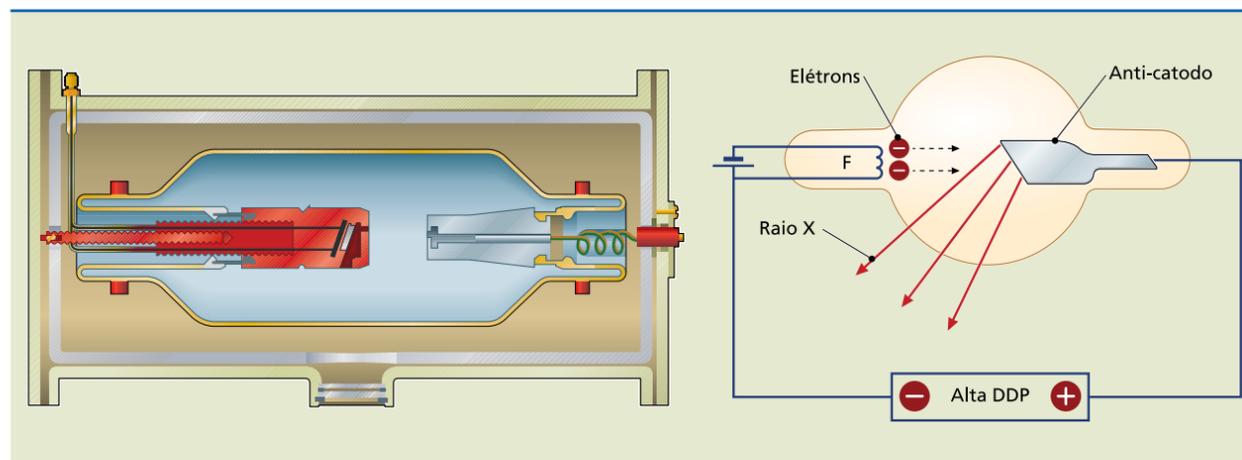
São ondas cujo comprimento é menor que o da luz violeta visível. O Sol e lâmpadas de vapor de mercúrio (lâmpadas de poste) emitem essa radiação, que é absorvida pela Terra para a produção da camada de ozônio.

### Raios X

Em 1895, o alemão Wilhelm Conrad Röntgen descobriu uma radiação proveniente do choque de um feixe de elétrons em movimento rápido em um anteparo metálico. Como ele desconhecia a natureza desses raios, batizou-os de raios X (figura 1.140).

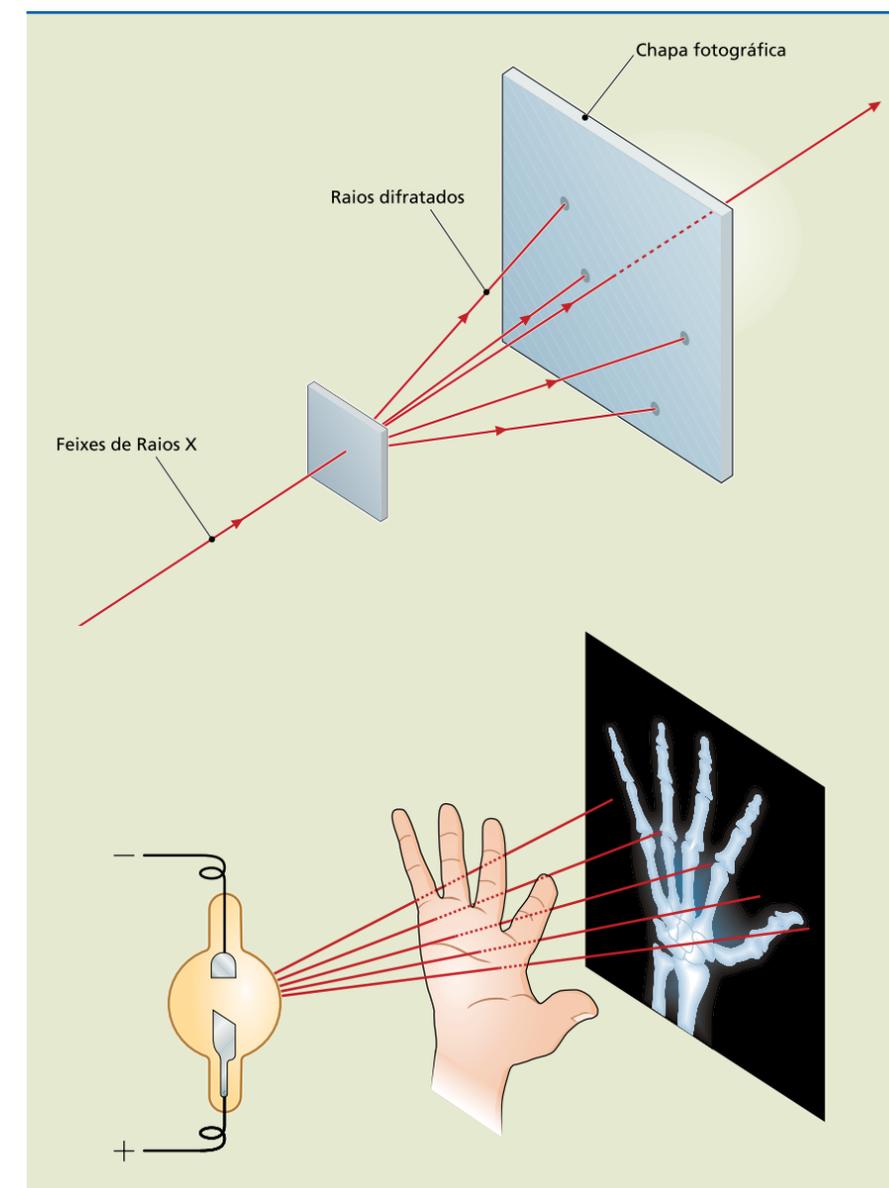
**Figura 1.140**

Raios X.



Essa onda eletromagnética, cuja frequência está entre  $10^{17}$  e  $10^{21}$  Hz, atravessa matéria sólida, líquida ou gasosa, ionizando seus átomos. Além disso, a penetração dos raios X depende da densidade do material. Materiais de alta densidade, como os ossos, absorvem essa radiação, porém ela atravessa músculos e pele.

Dessa maneira, utilizando esse tipo de raio, foi possível construir as máquinas de radiografia (figura 1.141).



**Figura 1.141**

Imagem produzida por raios X.

### Raios gama

Finalmente, no espectro eletromagnético, os raios gama são as ondas conhecidas de maior frequência. Essas ondas são emitidas pelos núcleos atômicos de elementos radioativos quando se desintegram, como em uma explosão nuclear. Assim como os raios X, são altamente prejudiciais à vida.

