

# Aula 9

## INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

### META

Apresentar as experiências de Faraday e Henry que viabilizaram o surgimento de fem induzidas a partir de campos magnéticos variáveis.

Estudar as correntes de Foucault ou correntes de redemoinho.

Mostrar e caracterizar o movimento relativo de um condutor em relação ao um campo magnético estático para os casos em que há um movimento linear de um condutor e um movimento circular de um circuito retangular.

Apresentar as equações de Maxwell

### OBJETIVO

Ao fim dessa aula você deve ser capaz de saber:

- ∉ definir fem induzida, como ela surge e sob que condições se mantém;
- ∉ calcular a fem induzida;
- ∉ identificar as correntes de Foucault;
- ∉ interpretar a variação do fluxo magnético como dependente do Movimento relativo do condutor em relação ao campo magnético;
- ∉ estabelecer as relações entre as equações básicas do eletromagnetismo;
- ∉ compreender as Equações de Maxwell para o campo eletromagnético.

### PRÉ- REQUISITOS

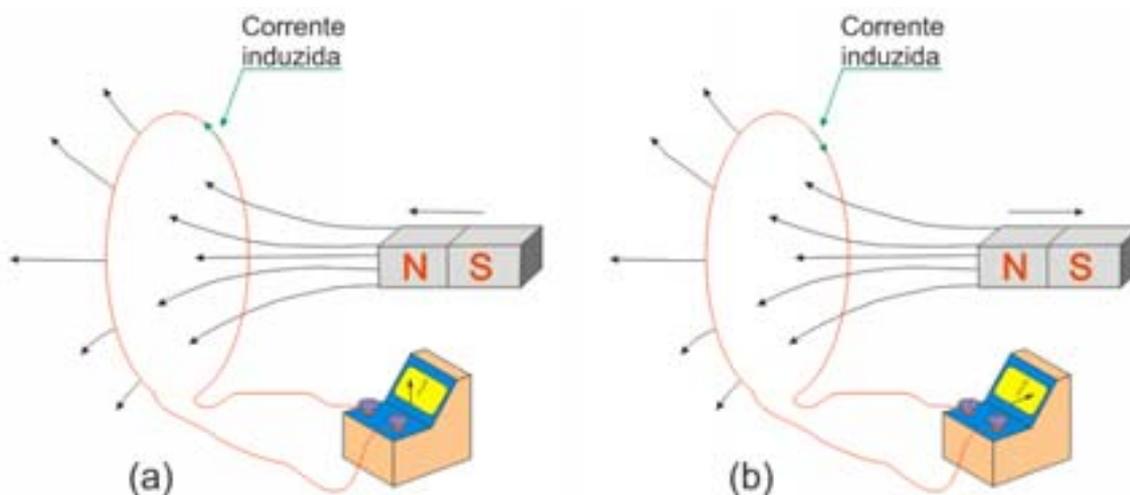
Conceitos de carga, campo elétrico e magnético.

Conhecer as leis de Gauss para a eletricidade e magnetismo, bem como a lei de Ampere.

## Introdução

Quase que simultaneamente e independentemente, os físicos Michel Faraday (1791–1867) na Inglaterra e Joseph Henry (1797–1878) nos Estados Unidos da América, descobriram em 1830, o fenômeno da indução eletromagnética.

Para se deduzir a formulação matemática que descreve o fenômeno, diversos experimentos foram realizados utilizando bobinas, ímãs e galvanômetros (aparelhos para medir corrente). Através aproximação ou afastamento do ímã de uma espira, foi detectada uma corrente proporcional a intensidade da variação do fluxo magnético e o sentido dessa corrente dependeria se o campo magnético está se aproximando ou se afastando (figura 11.1).



**Figura 11.1** (a) Corrente induzida pelo campo magnético do ímã quando ele se aproxima da espira e (b) corrente induzida pelo campo magnético do ímã quando ele se afasta da espira. O galvanômetro indica que a corrente induzida teve sentidos diferentes nas duas situações do experimento.

## 11 – Indução Eletromagnética

### 11.1 – Variação do fluxo magnético e fem induzida

Através do experimento descrito acima foi percebido que sempre que há variação no fluxo magnético existe uma corrente induzida no fio. Uma situação semelhante foi observada quando o ímã permaneceu parado e o diâmetro da espira foi diminuída. Este procedimento também provocou uma variação no fluxo magnético sobre a espira levando a indução de uma corrente que varia o seu sentido a depender se o raio está aumentando ou diminuindo.

A detecção de uma corrente quando o fluxo magnético varia no tempo, implica na existência de um campo elétrico o qual está aplicado sobre as cargas em movimento no

circuito fechado. Deste modo, uma **fem** induzida aparece ao longo do circuito que depende da taxa de variação do fluxo magnético no tempo.

Foi verificado experimentalmente que o sentido da **fem** induzida segue a regra da mão direita. Se a variação temporal do fluxo magnético for positiva ( $\frac{d\Phi_B}{dt} > 0$ ) a **fem** induzida aparece no sentido oposto à circulação estabelecida pela regra da mão direita, isto corresponde a um sentido negativo (figura 11.2).



**Figura 11.2** A **fem** induzida atua no sentido negativo, oposto ao sentido de circulação, quando o fluxo magnético cresce no tempo.

Se a variação temporal do fluxo magnético for negativa ( $\frac{d\Phi_B}{dt} < 0$ ) a **fem** induzida aparece no sentido da circulação estabelecida pela regra da mão direita, isto corresponde a um sentido positivo (figura 11.3).



**Figura 11.2** A **fem** induzida atua no sentido positivo, no mesmo sentido de circulação, quando o fluxo magnético decresce no tempo.

O que podemos concluir é que a **fem** induzida tem sinal contrário a variação do fluxo magnético. Uma tabela de sinais destas grandezas pode ser estabelecida (tabela 11.1).

**Tabela 11.1** Comparação dos sinais da variação do fluxo com a fem induzida.

Sinal da variação do fluxo ( $\frac{d\Phi_B}{dt}$ )	Sinal da <b>fem</b> induzida
+	-
-	+

A **fem** induzida sempre se opõe a variação do fluxo magnético (fluxo indutor). Podemos escrever uma expressão matemática que descreva as observações experimentais, assim

$$\mathbf{fem\ induzida} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (11.1)$$

A equação 11.1 exprime a lei de Faraday-Henry para indução eletromagnética produzida por uma variação de fluxo magnético.

A lei de lei de Faraday-Henry pode ser anunciada da seguinte forma:

*Quando um circuito fechado é submetido a um campo magnético variável, surge nele uma fem induzida que tem sinal contrário a variação do fluxo magnético no tempo.*

O fluxo magnético é dado através da equação 9.6

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

que na situação do campo magnético uniforme e área conhecida  $\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos\phi$  e, se  $\phi$  for variável com o tempo, ele é igual  $\omega t$ , onde  $\omega = 2\pi f$ .

A **fem** induzida está correlacionada com um capoeletrico. A partir da equação 5.8, podemos escrever para um circuito fechado integrando sobre todo o comprimento a expressão

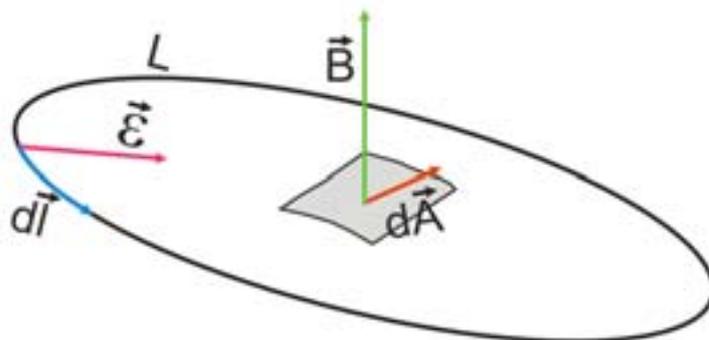
$$\mathbf{fem} = \oint_L \vec{\epsilon} \cdot d\vec{l} \quad (11.2)$$

então podemos escrever a equação 11.1 como

$$\oint_L \vec{\varepsilon} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint_L \vec{\varepsilon} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (11.3)$$

A equação 11.3 é válida para uma linha qualquer L e não é obrigatório que a linha seja um fio condutor; é outra maneira de descrever a **lei de Faraday-Henry**. A integral da esquerda é sobre todo o comprimento L da trajetória fechada e a integral da direita é sobre toda a área que ocupa a trajetória fechada. Obviamente que a corrente só aparecerá se a trajetória coincidir com um fio na presença de um campo magnético variável no tempo. A figura 11.3 dar uma visão da ação destes vetores em um circuito fechado.



**Figura 11.3** Visualização do fluxo magnético variável atuando sobre um circuito L fechado onde um campo elétrico é induzido na circulação, independente da existência de um fio condutor.

### Exemplo 11.1

*Determinar a amplitude da fem induzida no tempo  $t = 0$  s e  $t = 2$  s, em um circuito composto de  $N = 50$  voltas, com área  $A = 5 \times 10^4 \text{ m}^2$ , colocado perpendicularmente a um campo magnético que oscila no tempo senoidalmente com uma frequência de  $f = 500 \text{ Hz}$ . A amplitude máxima do campo magnético é dada por  $B_0 = 2 \times 10^2 \text{ T}$ .*

Solução:

O campo magnético pode ser expresso por

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \text{sen } \omega t$$

o fluxo magnético é dado por

$$\Phi_B = AB = AB_0 \text{sen } \omega t$$

para um circuito de N voltas, ficamos com

$$\Phi_B = NAB_0 \text{sen } \omega t$$

A fem induzida é expressa por

$$fem = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(NAB_0 \text{sen } \omega t)}{dt} = -NAB_0 \frac{d(\text{sen } \omega t)}{dt} = -NAB_0 \omega \cos \omega t$$

A **fem** induzida alternada oscila na mesma frequência do campo magnético e seus valores são por

t = 0 s:

$$fem = -NAB_0 \omega \cos \omega t = -(50)(5 \times 10^{-4})(2 \times 10^{-2})(500) \cos(2\pi 500 \times 0)$$

$$fem = -0,25 \text{ V}$$

t = 2 s:

$$fem = -NAB_0 \omega \cos \omega t = -(50)(5 \times 10^{-4})(2 \times 10^{-2})(500) \cos(2\pi 500 \times 2)$$

$$fem = 0,23 \text{ V}$$

Para cada tempo aparecerá no circuito um novo valor de **fem**, pois esta oscila juntamente com o campo magnético, inclusive podendo mudar até o sinal.

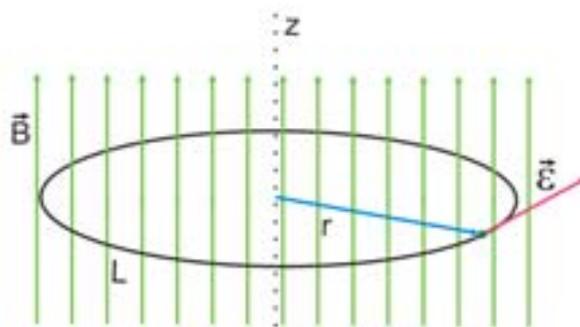
---

**Exemplo 11.2**

*Em uma determinada região existe um campo magnético paralelo ao eixo Z, dependente do tempo e com simetria axial, ou seja, o campo varia com a distância r ao eixo Z. Determine o campo elétrico em cada ponto do espaço.*

Solução:

Podemos fazer um desenho para representar esta situação física como



O campo elétrico  $\kappa$  produzido deve depender apenas da distância  $r$  e é perpendicular ao campo magnético. As linhas de força do campo elétrico são circunferências concêntricas centradas no eixo  $z$ . Usando a equação sobre uma determinada trajetória com raio  $r$ , temos

$$fem = \oint_L \vec{\varepsilon} \cdot d\vec{l} = \oint_L \varepsilon dl \cos 0 = \varepsilon \oint_L dl$$

A integral do circuito fechado corresponde ao comprimento da circunferência, assim

$$fem = \varepsilon(2\pi r)$$

Utilizando a equação 11.1, temos

$$\varepsilon(2\pi r) = -\frac{d\Phi_B}{dt} \rightarrow \varepsilon = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Supondo um campo magnético uniforme  $\mathbf{B}$  em toda área da circunferência, implicando que ele não depende de  $r$  e que podemos escrever o fluxo usando a equação 9.6, assim

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \int dA = B(\pi r^2)$$

Finalmente, temos

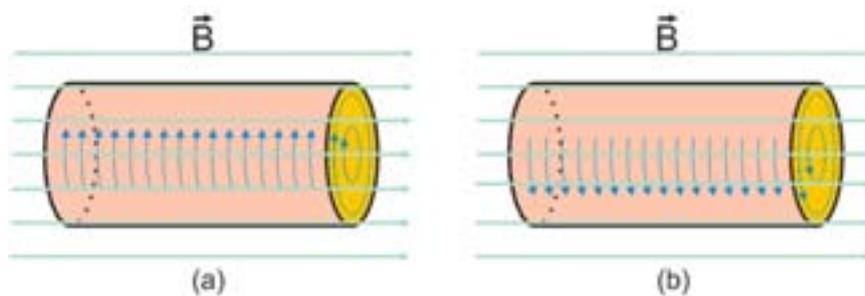
$$\varepsilon = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{1}{2\pi r} \frac{dB(\pi r^2)}{dt} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

Obviamente que o procedimento aqui adotado foi utilizar a equação 11.3 em partes, para um melhor entendimento do problema.

## 11.2 – Correntes de Foucault

As correntes de Foucault também são chamadas também de correntes de redemoinho.

Vamos supor que um condutor foi colocado em um campo magnético variável no tempo. O campo elétrico devido ao campo magnético fornece um movimento ordenado aos elétrons da banda de condução. Em todo o condutor aparece correntes circulares, parecendo redemoinhos, que são chamadas de correntes de Foucault. O sentido delas (figura 11.4) segue o mesmo princípio da regra da mão direita, que vai depender de se o campo é (a) crescente ou (b) decrescente.



**Figura 11.4** Correntes de Foucault em um condutor colocado em um campo magnético variável (a) crescente no tempo ( $dB/dt > 0$ ) e (b) decrescente no tempo ( $dB/dt < 0$ ).

O comportamento das correntes de Foucault em forma de redemoinhos pode ser utilizado para o desenvolvimento de equipamentos para detecção de metais. A corrente em forma circular cria um campo magnético, este campo pode ser detectado por uma bobina, que é chamada bobina de sinal, indicando a presença de metais. Sistema bastante utilizado em aeroportos para a segurança dos passageiros.

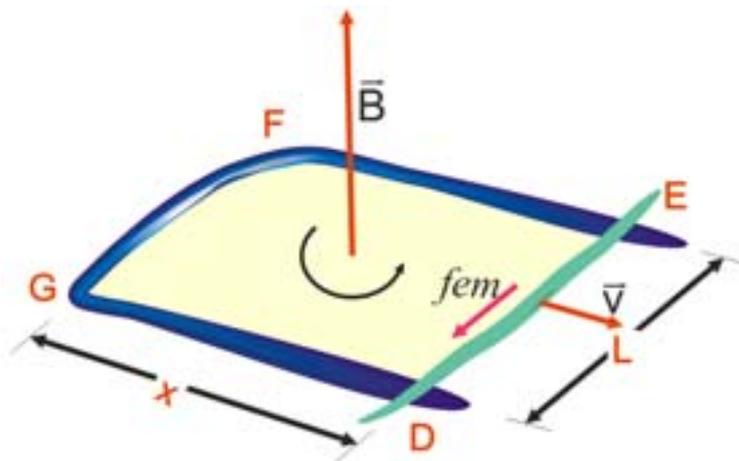
Entretanto, existem situações que as correntes de Foucault são indesejáveis, é o caso dos núcleos de transformadores, eles são construídos de placas paralelas, separadas por isolantes e arrumadas de tal maneira que as correntes de Foucault ficam perpendiculares as suas superfícies. Mas, mesmo assim elas existem e devido a resistência elétrica das placas, aparece o aquecimento devido ao efeito Joule. Em muitas situações, a eficiência do transformador é diminuída devido a este aquecimento.

### ***11.3 – Movimento relativo de um condutor em relação ao um campo magnético estático***

O aparecimento de uma **fem** não está associada unicamente a variação de um campo magnético. Existem outras maneiras de se variar o fluxo magnético modificando a área do circuito em relação ao fluxo, através do movimento de um condutor ou ângulo entre a superfície do circuito e o campo magnético através da rotação de uma espira. Vamos analisar estes dois casos clássicos e veremos que uma **fem** induzida também aparecerá no circuito, mesmo que se tenha um campo magnético constante no tempo.

**CASO 1: Movimento linear de um condutor**

Vamos supor um circuito retangular cujo um dos lados se movimenta em relação aos demais, com uma velocidade  $\vec{v}$ , imerso em um campo magnético constante perpendicular ao plano do circuito (figura 11.5).



**Figura 11.5** Circuito retangular imerso em um campo magnético constante. Uma fem induzida aparece contrária ao sentido de circulação DEFG.

Só aparece uma **fem** induzida no trecho DE devido ao movimento relativo ao campo magnético. Esta **fem** está correlacionada com a variação de área, sendo assim, o fluxo pode ser determinado por através da integração sobre toda a área usando a equação 9.6 na situação de um campo magnético constante e área conhecida.

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi = BA \cos 0 = BA = BxL$$

Usando a equação 11.1 para **fem** induzida, temos

$$fem = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{dBxL}{dt} = -BL \frac{dx}{dt}$$

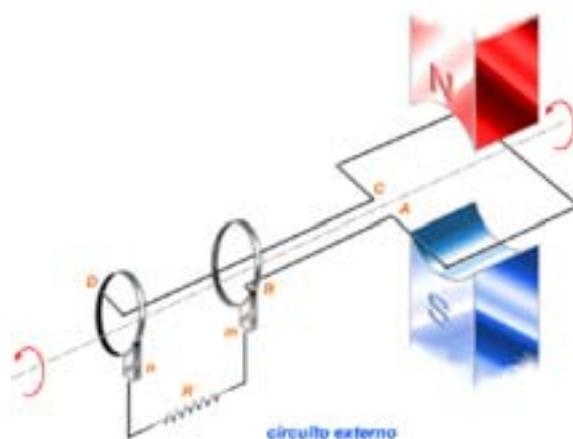
a derivada está apenas na dimensão que sofre variação a qual corresponde a velocidade do condutor, assim

$$fem = -BLv \quad (11.4)$$

O sinal corresponde ao sentido que a **fem** surgiu, contrária a circulação, porque o fluxo magnético está aumentando no tempo.

### **CASO 2: Movimento circular de um circuito retangular**

Vamos supor um circuito que se encontra entre os pólos de dois ímãs conforme a figura 11.6.



**Figura 11.6** Circuito retangular entre os pólos de dois ímãs em movimento circular devido ao torque realizado pelo campo magnético (Fonte: <http://cepa.if.usp.br/e-fisica/imagens/eletricidade/basico/cap16/fig322.gif>).

A situação que é descrita na figura 11.6 nos fornece um campo magnético constante na vertical e o ângulo entre a superfície do circuito e este campo sofre uma variação durante o tempo, usando a equação 9.6, temos

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi$$

como o ângulo é variável, podemos substituir  $\phi$  por  $\omega t$ , assim

$$\Phi_B = BA \cos \omega t$$

Usando a equação 11.1, temos

$$fem = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -BA \frac{d(\cos\omega t)}{dt} = -BA \frac{d\omega t}{dt} (-\sin\omega t)$$

$$\mathbf{fem} = \omega B A \sin\omega t \quad (11.5)$$

Fazendo uma comparação entre as equações 11.4 e 11.5, percebemos que na primeira a **fem** induzida entre os terminais DE é uma constante ao contrário da segunda que a **fem** oscila no tempo, típico de um alternador. Resultado equivalente ao encontrado para um campo magnético oscilante no exemplo 11.1.

## 11.4 – As equações de Maxwell

Quando examinamos a mecânica clássica e a termodinâmica encontramos um conjunto de equações que descrevem muito bem os fenômenos envolvidos nestas duas grandes áreas da física. Em relação a mecânica clássica temos as três leis de Newton e na termodinâmica encontramos as três leis da termodinâmica.

Provavelmente o escocês James Clerk Maxwell deve ter deparado com a seguinte indagação: *O que existe de errado nas teorias que descrevem o eletromagnetismo que não formam um conjunto de equações consistentes como na mecânica clássica e na termodinâmica?*

Vamos examinar o que estudamos até agora para podermos entender a possível indagação de Maxwell. A tabela 11.2 mostra um conjunto de equações básicas do eletromagnetismo. Existem muitas outras, mas são derivadas destas para resolver problemas específicos.

A simetria sempre permeou a física e elas levam a novas idéias ou descobertas. Por exemplo, se um corpo 1 atrai um corpo 2 com uma força  $\vec{F}$ , o corpo 2 atrairá o corpo 1 com uma força  $-\vec{F}$ ; se existe um corpo com carga elétrica negativa como o elétron, existe outro, com carga positiva como o pósitron (anti-elétron). Como nós vamos unicamente fazer uma análise de simetria da tabela 11.2, as constantes  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  serão desprezadas, uma vez que estas quantidades resultam do sistema de unidades escolhido.

**Tabela 11.2** Equações básicas do eletromagnetismo.

Número	Nome	Equação	Referência
I	Lei de Gauss para a eletricidade	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q/\epsilon_0$	Eq. 6.5
II	Lei de Gauss para o magnetismo	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	Eq. 9.8
III	Lei de Faraday-Henry da indução	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$	Eq. 11.3
IV	Lei de Ampère	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$	Eq. 10.22

Os lados esquerdos das equações da tabela 11.2 são totalmente simétricos em pares. Em relação às superfícies fechadas, as equações I e II são integrais de superfície de  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$ , respectivamente. As equações III e IV são integrais de linha para um circuito fechado de  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$ , respectivamente. Porém, os lados esquerdos dessas equações não são simétricos, existem duas assimetrias que iremos discutir agora.

A primeira assimetria é que existem centros isolados de cargas elétricas isoladas, como os elétrons e prótons, e não existem centros isolados de cargas magnéticas, que seriam os monopólos magnéticos. Isto corresponde a quantidade  $q$  que aparece na equação I e não tem uma quantidade correspondente na equação II. De maneira semelhante, o termo  $\mu_0 I = \mu_0 dq/dt$  que aparece na equação IV, não existe um termo similar na equação III para uma corrente de monopólos magnéticos. Esta assimetria tem levado muitos físicos a estudar o assunto e tentar encontrar na natureza o monopólo magnético, entretanto, até o momento, as experiências foram infrutuosas.

A segunda assimetria está novamente entre as equações III e IV. O lado direito da equação III onde tem o termo  $-d \int \vec{B} \cdot d\vec{A}/dt = -d\Phi_B/dt$  mostra que se um campo magnético muda no tempo produz um campo elétrico ( $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l}$ ). Por simetria, poderíamos dizer que uma mudança no campo elétrico ( $-d\Phi_E/dt$ ) produzirá um campo magnético ( $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l}$ ). Experimentalmente foi verificado em testes com cargas de capacitores de placas paralelas que uma mudança no campo elétrico induz um campo magnético. Então, poderíamos arriscar a escrever uma equação que vamos chamar de lei de Faraday modificada, assim

$$\oint \vec{B}_E \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_E}{dt} \quad (11.6)$$

A equação 11.6 é simétrica a lei de Faraday, mas existem dois erros que precisam ser corrigidos. O primeiro é quanto ao sinal, os experimentos mostram que o sinal deve ser positivo no lugar do negativo e o segundo erro é quanto à dimensionalidade. Para isto, é necessário introduzir o fator  $\epsilon_0\mu_0$  no lado direito. Assim, chegamos na equação que chamamos de *introdução a lei de Maxwell* (equação 11.7).

$$\oint \vec{B}_E \cdot d\vec{l} = +\epsilon_0\mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (11.7)$$

Maxwell percebeu que a lei de Ampère poderia ser mais geral incluindo a geração do campo magnético através da variação do campo elétrico, sendo assim, surgiu a *lei de Ampère-Maxwell* (equação 11.8), onde o campo magnético pode ser gerado por uma corrente e a variação do campo elétrico ou por apenas um deles.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = +\epsilon_0\mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I \quad (11.8)$$

sabendo que

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

deste modo, a equação 11.8 pode ser escrita como

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = +\epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A} + \mu_0 I \quad (11.9)$$

A equação 11.9 A tabela 11.2 deve ser reescrita e ela pode ser agora chamada de equações de Maxwell (tabela 11.3). Como foi dito anteriormente, uma situação experimental que levou a modificação da lei de Ampère foi a carga de capacitores de placas paralelas. Quando o capacitor está sendo carregado a corrente flui no condutor, gerando um campo magnético em volta dele. As cargas começam se acumular nas placas, no tempo um campo elétrico começa a surgir, gerando entre as placas um campo magnético. Quando o capacitor fica carregado ambos os campos magnéticos (do fio e entre as placas) deixam de existir. O primeiro porque a corrente não estará mais fluindo e o segundo porque o campo elétrico não será mais variável, não haverá mais um fluxo de campo elétrico. Os campos magnéticos voltaram a existir se o capacitor por algum motivo for descarregado, teremos mais uma vez uma situação de existência de corrente e variação do fluxo elétrico.

**Tabela 11.3** Equações de Maxwell para o campo eletromagnético

Número	Nome	Equação	Referência
I	Lei de Gauss para a eletricidade	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q/\epsilon_0$	Eq. 6.5
II	Lei de Gauss para o magnetismo	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	Eq. 9.8
III	Lei de Faraday-Henry da indução	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$	Eq. 11.3
IV	Lei de Ampère-Maxwell	$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = +\epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A} + \mu_0 I$	Eq. 11.9

A figura 11.7 mostra que quando o campo elétrico aumenta o campo magnético gerado está no mesmo sentido da circulação e quando o campo elétrico diminui o campo magnético está no sentido oposto à circulação. Comportamento contrário quando o campo magnético gera um campo elétrico, pois a *fem* induzida tem sinal oposto a variação do fluxo magnético.

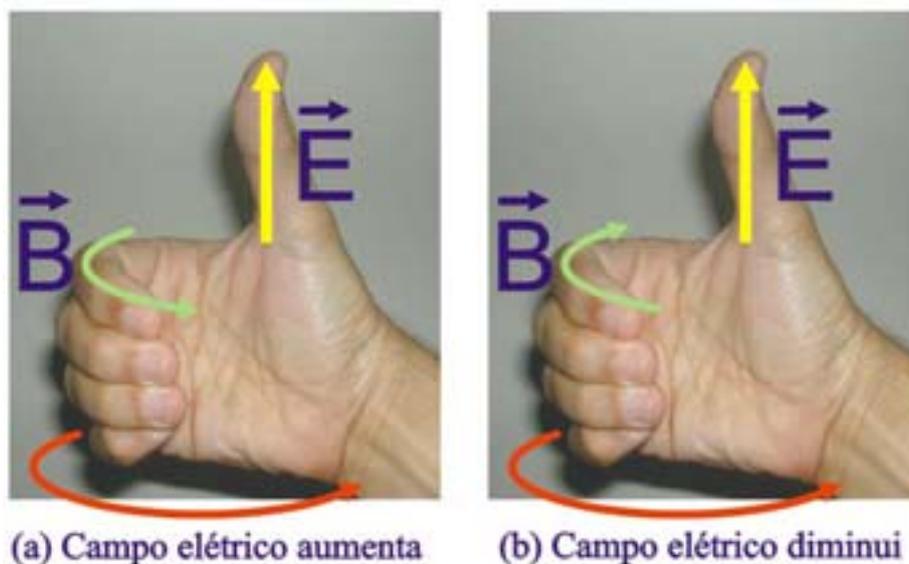
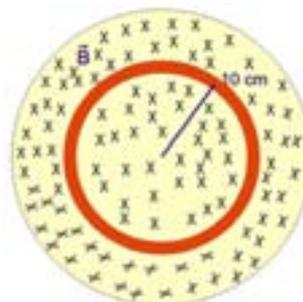


Figura 11.7 Campo magnético gerado por um campo elétrico que varia no tempo (dependente do tempo).

As equações de Maxwell têm funcionado muito bem para diversas aplicações, como as antenas de rádio e televisão, circuitos elétricos, feixes de átomos e moléculas ionizados, etc. Por outro lado, as interações eletromagnéticas de partículas que têm alta energia, como é o caso de partículas fundamentais, devem ser tratadas com uma abordagem diferente, usando as leis da mecânica quântica.

## ATIVIDADES

- 1) O campo magnético entre os pólos de um eletroímã permanece sempre uniforme, porém o seu módulo aumenta com uma taxa de crescente de  $0,02 \text{ T/s}$ . A área da espira condutora imersa no campo é igual a  $120 \text{ cm}^2$  e a resistência total do circuito, incluindo o galvanômetro, é igual a  $5 \text{ T}$ . a) Calcule a **fem** induzida e a corrente induzida no circuito. b) O que ocorreria com a **fem** induzida e a corrente induzida no circuito se a espira condutora fosse substituída por uma espira isolante?
- 2) Determine o campo elétrico em uma região do espaço delimitada por uma circunferência de raio  $r = 0,5 \text{ m}$  imersa em um campo de varia no tempo em uma taxa crescente de  $0,08 \text{ T/s}$ .
- 3) Descreva com suas as próprias palavras o que são correntes de Foucault.
- 4) Em relação ao circuito da figura 11.5, considere que tanto o vetor campo magnético como a velocidade estão em sentidos opostos. Faça um desenho desta situação e determine a **fem** induzida.
- 5) Uma bobina retangular com 80 espiras enroladas de modo compacto possui dimensões de  $25 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ . O plano da bobina gira em  $0,06 \text{ s}$  de uma posição na qual ele forma um ângulo de  $45^\circ$  com um campo magnético de  $1,1 \text{ T}$  até uma posição perpendicular ao campo. Qual é a **fem** média induzida na bobina?
- 6) Em uma experiência de física feita em um laboratório, uma bobina com 200 espiras com seção reta de área igual a  $12 \text{ cm}^2$  gira em  $0,04 \text{ s}$  desde uma posição na qual seu plano é perpendicular ao campo magnético da Terra até uma posição na qual o seu plano é paralelo ao campo. Qual é a **fem** média induzida, sabendo que o campo magnético da Terra é igual a  $6 \times 10^{-5} \text{ T}$ ?
- 7) Um anel circular está em uma região do espaço onde existe um campo magnético uniforme, como indica a figura ao lado. O campo magnético está entrando no plano da figura. Determine o sentido (horário ou anti-horário) da corrente induzida no anel quando a)  $B$  está aumentando; b)  $B$  está diminuindo; c)  $B$  permanece constante com um valor igual a  $B_0$ . Explique o seu raciocínio.



## CONCLUSÃO

Ao longo dessa aula estudamos um dos fenômenos mais importantes, senão o mais importante, do eletromagnetismo, pois foi exatamente através da análise da relação entre eletricidade e magnetismo que descobriu-se o fenômeno da indução eletromagnética, que selou de uma vez por todas as evidências outrora levantadas, por exemplo por Hans Cristian Oersted, de que se tratavam de fenômenos dependentes e que guardavam entre si íntimas relações.

James Maxwell percebeu que entre as equações de Gauss, Ampère, Coulomb, Faraday havia relações ainda não exploradas e propôs pequenas correções e sintetizou-as brilhantemente em quatro leis ou postulados que receberam o seu nome, postulados que foram capazes de prever a existência das ondas eletromagnéticas e fundamentá-las teoricamente.

## RESUMO

### *Varição do fluxo magnético e fem induzida*

$$fem\ induzida = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

A lei de Faraday-Henry pode ser anunciada da seguinte forma:

***Quando um circuito fechado é submetido a um campo magnético variável, surge nele uma fem induzida que tem sinal contrário a variação do fluxo magnético no tempo.***

### *Correntes de Foucault*

O campo elétrico devido ao campo magnético fornece um movimento ordenado aos elétrons da banda de condução. Em todo o condutor aparecem correntes circulares, parecendo redemoinhos, que são chamadas de correntes de Foucault.

### *Movimento relativo de um condutor em relação a um campo magnético estático*

#### *Movimento linear de um condutor*

$$fem = -BLv$$

#### *Movimento circular de um circuito retangular*

$$fem = \omega B A \sin \omega t$$

**As equações de Maxwell para o campo eletromagnético**

Número	Nome	Equação	Referência
I	Lei de Gauss para a eletricidade	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q/\epsilon_0$	Eq. 6.5
II	Lei de Gauss para o magnetismo	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	Eq. 9.8
III	Lei de Faraday-Henry da indução	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$	Eq. 11.3
IV	Lei de Ampère-Maxwell	$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = +\epsilon_0\mu_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A} + \mu_0 I$	Eq. 11.9

**PRÓXIMA AULA**

Em nossa próxima aula estudaremos o fenômeno da Indutância.

**REFERÊNCIAS**

ALONSO, M., Finn, E. J. Física. 1ed. São Paulo: Addison-Wesley, 1999, 936p.

SERWAY, R. A., JEWETT Jr, J. W. Princípios de Física. Vol. 1. 3 ed. São Paulo: Thomson, 2005, 403p.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fundamentals of Physics – Extended. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 1993, 1306p.