

Capítulo 10

Equações de Maxwell

10.1 Fluxo Magnético

- Lei de Gauss: relaciona fluxo elétrico com carga elétrica.
- O equivalente para campos magnéticos também é uma equação fundamental do eletromagnetismo:

$$\Phi_B^S = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \text{Lei de Gauss, Magnetismo} \quad (10.1)$$

- Expressa a inexistência de cargas magnéticas, também chamadas monopolos magnéticos.
- Campos elétricos são gerados pela simples presença de cargas elétricas, ou pela variação temporal de campos magnéticos. Já os campos magnéticos podem ser produzidos por correntes, i.e. cargas em *movimento*, ou, como veremos adiante, por variação temporal do campo elétrico.
- Apenas configurações *dipolares*, como e.g. ímas com polos norte e sul, podem gerar campos magnéticos. Tais configurações surgem de movimentos internos de cargas dentro dos corpos magnéticos.
- Paul Dirac mostrou que, se monopolos magnéticos existissem, isso explicaria a quantização da carga elétrica. Infelizmente, cargas magnéticas nunca foram observados.

10.2 Corrente de Deslocamento: Lei de Ampere-Maxwell

Considere um capacitor de placas paralelas sendo carregado. Pela Lei de Gauss, a carga em um determinado instante é dada por

$$q = \epsilon_0 \Phi_E^S \quad (10.2)$$

onde Φ_E^S é o fluxo por uma superfície S que contém q . A corrente no circuito associado é

$$i = \frac{dq}{dt} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E^S}{dt} \quad (10.3)$$

Entretanto, entre as placas, não há movimento de cargas e não há, portanto, corrente de *condução*.

Para impor uma "continuidade" da corrente, Maxwell propôs a idéia de uma corrente de *deslocamento* i_d entre as placas igual à corrente de condução no circuito:

$$i_d = i = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E^S}{dt} \quad (10.4)$$

O nome não é apropriado, pois não há movimento de cargas que crie corrente entre as placas. A idéia, no entanto, é que a variação temporal do fluxo elétrico faz o papel de uma corrente imaginária entre as placas.

Em outras palavras, da mesma forma que no circuito existe um campo elétrico empurrando as cargas e criando a corrente de condução, entre as placas também existe um campo elétrico; ele simplesmente não tem cargas para criar uma corrente de condução, mas ele está associado a uma corrente de deslocamento.

De fato, entre as placas do capacitor $E = \sigma/\epsilon_0$ e o fluxo na superfície S de área A do capacitor é $\Phi_E^S = EA = \sigma A/\epsilon_0 = q/\epsilon_0$. Portanto, pela Eq. 10.4, i_d fica

$$i_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E^S}{dt} = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \left(\frac{q}{\epsilon_0} \right) = \frac{dq}{dt} = i \quad (10.5)$$

Maxwell propôs então que esta corrente de deslocamento deve ser adicionada à corrente de condução na Lei de Ampere

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(i_{\text{cond}} + i_d) \quad (10.6)$$

ou seja

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{\text{cond}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E^S}{dt} \quad (\text{Lei de Ampere - Maxwell}) \quad (10.7)$$

Note que, com essa adição, se estabelece uma simetria com a Lei de Faraday: da mesma forma que a variação do fluxo magnético gera um campo elétrico, agora vemos que a variação do fluxo elétrico gera um campo magnético.

De fato, a Lei de Ampere não faria sentido sem o termo extra de Maxwell. Uma maneira simples de ver isso é imaginar uma superfície aberta S_1 definindo uma curva C , atravessada pela corrente de condução, como na Fig 10.1. Pode-se usar a Lei de Ampere para obter o campo magnético circulante nesse caminho. Entretanto, se mantivermos a curva C mas deformarmos a superfície de tal forma que ela passe entre as placas do capacitor e nunca seja atravessada pela corrente (e.g. a superfície S_2), a Lei de Ampere original diria que a circulação do campo em C é nula. Obviamente, o campo magnético real não pode depender da configuração de uma superfície imaginária (Feynman). Isso indica que algo está faltando na equação original: a corrente de deslocamento de Maxwell.

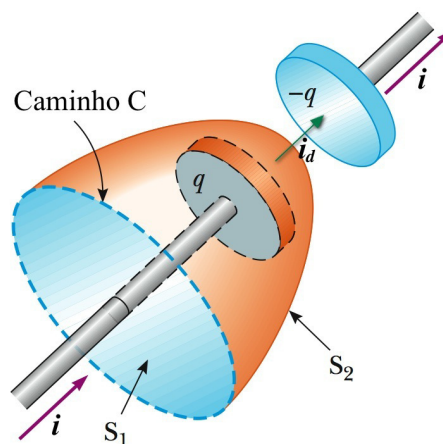


Figura 10.1: Corrente de deslocamento em um capacitor de placas paralelas e carga q . O campo magnético no caminho C não depende da superfície Amperiana escolhida, o que implica a necessidade da corrente de deslocamento entre as placas. (Serway)

10.3 Equações de Maxwell: Forma Integral

As equações de Maxwell descrevem como cargas e correntes dão origem a campos elétricos e magnéticos. Essas equações são dadas, em sua forma integral, por

$$\Phi_E^S \equiv \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} \quad (\text{Lei de Gauss}) \quad (10.8)$$

$$\Phi_B^S \equiv \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss, Magnetismo}) \quad (10.9)$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B^C}{dt} \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (10.10)$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{\text{in}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E^C}{dt} \quad (\text{Lei de Ampere}) \quad (10.11)$$

onde:

S é uma superfície fechada,

$d\vec{S}$ é um vetor perpendicular a S ;

C é uma curva fechada,

$d\vec{l}$ é um vetor paralelo (tangencial) a C ;

\vec{E} é o campo elétrico;

\vec{B} é o campo magnético;

Φ_E^S é o fluxo elétrico que atravessa S ;

Φ_B^S é o fluxo magnético que atravessa S ;

q_{in} é a carga elétrica dentro de S ;

$i_{\text{in}} = dq/dt$ é a corrente elétrica que atravessa C ;

Φ_E^C é o fluxo elétrico na superfície *aberta* apoiada em C ;

Φ_B^C é o fluxo magnético na superfície *aberta* apoiada em C ;

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ é a permissividade elétrica no vácuo;

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.26 \times 10^{-6} \text{ T.m/A}$ é a permeabilidade magnética no vácuo.

- Lei de Gauss: indica como cargas elétricas criam campos elétricos; note que somente as cargas dentro da superfície Gaussiana contribuem para o fluxo elétrico.
- Lei de Gauss do magnetismo: formaliza a inexistência de monopólos magnéticos (cargas magnéticas).
- Lei de indução de Faraday: indica que um fluxo magnético variável pode induzir a formação de um campo elétrico circulante e, por conseguinte, uma diferença de potencial e uma corrente elétrica. O sinal negativo garante que a corrente induzida produz um campo magnético que se opõe a variação que lhe deu origem (Lei de Lenz). Caso contrário, o feedback positivo seria incompatível com conservação de energia.
- A Lei de Ampere descreve duas maneiras de gerar um campo magnético circulante:
 - i) através de correntes elétricas,
 - ii) por variação temporal do fluxo elétrico.

- Por outro lado, cargas testes q com velocidade v na presença destes campos sofrem forças eletromagnéticas, descritas pela força de Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (10.12)$$

- Juntas, essas equações descrevem todos os fenômenos eletromagnéticos conhecidos.

10.4 Operadores Diferenciais

Definindo um operador diferencial $\vec{\nabla}$

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right), \quad (10.13)$$

visualizado como um vetor comum, e usando operações de cálculo vetorial, como produto escalar e produto vetorial, podemos definir operadores convenientes para cálculos eletromagnéticos.

10.4.1 Gradiente

Seja ϕ um campo escalar. Seu gradiente é um vetor, denotado por $\vec{\nabla}\phi$, e definido por

$$\vec{\nabla}\phi = \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}, \frac{\partial\phi}{\partial y}, \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) \quad (10.14)$$

10.4.2 Divergente

Seja $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ um campo vetorial. Seu divergente é um escalar, denotado por $\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ e definido por

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad (10.15)$$

10.4.3 Rotacional

Seja $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ um campo vetorial. Seu rotacional é um vetor, denotado por $\vec{\nabla} \times \vec{E}$ e definido por

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \quad (10.16)$$

10.4.4 Laplaciano

Seja ϕ um campo escalar. Seu Laplaciano é um escalar, denotado por $\nabla^2\phi$ e definido como $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}\phi$, i.e. o divergente do gradiente de ϕ :

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} \quad (10.17)$$

Pode-se ainda definir o Laplaciano de um vetor \vec{E} como um vetor cujas componentes são Laplacianos das componentes de \vec{E} :

$$\nabla^2 \vec{E} = (\nabla^2 E_x, \nabla^2 E_y, \nabla^2 E_z) \quad (10.18)$$

10.4.5 Relações entre Operadores

Exercício 1

Mostre que

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = 0 \quad (10.19)$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \phi) = 0 \quad (10.20)$$

para quaisquer ϕ e \vec{A} .

Solução:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{A}) &= \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}, \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}, \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \\ &= \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 A_y}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 A_z}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z \partial x} - \frac{\partial^2 A_x}{\partial z \partial y} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (10.21)$$

E

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \phi) &= \vec{\nabla} \times \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \\ &= \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial y}, \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial x} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z}, \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial x} \right) \\ &= \vec{0} \end{aligned} \quad (10.22)$$

Essas relações implicam:

i) $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \Rightarrow \exists \vec{A} : \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$

ii) $\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \Rightarrow \exists \phi : \vec{E} = \vec{\nabla} \phi$

Exercício 2

Mostre que

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (10.23)$$

Solução:

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}, \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}, \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right)$$

Para e.g. a componente x do operador, temos

$$\begin{aligned}
 \left[\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \right]_x &= \frac{\partial(\vec{\nabla} \times \vec{A})_z}{\partial y} - \frac{\partial(\vec{\nabla} \times \vec{A})_y}{\partial z} \\
 &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \\
 &= \frac{\partial^2 A_y}{\partial y \partial x} - \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z \partial x} \\
 &= \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z \partial x} - \underbrace{\frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2}}_{\nabla^2 A_x} \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} \underbrace{\left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \right)}_{\vec{\nabla} \cdot \vec{A}} - \nabla^2 A_x \\
 &= \vec{\nabla}_x (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 A_x
 \end{aligned} \tag{10.24}$$

Mostrando-se similarmente para as componentes y e z , chega-se à expressão vetorial.

10.5 Fluxo e Circulação

Vamos calcular fluxo e circulação de elementos infinitesimais e mostrar que divergente é fluxo por unidade de volume e rotacional é circulação por unidade de área.

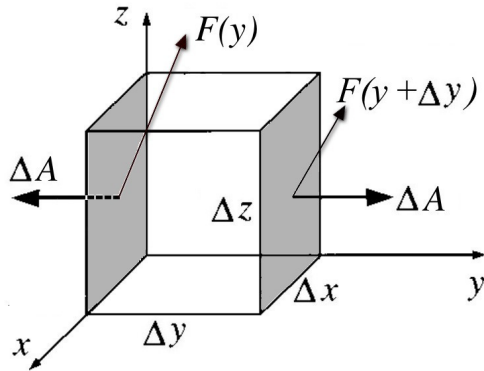


Figura 10.2: Fluxo de $\vec{F}(x, y, z)$ em um cubo infinitesimal. Os elementos de área mostrados tem magnitude $\Delta A = \Delta x \Delta z$, mas apontam em sentidos opostos em y e em $y + \Delta y$. (Adaptado de Griffiths)

Considere o fluxo de um campo $\vec{F}(x, y, z)$ através de um elemento de volume infinitesimal em (x, y, z) e lados $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$. A contribuição das duas faces cinzas perpendiculares ao eixo y , mostradas na Fig. 10.2, é

$$\begin{aligned}
 \Phi_F^y &= \int \vec{F} \cdot d\vec{A} \\
 &= F_y(x, y + \Delta y, z) \Delta x \Delta z - F_y(x, y, z) \Delta x \Delta z
 \end{aligned}$$

Usando a aproximação em primeira ordem

$$F_y(x, y + \Delta y, z) = F_y(x, y, z) + \frac{\partial F_y}{\partial y} \Delta y$$

essa contribuição fica

$$\Phi_F^y = \frac{\partial F_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z$$

O fluxo total sobre o cubo fica então

$$\begin{aligned}
 \Phi_F^S &= \Phi_E^x + \Phi_E^y + \Phi_E^z \\
 &= \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \\
 &= (\vec{\nabla} \cdot \vec{F}) \Delta v
 \end{aligned} \tag{10.25}$$

onde $\Delta v = \Delta x \Delta y \Delta z$ é o volume do cubo. Assim, vemos que o divergente pode ser interpretado como o fluxo por unidade de volume.

Considere a circulação de um campo $\vec{F}(x, y, z)$ através de um circuito infinitesimal em (x, y, z) no plano (y, z) e com lados/projeções $(\Delta y, \Delta z)$. A contribuição dos dois comprimentos verticais mostrados na Fig. 10.3 é dada por

$$\begin{aligned} C_F^y &= \int \vec{F} \cdot d\vec{l} \\ &= F_z(x, y + \Delta y, z)\Delta z - F_z(x, y, z)\Delta z \end{aligned}$$

e, similarmente, a dos dois comprimentos horizontais

$$C_F^z = F_y(x, y, z)\Delta y - F_y(x, y, z + \Delta z)\Delta y$$

Usando as expansões em primeira ordem, temos

$$\begin{aligned} C_F^y &= \frac{\partial F_z}{\partial y} \Delta y \Delta z \\ C_F^z &= -\frac{\partial F_y}{\partial z} \Delta z \Delta y \end{aligned}$$

A circulação total é dada então por :

$$\begin{aligned} C_F^{y,z} &= C_F^y + C_F^z = \frac{\partial F_z}{\partial y} \Delta y \Delta z - \frac{\partial F_y}{\partial z} \Delta y \Delta z \\ &= \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \Delta y \Delta z \\ &= \left(\vec{\nabla} \times \vec{F} \right)_x \Delta a_x \end{aligned} \tag{10.26}$$

onde $\Delta a_x = \Delta y \Delta z$, e a componente x na verdade significa a componente perpendicular ao plano do circuito (y, z) . Generalizando para circuitos em direções quaisquer temos

$$C_F = \vec{\nabla} \times \vec{F} \cdot \Delta \vec{a} \tag{10.27}$$

Portanto, o rotacional é a circulação por unidade de area.

10.6 Teoremas do Cálculo Vetorial

10.6.1 Teorema Fundamental do Cálculo

O principal resultado do cálculo *unidimensional* é o *Teorema Fundamental do Cálculo*, que diz que a integral da derivada de uma função $f(x)$ é simplesmente a diferença da própria função calculada nos limites de integração

$$\int_a^b \frac{df}{dx} dx = f(b) - f(a) \quad (\text{Teorema Fundamental}) \tag{10.28}$$

i.e. a integral *desfaz* a derivada da função, deixando apenas o efeito dos pontos limites da função no intervalo considerado.

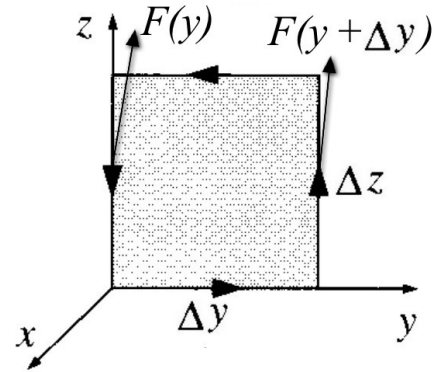


Figura 10.3: Circulação de $\vec{F}(x, y, z)$ em um circuito infinitesimal. (Adaptado de Griffiths)

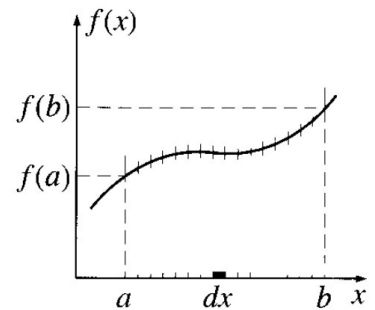


Figura 10.4: Teorema fundamental do cálculo unidimensional. (Griffiths)

Pensando na integral como o limite da soma de intervalos infinitesimais, obtemos:

$$\begin{aligned} \int_a^b \frac{df}{dx} dx &= \sum_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} \Delta x = \sum_{i=1}^N \frac{(f_{i+1} - f_i)}{\Delta x_i} \Delta x_i = \sum_{i=1}^N (f_{i+1} - f_i) \\ &= (f_2 - f_1) + (f_3 - f_2) + (f_4 - f_3) + \dots + f_{N-1} - f_{N-2} + f_N - f_{N-1} \\ &= -f_1 + f_N = f(b) - f(a) \end{aligned} \quad (10.29)$$

10.6.2 Teorema Fundamental Multidimensional

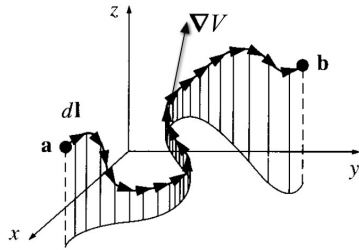


Figura 10.5: Teorema fundamental multidimensional. A integral de um gradiente em um caminho. (Griffiths)

O Teorema Fundamental pode ser facilmente estendido para a integral em um caminho de um gradiente:

$$\int_a^b \vec{\nabla} V \cdot d\vec{l} = V(b) - V(a) \quad (\text{Gradiente}) \quad (10.30)$$

Esse resultado pode ser mostrado de forma similar ao Teorema Fundamental unidimensional usando o fato de que

$$dV = \vec{\nabla} V \cdot d\vec{l} \quad (10.31)$$

Novamente, somente os valores nas bordas sobrevivem aos cancelamentos internos na integração.

10.6.3 Teorema de Gauss

Esses resultados podem ser generalizados para integrais de superfície e de volume pelos teoremas de Stokes e Gauss, respectivamente.

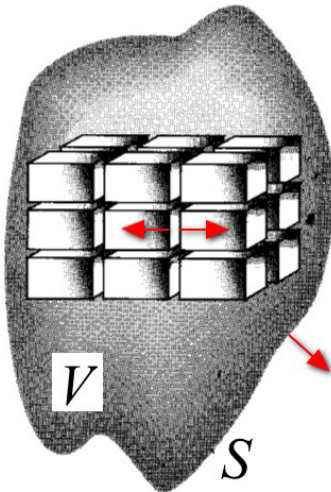


Figura 10.6: Teorema de Gauss. Um volume qualquer preenchido com cubos. Após cancelamentos internos, somente a contribuição do fluxo na superfície externa sobrevive. (Griffiths)

O Teorema de Gauss diz que a integral tripla do divergente de \vec{E} no volume V definido pela superfície S é a integral de superfície de \vec{E} na superfície S :

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \, dV = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (\text{Teorema de Gauss}) \quad (10.32)$$

Para mostrar o teorema de Gauss, nós imaginamos o volume arbitrário subdividido em cubos infinitesimais, como na Fig 10.6. A integral no volume é obtida somando as contribuições dos vários cubos, cada uma das quais é dada pela Eq. 10.25:

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \, dV = \sum_{\Delta v \rightarrow 0} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \, \Delta v_{\text{cubo}} = \sum \Phi_E^{\text{cubos}} \quad (10.33)$$

Na soma dos fluxos nos cubos, as contribuições de superfícies internas se cancelam, pois vem sempre em pares de sinais opostos. Sobra apenas a contribuição das faces externas:

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \, dV = \sum \Phi_E^{\text{cubos}} = \sum \int \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

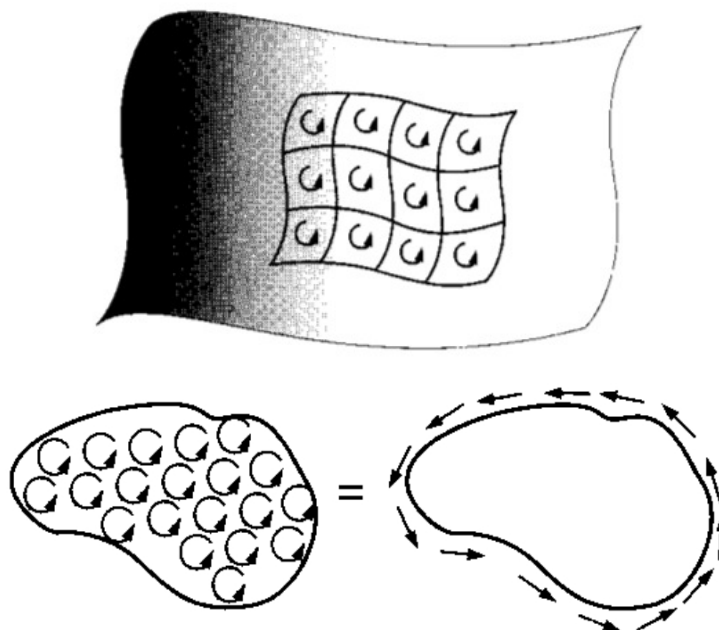


Figura 10.7: Teorema de Stokes. A superfície arbitrária é preenchida por circuitos quadrados infinitesimais. Após cancelamentos internos somente a circulação na curva externa sobrevive. (Griffiths).

10.6.4 Teorema de Stokes

O Teorema de Stokes diz que a integral dupla do rotacional de um campo vetorial \vec{E} na superfície aberta S definida pela curva fechada C é a integral de linha de \vec{E} na curva C :

$$\int_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{Teorema de Stokes}) \quad (10.34)$$

Para mostrar o teorema de Stokes, nós imaginamos a superfície arbitrária subdividida em circuitos infinitesimais, como na Fig 10.7. A integral na superfície é obtida somando as contribuições dos vários circuitos quadrados, cada uma dada pela Eq. 10.27:

$$\int_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot d\vec{S} = \sum_{\Delta S \rightarrow 0} \vec{\nabla} \times \vec{E} \Delta S_{\text{quadrado}} = \sum C_E^{\text{quadrados}} \quad (10.35)$$

Na soma das circulações dos quadrados, as contribuições de lados internos se cancelam, pois vem sempre em pares de sinais opostos. Sobra apenas a contribuição da curva externa delimitando a superfície:

$$\int_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot d\vec{S} = \sum C_E^{\text{quadrados}} = \sum \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Note que todos esses casos correspondem esquematicamente a

$$\int_A \tilde{\partial} \tilde{f} = [\tilde{f}]_{\partial A} \quad (10.36)$$

onde $\tilde{\partial}$ denota derivadas generalizadas (em 1, 2 ou 3 dimensões), \tilde{f} denota um campo generalizado (escalar ou vetorial), A denota uma região generalizada (intervalo, superfície ou volume) e ∂A denota a fronteira de A (ponto, curva ou superfície).

10.7 Equações de Maxwell: Forma Diferencial

Usando o teorema de Gauss e o teorema de Stokes nas Equações de Maxwell na forma integral, e, notando que essas equações são válidas para volumes, superfícies e curvas *gerais*, obtém-se as equações de Maxwell na forma diferencial.

Por exemplo, partindo da Lei de Gauss, podemos usar o teorema de Gauss no lado esquerdo e expressar a carga como integral da densidade de carga no lado direito, obtendo:

$$\begin{aligned} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} \\ \rightarrow \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} dV &= \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV, \forall V \rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (10.37)$$

Outro exemplo seria partir da Lei de Ampere, usar o teorema de Stokes e expressar a corrente como integral da densidade de corrente, obtendo:

$$\begin{aligned} \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 i_{\text{in}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \\ \rightarrow \int_S \vec{\nabla} \times \vec{B} \cdot d\vec{S} &= \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{S}, \forall S \rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (10.38)$$

Procedendo de forma similar para as outras equações, obtemos:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Lei de Gauss}) \quad (10.39)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss do Magnetismo}) \quad (10.40)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (10.41)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Ampere}) \quad (10.42)$$

onde ρ é a densidade de carga elétrica ($q = \int \rho dV$) e \vec{j} é a densidade de corrente elétrica ($i = \int \vec{j} \cdot d\vec{S}$).

10.7.1 Decomposição de Campos Vetoriais

Vamos provar dois fatos interessantes de um campo vetorial \vec{V} que decai a zero no infinito de forma suficientemente rápida (e.g. $|\vec{V}(\vec{x})| \propto 1/r^n$, com $n > 1$)¹:

- 1) \vec{V} pode ser decomposto na soma de um gradiente $\vec{\nabla}\phi$ e de um rotacional $\vec{\nabla} \times \vec{A}$.
- 2) $\vec{\nabla} \cdot \vec{V}$ e $\vec{\nabla} \times \vec{V}$ são suficientes para determinar o campo \vec{V} expandido da maneira acima.

O primeiro fato segue da identidade (veja Eq. 10.23)

$$\nabla^2 \vec{Z} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{Z}) - \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{Z}). \quad (10.43)$$

Identificando

$$\vec{V} = \nabla^2 \vec{Z} \quad (10.44)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{Z} = \phi \quad (10.45)$$

$$-\vec{\nabla} \times \vec{Z} = \vec{A} \quad (10.46)$$

¹Este é o caso para \vec{E} e \vec{B} devido a elementos infinitesimais de carga e corrente: ambos decaem com $1/r^2$.

temos

$$\vec{V} = \vec{\nabla}\phi + \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (10.47)$$

e é sempre possível fazer tal decomposição, pois dado o vetor \vec{V} , mostra-se que podemos sempre achar \vec{Z} resolvendo a Eq. (10.44). Esta equação é denotada Equação de Poisson (ver Apêndice I), e aparece com frequência no Eletromagnetismo e na Gravitação. Sua solução pode ser obtida pelo método da Função de Green (ver Apêndice L), e o resultado é

$$\vec{Z} = \int d^3x' \frac{1}{4\pi} \frac{\vec{V}(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|}. \quad (10.48)$$

Uma vez determinado \vec{Z} , pode-se então determinar ϕ e \vec{A} pelas Eqs. (10.45) e (10.46). Essa decomposição permite afirmar que:

- i) Se $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$, então $\vec{V} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ (rotacional puro).
- ii) Se $\vec{\nabla} \times \vec{V} = 0$, então $\vec{V} = \vec{\nabla}\phi$ (gradiente puro).

Usando a decomposição da Eq. (10.47), temos que

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \nabla^2\phi + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \nabla^2\phi \quad (10.49)$$

e portanto

$$\phi = \int d^3x' \frac{1}{4\pi} \frac{\vec{\nabla}' \cdot \vec{V}(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} \quad (10.50)$$

Outra forma de obter esse resultado é via (Use $\vec{\nabla} \cdot (\alpha\vec{V}) = \vec{V} \cdot \vec{\nabla}\alpha + \alpha\vec{\nabla} \cdot \vec{V}$)

$$\begin{aligned} \phi &= \vec{\nabla} \cdot \vec{Z} = \int d^3x' \frac{1}{4\pi} \vec{V}(\vec{x}') \cdot \vec{\nabla} \frac{1}{|\vec{x} - \vec{x}'|} = - \int d^3x' \frac{1}{4\pi} \vec{V}(\vec{x}') \cdot \vec{\nabla}' \frac{1}{|\vec{x} - \vec{x}'|} \\ &= - \underbrace{\int d^3x' \frac{1}{4\pi} \vec{\nabla}' \cdot \left(\frac{\vec{V}(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} \right)}_{=0 \text{ se } r^2[\vec{V}(r)/r] \rightarrow 0 \text{ quando } r \rightarrow \infty} + \int d^3x' \frac{1}{4\pi} \frac{\vec{\nabla}' \cdot \vec{V}(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} \end{aligned} \quad (10.51)$$

Além disso

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{V} &= \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla}\phi) + \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \\ &= \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2\vec{A} \end{aligned} \quad (10.52)$$

$$= \vec{\nabla}[\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{Z})] - \nabla^2\vec{A} \quad (10.53)$$

$$= -\nabla^2\vec{A} \quad (10.54)$$

e portanto

$$\vec{A} = - \int d^3x' \frac{1}{4\pi} \frac{\vec{\nabla}' \times \vec{V}(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} \quad (10.55)$$

Desta forma, basta saber $\vec{\nabla} \cdot \vec{V}$ e $\vec{\nabla} \times \vec{V}$ para determinar ϕ e \vec{A} e, assim, o próprio campo \vec{V} pela decomposição acima. É por isso que é suficiente as Equações de Maxwell lidarem com divergentes e rotacionais dos campos elétrico e magnético: eles determinam os campos unicamente, desde que estes decaiam a zero de forma suficientemente rápida no infinito.

10.8 Conservação da Carga

A carga elétrica é conservada, ou seja cargas não são criadas nem destruídas. Além disso, se e.g. a carga em um ponto está diminuindo, é porque parte da carga está se deslocando a outro ponto na forma corrente elétrica. Matematicamente, a conservação da carga é expressa como :

$$\frac{dq}{dt} = -i \quad (10.56)$$

i.e. a variação da carga em um ponto balanceia exatamente a corrente que sae deste ponto. Se a corrente for positiva, a carga no ponto está diminuindo, e por isso o sinal negativo. Considerando esta igualdade dentro de um volume V com borda superficial S , temos

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \, dV &= - \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \\ \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV &= - \int_V \nabla \cdot \vec{j} \, dV \end{aligned} \quad (10.57)$$

como essa igualdade vale para qualquer volume V arbitrário, temos

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (\text{Eq. da continuidade}) \quad (10.58)$$

Esta equação é chamada de Eq. da continuidade e diz simplesmente que, se a densidade de carga varia no tempo em certo ponto do espaço, é porque a densidade de corrente diverge naquele ponto, ou seja cargas não são criadas nem destruídas, apenas se movem de um lugar a outro.

Por outro lado, tomando o divergente da Lei de Ampere-Maxwell, temos:

$$\begin{aligned} 0 = \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \vec{\nabla} \cdot \left(\mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \\ &= \mu_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial (\vec{\nabla} \cdot \vec{E})}{\partial t} \\ &= \mu_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial (\rho / \epsilon_0)}{\partial t} \\ &= \mu_0 \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right). \end{aligned}$$

ou seja, obtemos novamente a Eq. da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (10.59)$$

Portanto, as Equações de Maxwell automaticamente garantem que cargas são conservadas, não sendo necessário postular isso adicionalmente.

10.9 Potenciais Eletromagnéticos

É conveniente definir potenciais relacionados aos campos elétrico e magnético. Esses potenciais são definidos das Eqs. de Maxwell sem fontes (cargas e correntes). Primeiramente, como

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (10.60)$$

segue que \vec{B} deve ser o rotacional de algum campo vetorial \vec{A} , conhecido como o potencial vetor magnético

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (10.61)$$

Usando essa expressão na outra equação para \vec{E} , temos

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{\nabla} \times \vec{A}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (10.62)$$

Portanto

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (10.63)$$

e segue que o termo entre parênteses deve ser o gradiente de algum campo escalar ϕ , conhecido como o potencial escalar elétrico.

O potencial elétrico ϕ e o potencial vetor magnético \vec{A} são portanto definidos por

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (10.64)$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (10.65)$$

Note que, no caso eletrostático $\partial \vec{A} / \partial t = 0$ e $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$, como no Cap. 3. Com essas definições, as duas Eqs. de Maxwell sem fonte obviamente são automaticamente satisfeitas:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = 0 \quad (10.66)$$

e

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{\nabla} \times \left(-\vec{\nabla}\phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (10.67)$$

$$= -\vec{\nabla} \times \vec{\nabla}\phi - \frac{\partial (\vec{\nabla} \times \vec{A})}{\partial t} \quad (10.68)$$

$$= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (10.69)$$

As equações com fonte podem então ser usadas para descrever a dinâmica dos potenciais, ou dos campos.

10.9.1 Transformação de Calibre

Os campos não são determinados unicamente pelos potenciais eletromagnéticos definidos acima. Se ϕ e \vec{A} são soluções das Eqs. de Maxwell, os potenciais ϕ' e \vec{A}' definidos por

$$\phi' = \phi - \frac{\partial f}{\partial t} \quad (10.70)$$

$$\vec{A}' = \vec{A} + \vec{\nabla}f \quad (10.71)$$

para uma função $f(\vec{x}, t)$ qualquer, também são solução, pois

$$\vec{E}' = -\vec{\nabla}\phi' - \frac{\partial\vec{A}'}{\partial t} \quad (10.72)$$

$$= -\vec{\nabla}\phi + \vec{\nabla}\frac{\partial f}{\partial t} - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \frac{\partial(\vec{\nabla}f)}{\partial t} \quad (10.73)$$

$$= -\vec{\nabla}\phi - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} = \vec{E} \quad (10.74)$$

e similarmente

$$\begin{aligned} \vec{B}' &= \vec{\nabla} \times \vec{A}' \\ &= \vec{\nabla} \times \vec{A} + \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla}f) = \vec{B} \end{aligned} \quad (10.75)$$

Portanto, temos a liberdade de escolher a função f convenientemente sem alterar os campos. A escolha de f implica a determinação de um calibre. Um calibre interessante na magnetostática é o Calibre de Coulomb

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{Calibre de Coulomb}) \quad (10.76)$$

Caso o campo A não satisfaça este calibre, basta definir A' que satisfaça, o que requer

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A}' = \vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \nabla^2 f = 0 \quad (10.77)$$

ou seja, basta resolver a equação $\nabla^2 f = -\vec{\nabla} \cdot \vec{A}$ para f , que sempre tem solução.

Outro calibre interessante, usado nas soluções de ondas eletromagnéticas, é o Calibre de Lorenz

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial\phi}{\partial t} = 0 \quad (\text{Calibre de Lorenz}) \quad (10.78)$$

Das Eqs. 10.70 e 10.71, temos

$$\mu_0\epsilon_0 \frac{\partial\phi'}{\partial t} = \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial\phi}{\partial t} - \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (10.79)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A}' = \vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \nabla^2 f \quad (10.80)$$

e para ϕ' e A' satisfazerem o calibre de Lorenz, devemos requerer

$$\nabla^2 f - \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = -(\vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial\phi}{\partial t}) \quad (10.81)$$

que também sempre tem solução para f .

Note que, mesmo após especificar o calibre, os potenciais ainda não são únicos. Por exemplo, se os potenciais já satisfazem o calibre especificado, por exemplo, o calibre de Lorenz, o lado direito da equação acima é zero, e outra função g satisfazendo a equação de onda homogênea

$$\nabla^2 g - \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 g}{\partial t^2} = 0 \quad (10.82)$$

ainda pode ser adicionada aos potenciais com uma transformação de calibre extra, novamente sem alterar os campos.