

Unidade 1 – Carga Elétrica e Lei de Coulomb

Yoxara Sánchez-Villamizar

Bibliografia:

- Halliday, Resnick & Walker – *Fundamentos de Física*, v.3
- Young, Freedman & Sears-Zemansky – *Física III*



FIS0312 – Eletricidade e Magnetismo • 17 Agosto, 2026

Encerrada a revisão de ferramentas matemáticas e de unidades (Aula 0), iniciamos agora o estudo sistemático do eletromagnetismo pelo seu conceito mais elementar: a **carga elétrica**. Esta aula tem três objetivos:

- ❑ caracterizar a carga elétrica – sua existência, seus dois sinais, sua quantização e sua conservação;
- ❑ distinguir **condutores** de **isolantes**, e entender os processos de eletrização (atrito, contato, indução);
- ❑ introduzir a **lei de Coulomb**, que descreve quantitativamente a força entre duas cargas puntiformes, e o **princípio da superposição**, que permite tratar sistemas com muitas cargas.

A lei de Coulomb será, ao longo de todo o curso, o ponto de partida a partir do qual construiremos o conceito de campo elétrico (próxima aula).

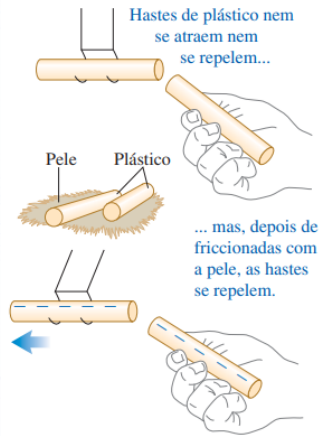
1. Carga eléctrica

Desde a Antiguidade sabe-se que certos materiais, quando atritados, adquirem a capacidade de atrair pequenos objetos – o âmbar atritado com lã atrai palha e penas. Hoje entendemos esse fenômeno em termos de uma propriedade fundamental da matéria: a **carga elétrica**. Experimentalmente, observa-se que:

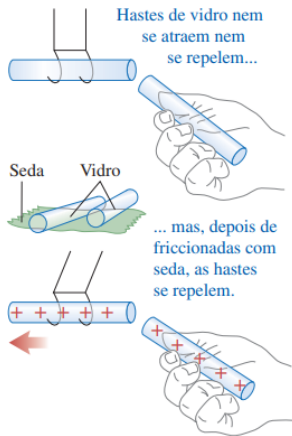
- ❑ existem **dois tipos** de carga elétrica, convencionalmente chamados **positiva** e **negativa**;
- ❑ cargas de **mesmo sinal se repelem**; cargas de **sinais opostos se atraem**;
- ❑ a matéria ordinária é eletricamente *neutra* porque contém quantidades iguais de carga positiva (nos prótons) e negativa (nos elétrons).

Experimentos de eletrostática.

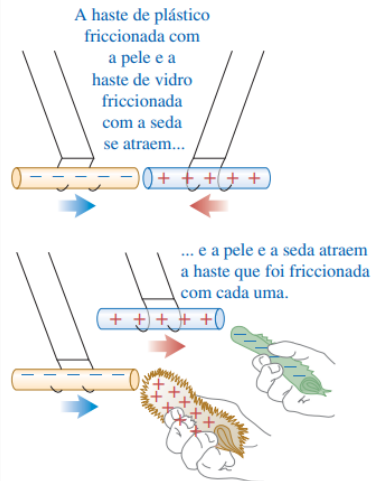
(a) Interação entre duas hastes de plástico, depois de friccionadas com pele



(b) Interação entre duas hastes de vidro, depois de friccionadas com a seda



(c) Interação entre objetos com cargas opostas

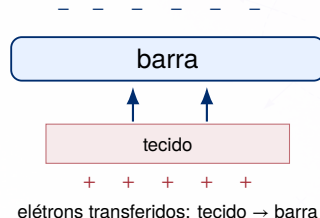


Experiência motivadora: eletrização por atrito

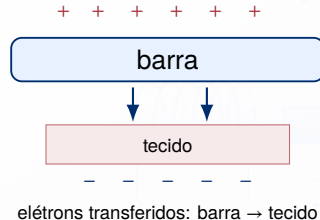
Ao friccionar materiais diferentes, pode ocorrer transferência de elétrons. O efeito macroscópico é observado pela atração ou repulsão entre corpos eletrizados.

A palavra “carga” não deve ser interpretada como uma substância material separada. Carga é uma propriedade física das partículas.

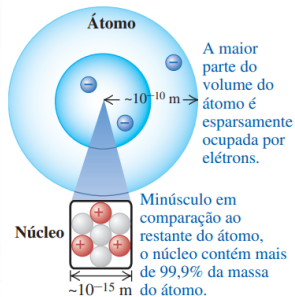
Barra carregada negativamente



Barra carregada positivamente



Dois tipos de carga



Próton: Carga positiva
Massa = $1,673 \times 10^{-27}$ kg

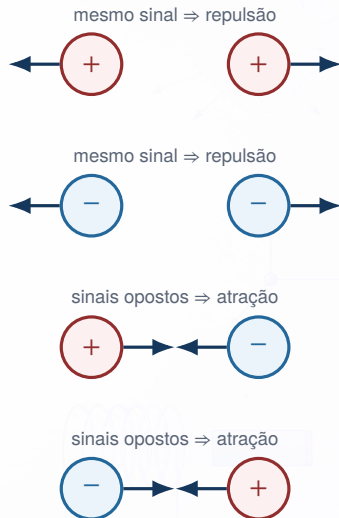
Nêutron: Sem carga
Massa = $1,675 \times 10^{-27}$ kg

Elétron: Carga negativa
Massa = $9,109 \times 10^{-31}$ kg

As cargas dos elétrons e dos prótons possuem o mesmo módulo.

A convenção de sinais (positivo/negativo) é devida a Benjamin Franklin. Microscopicamente, a carga elétrica está associada às partículas fundamentais que constituem os átomos:

- o **próton**, de carga $+e$, no núcleo;
 - o **elétron**, de carga $-e$, na eletrosfera;
 - o **nêutron**, eletricamente neutro.
- com $e \approx 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C a **carga elementar** (Aula 0).



Definição operacional de carga elétrica

Carga elétrica é a propriedade que determina a intensidade e o tipo da interação eletromagnética de uma partícula ou sistema.

Símbolo e unidade

$$q, Q \quad [q] = C.$$

Propriedade aditiva

$$Q_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N q_i.$$

Em problemas, distinguir sempre: **carga de uma partícula** q_i e **carga líquida de um sistema** Q_{total} .

Neutralidade elétrica não é ausência de carga

$$Q_{\text{total}} = N_p e - N_e e = (N_p - N_e) e.$$

- ❖ Corpo neutro: $N_p = N_e$.
- ❖ Corpo positivo: déficit de elétrons.
- ❖ Corpo negativo: excesso de elétrons.

Exemplo: um corpo com 10^{12} prótons a mais do que elétrons possui

$$Q = 10^{12} e = 1,602 \times 10^{-7} \text{ C}.$$

Mesmo uma carga macroscópica pequena envolve enorme número de cargas elementares.

Quantização da carga

A carga elétrica líquida q de qualquer objeto é sempre um múltiplo inteiro da carga elementar e :

$$q = n e, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, n \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

Não existe, na matéria ordinária, carga livre menor que e (quarks têm carga fracionária, $\pm e/3$ ou $\pm 2e/3$, mas nunca são observados isolados).

Observação

Em escala macroscópica, e é tão pequena ($\sim 10^{-19}$ C) que a carga parece variar continuamente – assim como a matéria parece contínua apesar de ser feita de átomos discretos. Poderemos, quase sempre, tratar distribuições de carga como contínuas (Aula 0, densidades λ , σ , ρ).

Exercício: balanço de carga

Um corpo inicialmente neutro recebe $3,0 \times 10^8$ elétrons. Determine sua carga final.

Solução

$$Q = -ne.$$

$$Q = -(3,0 \times 10^8)(1,602 \times 10^{-19}) \text{ C}.$$

$$Q \simeq -4,81 \times 10^{-11} \text{ C}$$

O sinal negativo indica excesso de elétrons.

Conservação da carga elétrica

A carga elétrica líquida de um sistema isolado é constante: carga não é criada nem destruída, apenas transferida de um corpo para outro (ou de uma região a outra do mesmo corpo).

$$Q_{\text{inicial}} = Q_{\text{final}}, \quad \Delta Q_{\text{sistema isolado}} = 0.$$

Durante eletrização, a carga não é criada arbitrariamente: ela é transferida entre partes do sistema.

Dois corpos neutros:

$$A^0 + B^0 \longrightarrow A^{+Q} + B^{-Q}.$$

A soma permanece nula.

A conservação é uma propriedade mais fundamental do que o modelo específico de eletrização.

Quando dois objetos neutros são atritados um contra o outro, elétrons são transferidos de um material para o outro; um fica com excesso de elétrons (carga negativa) e o outro com déficit (carga positiva) – mas a soma das cargas dos dois permanece nula. Esse é um princípio de conservação tão fundamental quanto a conservação de energia e de momento linear, já estudadas na mecânica.

Eletrização por atrito

Um bastão de vidro, inicialmente neutro, é atritado com seda e perde $3,0 \times 10^{12}$ elétrons. Qual a carga final do bastão?

Solução. O bastão perde carga negativa, logo fica com carga positiva de mesmo módulo:

$$q = ne = (3,0 \times 10^{12})(1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) = 4,8 \times 10^{-7} \text{ C} = 0,48 \mu\text{C} .$$

The background of the slide is decorated with several faint, light-blue physics diagrams. In the top left, there is a diagram of a positive point charge with radial electric field lines. In the top right, a diagram shows a negative point charge with radial electric field lines. On the left side, there is a diagram of a vertical rod with concentric circular magnetic field lines around it. In the bottom left, a sine wave representing an electromagnetic wave is shown. On the right side, there is a diagram of a solenoid (coiled wire) with a rectangular block inside it, and magnetic field lines passing through the solenoid.

Condutores e Isolantes

A resposta de um material à presença de carga elétrica depende da mobilidade das cargas em seu interior.

Condutores

Materiais nos quais cargas (tipicamente elétrons de valência) movem-se **livremente**. Exemplos: metais (cobre, prata, alumínio), soluções eletrolíticas, o corpo humano. Nos metais, os elétrons de condução formam um “mar” de elétrons livres.

Isolantes (dielétricos)

Materiais nos quais as cargas estão **fortemente ligadas** aos átomos ou moléculas e praticamente não se movem. Exemplos: vidro, borracha, plástico, madeira seca, ar.

Observação

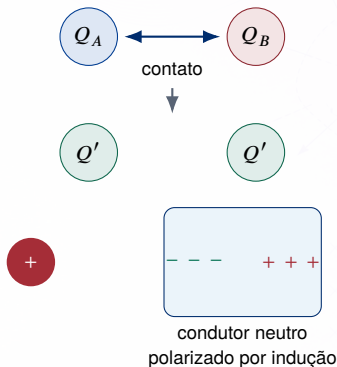
Uma classe intermediária, os **semicondutores** (silício, germânio), tem condutividade que pode ser controlada por dopagem – base de toda a eletrônica moderna, mas fora do escopo deste curso.

Eletrização por contato e por indução

Por contato: um condutor carregado toca um condutor neutro; parte da carga é transferida diretamente, e ambos ficam com carga de *mesmo sinal*. Para esferas condutoras idênticas:

$$Q'_A = Q'_B = \frac{Q_A + Q_B}{2}.$$

Por indução: um condutor neutro é *aproximado* (sem tocar) de um objeto carregado. As cargas livres do condutor se redistribuem: as de sinal oposto ao do objeto se acumulam no lado próximo, e as de mesmo sinal, no lado distante. Se o condutor for então aterrado e o aterramento removido *antes* de afastar o objeto indutor, o condutor fica com carga de sinal *oposto* ao do indutor.



Atenção

Na indução, o objeto indutor *não perde carga* – apenas redistribui a carga já existente no condutor neutro. Isso contrasta com a eletrização por atrito ou contato, em que há transferência efetiva de carga entre os dois corpos.

Duas esferas metálicas idênticas possuem inicialmente cargas $-50e$ e $+20e$. Elas são colocadas em contato e depois separadas. Qual é a carga final de cada esfera?

Raciocínio

$$Q_{\text{total}} = -50e + 20e = -30e.$$

Como as esferas são idênticas:

$$Q'_A = Q'_B = \frac{-30e}{2} = -15e.$$

$$Q'_A = Q'_B = -15e$$

A conservação da carga é aplicada ao sistema total, não a cada esfera isoladamente.

Intervalo conceitual: perguntas rápidas

- ❖ Um corpo neutro contém elétrons?
- ❖ Uma carga negativa aponta para $-x$?
- ❖ Cargas são criadas no atrito?
- ❖ Um isolante não pode polarizar?

Intervalo conceitual: perguntas rápidas

- ❖ Um corpo neutro contém elétrons?
- ❖ Uma carga negativa aponta para $-x$?
- ❖ Cargas são criadas no atrito?
- ❖ Um isolante não pode polarizar?

Respostas esperadas:

- ❖ sim, mas com compensação de carga;
- ❖ não, carga é escalar;
- ❖ não, há transferência;
- ❖ pode polarizar localmente.

2. Lei de Coulomb

Da observação qualitativa à força quantitativa entre cargas puntiformes

Em 1784, Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) mediu diretamente, por meio de uma balança de torção, a força entre duas cargas puntiformes em repouso e formulou a lei que hoje leva seu nome, mostrando que a força elétrica entre elas é proporcional a $\frac{1}{r^2}$.

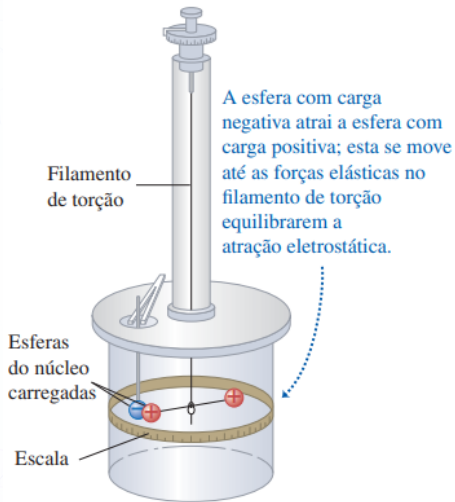
Lei de Coulomb

O módulo da força elétrica entre duas cargas puntiformes é diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

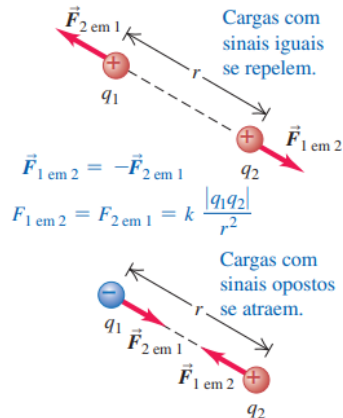
Observação

Assim como a lei da gravitação de Newton, a lei de Coulomb é uma **lei do inverso do quadrado**: dobrar a distância reduz a força a um quarto do valor original.

(a) Uma balança de torção do tipo usado por Coulomb para medir a força elétrica



(b) Interações entre cargas puntiformes



Lei de Coulomb (forma escalar)

O módulo da força elétrica entre duas cargas puntiformes q_1 e q_2 , ambas muito menores que a distância r que as separa, é

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}, \quad (2)$$

onde k_e é a **constante de Coulomb**. A força atua ao longo da reta que une as duas cargas: é **repulsiva** se q_1 e q_2 têm o mesmo sinal, e **atrativa** se têm sinais opostos.

A constante de Coulomb

A constante de Coulomb é usualmente escrita em termos da **permissividade do vácuo** ϵ_0 :

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad \epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2), \quad (3)$$

de modo que

$$k_e \approx 8,99 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2 \approx 9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2. \quad (4)$$

Lei de Coulomb: módulo da força elétrica entre duas cargas puntiformes

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

Constante elétrica

Valores das duas cargas

Distância entre as duas cargas

Observação

A escolha de escrever $k_e = 1/(4\pi\epsilon_0)$, em vez de simplesmente usar k_e , parece artificial agora, mas simplificará enormemente as equações de Maxwell.

Atenção

A lei de Coulomb, tal como enunciada, vale rigorosamente apenas para cargas **puntiformes** (ou esfericamente simétricas) em **repouso** no vácuo. Em um meio material, ϵ_0 é substituída pela permissividade do meio, $\epsilon = \kappa \epsilon_0$, com κ a constante dielétrica (veremos em capacitores).

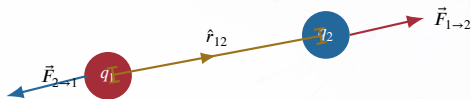
Para uso em problemas com várias cargas, é indispensável a forma *vetorial*. Seja $\vec{r}_{12}$ o vetor que vai da carga q_1 até a carga q_2 , e $\hat{r}_{12} = \vec{r}_{12}/|\vec{r}_{12}|$ o vetor unitário correspondente (revisão: Aula 0). A força que q_1 exerce sobre q_2 é

$$\vec{F}_{1\rightarrow 2} = k_e \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12}. \quad (5)$$

Pela terceira lei de Newton, $\vec{F}_{2\rightarrow 1} = -\vec{F}_{1\rightarrow 2}$.

Observação

Se q_1 e q_2 têm o mesmo sinal, $q_1 q_2 > 0$ e $\vec{F}_{1\rightarrow 2}$ aponta no sentido de $\hat{r}_{12}$ (repulsão, afastando-se de q_1); se têm sinais opostos, $q_1 q_2 < 0$ e a força aponta no sentido oposto (atração, em direção a q_1) – os sinais das cargas cuidam automaticamente da direção física correta.



Exemplo: força entre duas cargas puntiformes

Força elétrica entre duas cargas

Duas cargas puntiformes, $q_1 = +2,0 \mu\text{C}$ e $q_2 = -3,0 \mu\text{C}$, estão separadas por $r = 0,50 \text{ m}$ no vácuo. Calcule o módulo da força entre elas e classifique-a.

Solução. Pela Eq. (2):

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = (8,99 \times 10^9) \frac{(2,0 \times 10^{-6})(3,0 \times 10^{-6})}{(0,50)^2} \text{ N}.$$

$$F = (8,99 \times 10^9) \times \frac{6,0 \times 10^{-12}}{0,25} \text{ N} = \boxed{0,22 \text{ N}}.$$

Como q_1 e q_2 têm sinais opostos, a força é **atrativa**: cada carga é puxada em direção à outra.

Observação

Compare a ordem de grandeza: cargas de poucos microcoulombs, a meio metro de distância, já produzem uma força comparável ao peso de um objeto de $\sim 22 \text{ g}$ – a força elétrica é, em geral, muitíssimo mais intensa que a gravitacional entre corpos de dimensões cotidianas.

E o sentido da força elétrica que q_1 exerce sobre q_2 , e que q_2 exerce sobre q_1 ?

Exemplo: força elétrica no átomo de hidrogênio

Em um átomo de hidrogênio, o elétron está separado do próton por uma distância média de $r \approx 5,3 \times 10^{-11}$ m. Calcule o módulo da força eletrostática de atração exercida pelo próton no elétron.

Situação. $q_1 = +e$ (próton), $q_2 = -e$ (elétron).

Solução. Pela lei de Coulomb:

$$F = k_e \frac{|q_1 q_2|}{r^2} = k_e \frac{e^2}{r^2} = \frac{(8,99 \times 10^9)(1,60 \times 10^{-19})^2}{(5,3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = \boxed{8,2 \times 10^{-8} \text{ N}}.$$



Observação

Checagem por ordem de grandeza: no numerador, $10^9 \times 10^{-38} = 10^{-29}$; no denominador, 10^{-22} ; a razão dá 10^{-7} . O resultado, $8,2 \times 10^{-8}$, é menor que esse valor de referência – consistente.

Indo além: apesar de parecer pequena frente a forças macroscópicas, essa força produz no elétron ($m_e \approx 9,11 \times 10^{-31}$ kg) uma aceleração $F/m_e \sim 10^{22}$ m/s² – gigantesca em escala cotidiana.

Exemplo: força elétrica versus força gravitacional

Força elétrica versus força gravitacional

Uma partícula α (o núcleo do átomo de hélio) possui massa $m = 6,64 \times 10^{-27}$ kg e carga $q = +2e = 3,2 \times 10^{-19}$ C. Compare o módulo da força de repulsão elétrica entre duas partículas α com o módulo da força de atração gravitacional entre elas.

Passo 1 – expressar cada força separadamente

Para duas partículas α idênticas, separadas por uma distância r qualquer:

$$F_e = k_e \frac{q^2}{r^2} \qquad F_g = G \frac{m^2}{r^2}$$

Observação

Repare que *ambas* têm a mesma dependência $1/r^2$ – é exatamente por isso que, ao dividir uma pela outra, o r^2 desaparece e a resposta não depende da distância entre as partículas.

Exemplo: força elétrica *versus* força gravitacional

Passo 2 – dividir F_e por F_g

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k_e q^2 / r^2}{G m^2 / r^2} = \frac{k_e}{G} \frac{q^2}{m^2}$$

Observação

O r^2 cancela porque aparece igual em cima e embaixo. Sobra apenas o produto de duas razões: a das constantes (k_e/G) vezes a das propriedades das partículas (q^2/m^2).

Passo 3a – razão das constantes

$$\frac{k_e}{G} = \frac{9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2} \approx 1,35 \times 10^{20} \text{ C}^{-2}\text{kg}^2$$

Exemplo: força elétrica *versus* força gravitacional

Passo 3b – razão das propriedades da partícula

$$\frac{q^2}{m^2} = \frac{(3,2 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(6,64 \times 10^{-27} \text{ kg})^2} = \frac{1,02 \times 10^{-37}}{4,41 \times 10^{-53}} \approx 2,33 \times 10^{15} \text{ C}^2/\text{kg}^2$$

Passo 3c – multiplicar

$$\frac{F_e}{F_g} \approx (1,35 \times 10^{20}) \times (2,33 \times 10^{15}) = \boxed{3,1 \times 10^{35}}$$

Observação

Esse número, embora extraordinariamente elevado. Nesse caso F_g é completamente desprezível em comparação à força elétrica. Isso é sempre verdade para interações entre partículas atômicas e subatômicas.

Princípio da Superposição



Princípio da superposição

A força elétrica resultante sobre uma carga q_0 , devida a um conjunto de N cargas puntiformes $q_1, q_2, \dots, q_N$, é a **soma vetorial** das forças que cada carga exerceria sobre q_0 isoladamente:

$$\vec{F}_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_{i \rightarrow 0} = k_e q_0 \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_{i0}^2} \hat{r}_{i0}. \quad (6)$$

Observação

A superposição não é óbvia *a priori* – é um fato experimental, válido porque a lei de Coulomb é linear em cada carga. Ela é o que torna possível, mais adiante, definir o campo elétrico de uma distribuição arbitrária de carga como a soma (ou integral) das contribuições de cada elemento infinitesimal dq – exatamente a estratégia de integração de linha, superfície e volume revisada na Aula 0.

Atenção

A soma na Eq. (6) é **vetorial**: some as componentes x , y , z de cada força separadamente (Aula 0) – nunca some diretamente os módulos das forças, exceto quando todas apontam exatamente na mesma direção.

Exemplo: força elétrica em um sistema de cargas

Três cargas puntiformes estão sobre o eixo x : $q_1 = +25 \text{ nC}$ na origem; $q_2 = -10 \text{ nC}$ em $x = 2,0 \text{ m}$; $q_0 = +20 \text{ nC}$ em $x = 3,5 \text{ m}$. Determine a força elétrica total em q_0 .



Passo 1 – montar o esquema

A força total em q_0 é a soma vetorial da força $\vec{F}_{10}$ (devida a q_1) e $\vec{F}_{20}$ (devida a q_2):

$$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20}$$

Com $r_{10} = 3,5 \text{ m}$ e $r_{20} = 1,5 \text{ m}$ (distância de q_2 , em $x = 2,0$, até q_0 , em $x = 3,5$):

Observação

Como q_0 está à *direita* tanto de q_1 quanto de q_2 , os dois vetores unitários que apontam de cada carga-fonte até q_0 coincidem $\hat{r}_{10} = \hat{r}_{20} = \hat{i}$. Isso não significa que as duas forças apontem no mesmo sentido – o sinal de cada força ainda depende do sinal do produto das cargas, como no próximo passo.

Exemplo: força elétrica em um sistema de cargas

Passo 2 – força devida a q_1 , $\vec{F}_{10}$

q_1 e q_0 têm o **mesmo sinal** $\Rightarrow$ repulsão: $\vec{F}_{10}$ aponta no mesmo sentido de $\hat{r}_{10} = \hat{i}$, ou seja, em $+x$:

$$\vec{F}_{10} = +F_{10} \hat{i} = +k_e \frac{|q_1| |q_0|}{r_{10}^2} \hat{i}$$

$$\vec{F}_{10} = (8,99 \times 10^9) \frac{(25 \times 10^{-9})(20 \times 10^{-9})}{(3,5)^2} \hat{i} \text{ N}$$

$$\vec{F}_{10} = (0,37 \times 10^{-6} \text{ N}) \hat{i}$$

Exemplo: força elétrica em um sistema de cargas

Passo 3 – força devida a q_2 , $\vec{F}_{20}$

q_2 e q_0 têm **sinais opostos** $\Rightarrow$ atração: $\vec{F}_{20}$ aponta no sentido *oposto* a $\hat{r}_{20} = \hat{i}$, ou seja, em $-x$. Por isso aparece um sinal $-$ na frente:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{20} &= -F_{20} \hat{i} = -k_e \frac{|q_2|q_0}{r_{20}^2} \hat{i} \\ \vec{F}_{20} &= -(8,99 \times 10^9) \frac{(10 \times 10^{-9})(20 \times 10^{-9})}{(1,5)^2} \hat{i} \text{ N}\end{aligned}$$

$$\vec{F}_{20} = -(0,80 \times 10^{-6} \text{ N}) \hat{i}$$

Exemplo: força elétrica em um sistema de cargas

Passo 4 – soma vetorial, somar as duas forças

Como $\vec{F}_{10}$ e $\vec{F}_{20}$ estão sobre a mesma reta (ambas múltiplas de $\hat{i}$), a soma vetorial vira uma soma algébrica dos coeficientes de $\hat{i}$:

$$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} = [(0,37 \times 10^{-6}) + (-0,80 \times 10^{-6})] \hat{i} \text{ N}$$

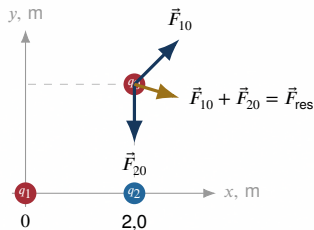
$$\vec{F}_{\text{res}} = -(0,43 \times 10^{-6} \text{ N}) \hat{i}$$

Observação

O sinal negativo do resultado final indica que a força resultante aponta em $-x$: como $\vec{F}_{20}$ (atrativa) é maior em módulo que $\vec{F}_{10}$ (repulsiva), q_0 acaba sendo puxada, no total, em direção a q_2 .

Exemplo: soma de forças em duas dimensões

A carga $q_1 = +25 \text{ nC}$ está na origem, $q_2 = -15 \text{ nC}$ está no eixo x em $x = 2,0 \text{ m}$, e $q_0 = +20 \text{ nC}$ está no ponto $(2,0 \text{ m}, 2,0 \text{ m})$. Determine a força elétrica resultante em q_0 .



Passo 1 – geometria e vetores unitários

$$r_{10} = 2,0\sqrt{2} \text{ m} \approx 2,83 \text{ m} \quad (\text{diagonal, a } 45^\circ), \quad r_{20} = 2,0 \text{ m} \quad (\text{vertical})$$

Observação

q_1 e q_0 têm o mesmo sinal $\Rightarrow \vec{F}_{10}$ repulsiva (para longe de q_1 , a 45° no primeiro quadrante). q_2 e q_0 têm sinais opostos $\Rightarrow \vec{F}_{20}$ atrativa: como q_2 está diretamente *abaixo* de q_0 , essa força aponta em $-\hat{j}$.

Exemplo: soma de forças em duas dimensões

Passo 2 – montar a soma vetorial em componentes

A força resultante em q_0 é a soma vetorial das duas forças individuais:

$$\vec{F} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20}$$

Como cada força tem, em geral, componentes x e y , essa soma vetorial equivale a somar as componentes separadamente:

$$\Sigma F_x = F_{10,x} + F_{20,x}$$

$$\Sigma F_y = F_{10,y} + F_{20,y}$$

Observação

Este é o roteiro: primeiro calculamos $\vec{F}_{10}$ e $\vec{F}_{20}$ separadamente (cada uma com seu módulo e sua direção), depois somamos componente a componente – nunca os módulos diretamente.

Exemplo: soma de forças em duas dimensões

Passo 3 – força devida a q_1 , $\vec{F}_{10}$

Módulo, usando $r_{10} = 2,0\sqrt{2}$ m (logo $r_{10}^2 = 8,0 \text{ m}^2$):

$$F_{10} = k_e \frac{q_1 q_0}{r_{10}^2} = (8,99 \times 10^9) \frac{(25 \times 10^{-9})(20 \times 10^{-9})}{8,0} = 5,62 \times 10^{-7} \text{ N}$$

Como o ângulo com os eixos é 45° e $\cos 45^\circ = \sin 45^\circ$, as componentes x e y são iguais:

$$F_{10,x} = F_{10,y} = F_{10} \cos 45^\circ = (5,62 \times 10^{-7})(0,7071) = 3,97 \times 10^{-7} \text{ N}$$

Exemplo: soma de forças em duas dimensões

Passo 4 – força devida a q_2 , $\vec{F}_{20}$

Módulo:

$$F_{20} = k_e \frac{|q_2|q_0}{r_{20}^2} = (8,99 \times 10^9) \frac{(15 \times 10^{-9})(20 \times 10^{-9})}{(2,0)^2} = 6,74 \times 10^{-7} \text{ N}$$

Como $\vec{F}_{20}$ aponta puramente em $-\hat{j}$ (não tem componente x):

$$\vec{F}_{20} = -(6,74 \times 10^{-7} \text{ N})\hat{j} \quad \Rightarrow \quad F_{20,x} = 0, \quad F_{20,y} = -6,74 \times 10^{-7} \text{ N}$$

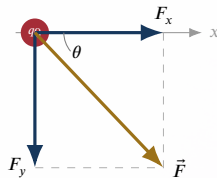
Exemplo: soma de forças em duas dimensões

Passo 5 – somar componente a componente

$$F_x = F_{10,x} + F_{20,x} = 3,97 \times 10^{-7} + 0 = 3,97 \times 10^{-7} \text{ N}$$
$$F_y = F_{10,y} + F_{20,y} = 3,97 \times 10^{-7} + (-6,74 \times 10^{-7}) = -2,77 \times 10^{-7} \text{ N}$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 4,8 \times 10^{-7} \text{ N}$$

$$\theta = \arctan \frac{F_y}{F_x} = \arctan(-0,698) \approx -35^\circ$$



Observação

θ negativo em relação ao eixo $+x$ confirma que a força resultante aponta para a direita e para baixo – como $\vec{F}_{20}$ (atrativa) "puxa" mais na direção $-y$ do que $\vec{F}_{10}$ empurra em $+y$.

Observação

Checagem qualitativa: esperávamos que F_{10} e F_{20} tivessem intensidades parecidas – q_1 é um pouco maior que $|q_2|$ (25 contra 15 nC), mas q_2 está um pouco mais perto de q_0 ($r_{20} = 2,0$ m contra $r_{10} \approx 2,83$ m). Os dois efeitos se compensam parcialmente: de fato, $F_{10} = 5,62 \times 10^{-7}$ N e $F_{20} = 6,74 \times 10^{-7}$ N ficaram na mesma ordem de grandeza, consistente com essa expectativa.

Síntese da Unidade 1

- ❑ **Carga elétrica:** existe em dois sinais; é *quantizada*, $q = ne$ com $e \approx 1,602 \times 10^{-19}$ C; é *conservada* em qualquer processo físico.
- ❑ **Condutores:** cargas livres, movem-se facilmente. **Isolantes:** cargas ligadas, praticamente imóveis.
- ❑ **Eletrização:** por atrito ou contato (transferência de carga); por indução (redistribuição, sem transferência, a menos que haja aterramento).
- ❑ **Lei de Coulomb:** $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = k_e q_1 q_2 / r_{12}^2 \hat{r}_{12}$, com $k_e = 1/(4\pi\epsilon_0) \approx 8,99 \times 10^9$ N m²/C²; lei do inverso do quadrado, válida para cargas puntiformes.
- ❑ **Superposição:** a força resultante sobre uma carga é a soma *vetorial* das forças de Coulomb individuais – base de toda a extensão a distribuições contínuas de carga (próximas aulas).
- ❑ A força elétrica é tipicamente $\sim 10^{36}$ – 10^{40} vezes mais intensa que a força gravitacional entre as mesmas partículas.

Na próxima aula, usaremos a lei de Coulomb e a superposição para definir o **campo elétrico** – o conceito central que substituirá a noção de ação a distância por uma descrição local, ponto a ponto, da influência elétrica no espaço.