AULA

38

Hoje estou elétrico!

PARA COMEÇAR

Ernesto, observado por Roberto, tinha acabado de construir um vetor com um pedaço de papel, um fio de meia, um canudo e um pedacinho de folha de alumínio. Enquanto testava o vetor para ver se estava ou não bem equilibrado, notava que, devido ao pouco peso do dispositivo, a flecha girava movida pelo vento, sem apontar uma direção fixa (Figura 1).

Em seguida, Ernesto carregou a flecha por indução, utilizando um canudo de refresco que tinha sido carregado por atrito com um pedaço de papel. Mesmo assim, o vetor ainda girava sem parar.

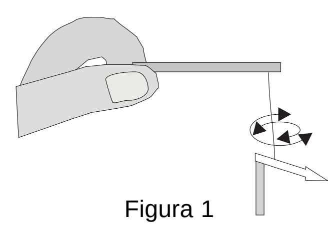
Figura 1

Ernesto então aproximou o canudo carregado da flecha, e esta apontou para o canudo. O vento que existia na sala não afetava mais a flecha. Ela balançava um pouco, mas continuava apontando para o canudo.

– Olha! Parece que a flecha percebeu que o canudo estava lá e passou a apontar na direção dele! (Figura 2)

Nesse instante chega Maristela, com um livro na mão. Ernesto repete mais uma vez o que tinha dito:

– Veja! A flecha **sabe** quando o canudo está pelas redondezas.

– É o **campo elétrico** – diz Maristela

– Campo elétrico?

– Sim! Quando você carrega o canudo, está criando, ao redor dele, um **campo elétrico**. Se você simplesmente olhar o canudo, não vai ver nada. Nada parece ter se modificado. Porém, se você usar um outro objeto carregado, a flecha, por exemplo, vai ver que ela é atraída pelo canudo. Veja o que diz este livro de Física sobre campo elétrico.

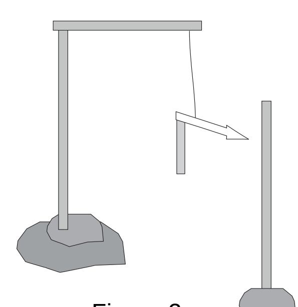
Figura 2

Sabemos que em certa região do espaço existe
um **campo elétrico** $\vec{E}$ se, quando colocarmos
uma carga de prova q nessa região,
notarmos que existe uma força elétrica $\vec{F}$ que age sobre q.
Em geral utiliza-se como carga de prova uma carga positiva.

– Foi o que você fez, Ernesto. Colocou a flecha, que era a carga de prova, e notou que ela era atraída pelo canudo. Então soube que naquela região, em volta do canudo, existia um campo elétrico.

– Então força elétrica e campo elétrico são a mesma coisa? A flecha não aponta na mesma direção da força?

– Quase. A direção e o sentido da força elétrica são os mesmos que o do campo elétrico, mas o valor do campo elétrico é diferente. Assim como a força, o campo elétrico é um vetor. Então podemos saber sua direção, seu sentido e seu valor.

Vetor campo elétrico

Fique ligado

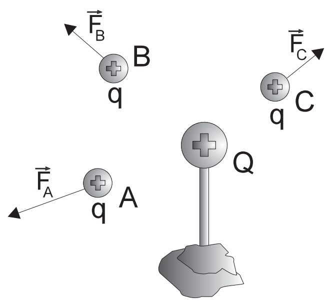

Figura 3

Vamos supor que tenhamos uma carga elétrica positiva Q e que ela esteja fixa, como mostra a Figura 3. Se colocarmos uma carga q em vários pontos diferentes, ao redor de Q vão aparecer forças elétricas $\vec{F}_A$, $\vec{F}_B$, $\vec{F}_C$ assim por diante. Veja a Figura 4. Nela colocamos, ao mesmo tempo, os vetores campo elétrico $\vec{E}$ e força elétrica $\vec{F}$. Ambos têm a mesma direção e o mesmo sentido. Porém, desenhados em mesma escala, esses vetores têm módulos diferentes. Seus valores são diferentes. O vetor campo elétrico tem as seguintes características:

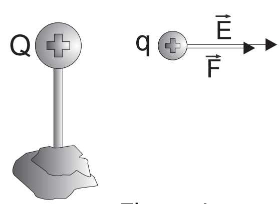

Figura 4

a) sua direção e sentido são os mesmos da força elétrica;

b) o valor de $\vec{E}$ é dado por $E = \dfrac{F}{q}$

onde F e q são, respectivamente, os valores da força elétrica e da carga de prova.

Já sabemos que forças são medidas em newtons (N) e cargas elétricas em coulombs (C). Logo, mediremos o campo elétrico em N/C.

Passo a passo

Um pêndulo elétrico carregado positivamente está diante de uma placa condutora também carregada positivamente. A carga do pêndulo é $5 \cdot 10^{-9}$C e, naquele ponto, o pêndulo está sendo repelido pela placa com uma força de $2 \cdot 10^{-5}$N. Qual o valor do campo da placa naquele ponto? Se retirássemos o pêndulo e colocássemos, no mesmo lugar, uma carga de $3 \cdot 10^{-9}$C, qual seria a força que agiria sobre essa carga?

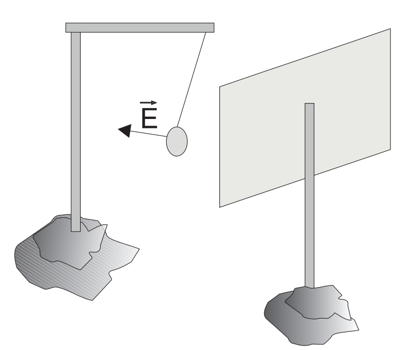

Figura 5

A placa carregada vai gerar um campo elétrico ao redor da mesma e o pêndulo vai servir de carga de prova. Dessa maneira, o campo, na posição onde está o pêndulo, será:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{2 \cdot 10^{-5}\,N}{5 \cdot 10^{-9}\,C} = 4 \cdot 10^{3}\,N / C$$

Com o valor do campo elétrico no ponto considerado, podemos achar o valor da força elétrica que age sobre qualquer carga colocada naquele ponto. Assim teremos:

$$F = E \cdot q$$

$$F = 4 \cdot 10^{3} N/C \cdot 3 \cdot 10^{-9} N/C = 1{,}2 \cdot 10^{-5} N$$

Campo gerado por um objeto carregado

Vamos considerar um objeto, de pequenas dimensões, carregado eletricamente. A relação E = F/q vale para qualquer objeto carregado: um canudo de refresco, uma placa etc. Essa relação independe, também, das dimensões do objeto carregado. Dessa maneira, podemos usá-la para calcular o campo gerado por um objeto de dimensões reduzidas. Vamos denominar esse objeto de **carga Q** (ver Figura 6).

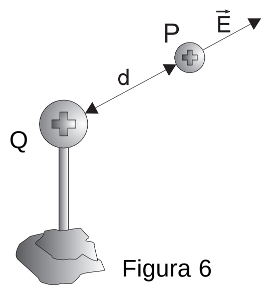

Figura 6

Se colocarmos uma carga de prova q num ponto P e a uma distância d da carga Q, a força elétrica entre essas duas cargas vai ser, como já vimos, dada pela lei de Coulomb. Seu valor vai ser:

$$\boxed{F = k \cdot \frac{Q \cdot q}{d^2}}$$

Então, o campo elétrico gerado pela carga Q, no ponto P, vai ser dado por:

$$E = \frac{F}{q} = k \cdot \frac{Q \cdot q}{q \cdot d} = k \cdot \frac{Q}{d^2}$$

Pode-se notar que o valor de q é cancelado durante os cálculos. Então, podemos afirmar que:

**O campo gerado por uma carga Q
não depende do valor da carga de prova.
O campo gerado pela carga Q
depende do valor de Q e
da distância da carga ao ponto considerado.**

Campo gerado por vários objetos

– Já sei como calcular o campo de um objeto. Mas, e se eu tiver mais de um objeto? Como posso saber qual o valor do campo? – perguntou Ernesto a Maristela.

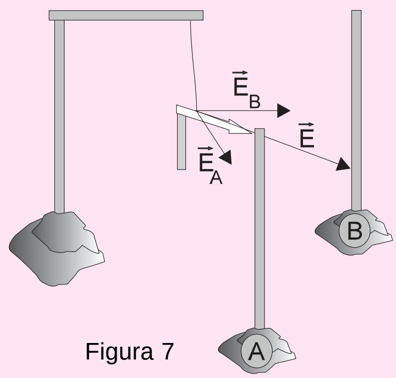

Figura 7

–Bem, se você usar o vetor, tudo vai ficar fácil de entender! Carregue o vetor por indução, usando um canudo de refresco carregado por atrito. Espete esse canudo num pedaço de massa de modelar (Figura 7). Aproxime o canudo do vetor. Ele vai apontar o canudo, dando a direção do campo de **um** canudo. Agora, carregue outro canudo também por atrito e coloque-o ao lado do primeiro. O vetor não vai apontar nem para um, nem para o outro. Ele vai dar a direção do campo resultante, gerado pelos dois canudos, naquele ponto.

O canudo A produz o campo $\vec{E}_A$. O canudo B produz o campo $\vec{E}_B$. Os dois, juntos, produzem o campo resultante $\vec{E}$. Para obter o valor do campo resultante, procedemos da mesma maneira empregada para obter a resultante de duas forças.

Passo a passo

Duas cargas de $2 \cdot 10^{-9}$C e positivas estão separadas por uma distância de 10cm. Qual o valor do campo elétrico num ponto que dista 10 cm de cada uma delas?

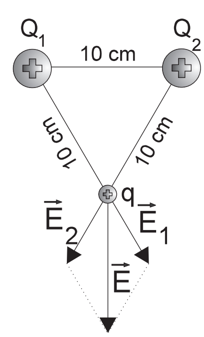

Figura 8

Em primeiro lugar, vamos calcular o valor de $\vec{E}_1$, campo gerado por uma das cargas (Q_1, por exemplo) num ponto que esteja a 10 cm (0,1 m) da mesma. Poderíamos imaginar que nesse ponto existe uma carga de prova q (ver Figura 8). Sabemos que o valor do campo não depende do valor da carga de prova Q. Ele depende apenas do valor de Q_1. Então, vamos ter:

$$E = k \cdot \frac{Q_1}{R} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9}}{(0,1)^2}$$

$$Q_1 = 1,8 \cdot 10^3 \text{N/C}$$

O campo gerado pela outra carga, no mesmo ponto, vai ter o mesmo valor, pois tanto o valor da carga como o da distância, são os mesmos. Por outro lado, esses dois campos formam entre si um ângulo de 60º. Dessa maneira, o campo resultante vai ser dado por:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos 60^\circ$$

$$E^2 = (1,8 \cdot 10^3)^2 + (1,8 \cdot 10^3)^2 + 2 \cdot (1,8 \cdot 10^3) \cdot (1,8 \cdot 10^3) \cdot 0,5$$

$$E^2 = 3 \cdot (1,8 \cdot 10^3)^2$$

$$E \cong 3,12 \cdot 10^3 \text{N/C}$$

Linhas de força

Existe uma maneira de representar o campo elétrico que nos dá a possibilidade de visualizar esse campo. Essa representação é feita com a utilização das **linhas de força** desse campo elétrico.

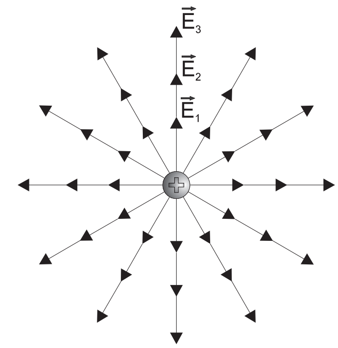

Figura 9

Vamos supor que tenhamos uma carga elétrica positiva Q. Em cada ponto das vizinhanças de Q representamos os vetores campo elétrico: $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ etc, como na Figura 9.

Esses vetores são tais que, se pudéssemos prolongar o segmento que representa cada um deles, todos passariam pela carga Q, como se fossem os raios de uma roda de bicicleta. O campo seria representado por uma figura semelhante à que aparece na Figura 10. Trata-se de um campo que chamamos de **radial**.

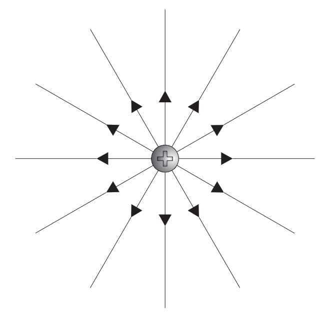
Figura 10

As linhas, providas de flechas e saindo da carga Q, nos informam a direção do campo em cada um dos pontos pelos quais elas passam. Essas linhas são chamadas **linhas de força ou linhas de campo**. Se, por outro lado, a carga Q fosse negativa, o campo ainda seria radial, porém as linhas de campo estariam dirigidas para a carga Q e não saindo dela. Ver Figura 11.

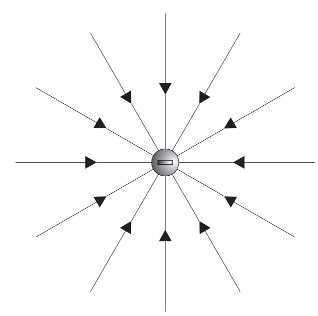
Figura 11

Nem sempre as linhas de campo são simples como as que descrevemos. Vamos supor que tenhamos duas cargas iguais, mas de sinais contrários. Vamos chamar essas cargas de Q_1 e Q_2. A esse conjunto de duas cargas iguais e de sinal contrário damos o nome de **dipolo**.

Como seriam as linhas de campo de um dipolo? Para isso, consideremos uma carga de prova q (positiva) e as duas cargas Q_1 e Q_2. A carga de prova vai ser atraída pela carga negativa e repelida pela carga positiva. Usando o conceito de campo, podemos dizer que tanto a carga positiva como a negativa vão produzir, no ponto P, um campo. Adicionando-se esses dois campos, teremos um campo resultante que é semelhante ao que está representado na Figura 12a. Se usarmos o mesmo procedimento, podemos obter o campo resultante para muitos pontos ao redor das duas cargas e construir as linhas de campo para o dipolo. A figura obtida seria parecida com a Figura 12b.

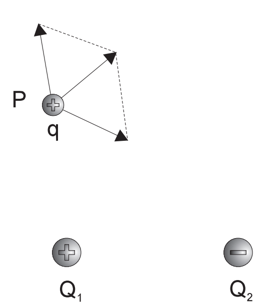

Figura 12a

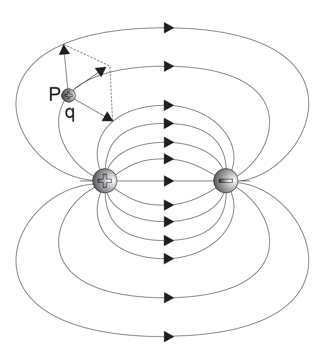

Figura 12b

Um outro conjunto de corpos carregados que é de grande interesse é aquele formado por duas placas planas carregadas com a mesma quantidade de cargas, porém com sinais opostos. Esse conjunto recebe o nome de **capacitor de placas paralelas**. Se colocarmos uma carga de prova q num ponto qualquer entre as duas placas do capacitor, ela vai ser atraída pela carga negativa e repelida pela carga positiva (Figura 13a). Ou seja, os campos de cada uma das placas vão agir no mesmo sentido, isto é: vão empurrar a carga de prova em direção à placa negativa. Assim, o campo resultante vai apontar essa direção e, portanto, as linhas de campo também (Figura 13b).

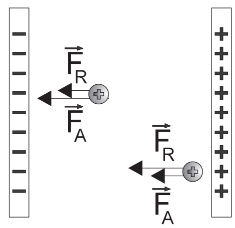

Figura 13a

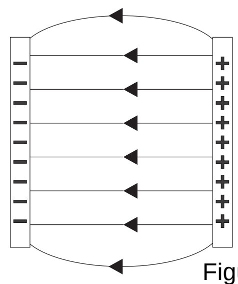
Figura 13b

Outro aspecto do campo de um capacitor é o seguinte: se colocarmos a carga de prova perto da placa positiva (Figura 13a), ela vai ser repelida por essa placa com grande força (podemos dizer também que o campo dessa placa, nesse ponto, é grande). Ao mesmo tempo, essa carga vai ser atraída pela placa negativa com uma força menor (podemos dizer também que o campo dessa placa nesse ponto é pequeno). Mas os dois campos estão no mesmo sentido: então, a carga de prova vai ser empurrada, na direção da placa negativa, por um campo que é a soma dos dois campos das duas placas.

Mas, se a carga de prova estiver perto da placa negativa (Figura 13a), ela vai ser atraída pela placa com uma força muito grande. Ao mesmo tempo, a carga de prova é repelida pela placa positiva por uma força pequena. Poderíamos ter dito que, naquele ponto, o campo da placa negativa é grande e o campo da placa positiva é pequeno. Mas, da mesma maneira que o caso anterior, os dois campos estão empurrando a carga de prova em direção à placa negativa.

O interessante é que, em ambos os casos, e quaisquer que sejam os pontos considerados, o valor do campo é o mesmo. Logo, entre as duas placas de um capacitor de placas paralelas o valor do campo é sempre o mesmo. Como, além de ter sempre o mesmo valor, o campo entre as placas tem sempre a mesma direção, dizemos que esse campo é **uniforme**. Note que, fora das placas, as linhas de campo não são mais perpendiculares às mesmas.

Um campo numa certa região do espaço é uniforme se, nessa região, sua direção, sentido e valor forem constantes.

Se colocarmos um corpo carregado entre as placas de um capacitor, seu deslocamento vai ser dirigido pelo campo elétrico desse capacitor. Além disso, esse corpo tem massa, e o campo gravitacional vai influir também. Todavia, para corpos como prótons e elétrons, podemos ter capacitores nos quais o campo elétrico é muitas e muitas vezes maior que o campo gravitacional. Dessa maneira, uma dessas partículas colocada entre as placas de tal capacitor vai seguir, praticamente, as linhas de campo do mesmo.

Passo a passo

O campo elétrico entre as placas de um capacitor vale $5 \cdot 10^4$ N/C. A distância entre as placas do capacitor é 5 cm. Se um elétron for lançado perpendicularmente às placas, com uma velocidade de $8 \cdot 10^6$ m/s, através de um furo que existe na placa negativa, com que velocidade vai atingir a outra placa? Quanto tempo o elétron gasta para atravessar o capacitor (Figura 14)?

Dados: massa do elétron $= 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
carga do elétron $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

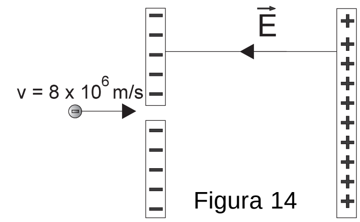

Figura 14

O elétron entra no capacitor e vai se movimentar no sentido contrário ao das linhas de campo, pois é uma carga negativa. Sobre o elétron vai agir uma força F dada por:

$$F = E \cdot q$$

onde E é o valor do campo elétrico entre as placas do capacitor e q é a carga do elétron.

$$F = 5 \cdot 10^4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 8 \cdot 10^{-15}\ \text{N}$$

Como sabemos o valor da força e a massa do elétron, podemos calcular a aceleração a que ele está submetido. Como a força é constante, a aceleração também vai ser constante e o movimento será uniformemente variado.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{8 \cdot 10^{-15}\,\text{N}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}} = 8{,}8 \cdot 10^{15}\ \text{N/kg} = 8{,}8 \cdot 10^{15}\ \text{m/s}^2$$

Sabendo a aceleração, podemos calcular a velocidade final do elétron utilizando a equação de Torricelli:

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta d$$

onde **v** é a velocidade inicial do elétron, $\mathbf{v_0}$ é a velocidade final do elétron ao atingir a placa positiva, **a** é a aceleração do elétron e **Δd** é a distância entre as placas.

$$v^2 = (8 \cdot 10^6)^2 + 2 \cdot 8{,}8 \cdot 10^{15} \cdot 5 \cdot 10^{-2}$$
$$v^2 = 6{,}4 \cdot 10^{13} + 8{,}8 \cdot 10^{14}$$
$$v^2 = 9{,}4 \cdot 10^{14}$$
$$v = 3{,}1 \cdot 10^7\ \text{m/s}$$

Sabendo o valor da velocidade final do elétron e sua aceleração, podemos calcular o tempo gasto **t** para que ele percorra o espaço entre as placas. Como o movimento é uniformemente variado, teremos:

$$\mathbf{v = v_0 + a \cdot t}$$

onde **v** é a velocidade final, **a** é sua aceleração e $\mathbf{v_0}$ é a velocidade com que ele foi lançado entre as placas.

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{3{,}1 \cdot 10^7 - 8 \cdot 10^6}{8{,}8 \cdot 10^{15}} = 2{,}6 \cdot 10^{-9}\ \text{s}$$

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o que é o campo elétrico;
- o que são linhas de campo;
- como é obtido o campo gerado por vários corpos carregados.

Mãos à obra

Exercício 1

Qual o campo gerado por uma carga negativa de $6 \cdot 10^{-8}$ C, a uma distância de 2 cm da mesma? A que distância da carga o valor desse campo reduz-se à metade?

Exercício 2

Duas cargas positivas cujos valores são $Q_1 = 3 \cdot 10^{-8}$ C e $Q^2 = 4 \cdot 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 2 cm. Qual o valor do campo no ponto médio entre essas cargas? Em que ponto entre as duas o valor do campo é nulo?

Exercício 3

A distância entra as placas de um capacitor de placas paralelas é 1 cm. O campo no interior do mesmo vale $5 \cdot 10^3$ N/C. Se abandonarmos um elétron junto à placa negativa, quanto tempo ele levará para chegar à placa positiva? Qual o valor de sua energia cinética ao atingir a placa?

Dados: massa do elétron = $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
carga do elétron = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C