



**Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC**  
Campus Blumenau - BNU  
Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação - CTE  
Departamento de Ciências Exatas e Educação – CEE  
Física Experimental III – BLU6210

**Experimento 02 – Linhas de campo elétrico**

**Introdução**

Cargas eletrostáticas interagem entre si através de uma força atrativa ou repulsiva que depende do tipo de cargas (positiva ou negativa), do seu módulo e da distância entre elas. Essa força de interação é chamada força de Coulomb que, no vácuo e para duas cargas pontuais, é expressa matematicamente como:

$$\vec{F}_{2(1)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(r_{12})^2} \hat{r}_{12}$$

onde  $\vec{F}_{2(1)}$  representa a força que age sobre a carga  $q_2$  devido à interação com a carga  $q_1$ ,  $r_{12}$  representa a distância entre as cargas e  $\hat{r}_{12}$  representa o vetor unitário na direção da reta que une as duas cargas, com sentido de  $q_1$  para  $q_2$ .

Pelo princípio de superposição, a força eletrostática resultante que atua sobre uma carga  $q_i$  devido à interação com outras  $N$  cargas eletrostáticas numa região do espaço, no vácuo, é dada por:

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1}^N \vec{F}_{i(j)} = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{(r_{ji})^2} \hat{r}_{ji}$$

sendo diretamente proporcional à carga  $q_i$ . A partir dessa força é possível então definir uma grandeza vetorial chamada campo elétrico, tal que

$$\vec{F}_i = q_i \vec{E}_i$$

onde  $\vec{E}_i$  é definido como o vetor campo elétrico na posição "i" onde se encontra a carga  $q_i$ , então:

$$\vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{(r_{ji})^2} \hat{r}_{ji}$$

As outras  $N$  cargas são, então, consideradas fontes de campo elétrico na posição "i" e a carga  $q_i$  é denominada carga de prova. Assim, uma carga elétrica localizada no espaço vazio e livre de qualquer influência de outras formas eletromagnéticas, de algum modo modifica as propriedades do espaço ao redor dela gerando uma perturbação que chamamos de campo elétrico e, através da carga de prova, é possível medir o campo elétrico numa posição qualquer do espaço.

A força de Coulomb é uma força central e, conseqüentemente, uma força conservativa. O trabalho realizado por uma força conservativa ao longo de um caminho qualquer entre dois pontos  $P_1$  e  $P_2$  não depende do caminho de integração, mas apenas de  $P_1$  e  $P_2$ . Ele pode ser calculado através da expressão:

$$\int_{P_1}^{P_2} \vec{F} \cdot d\vec{l} = -[U(P_2) - U(P_1)]$$

onde  $U(P_2)$  e  $U(P_1)$  representam a energia potencial elétrica nos pontos  $P_2$  e  $P_1$ , respectivamente.

Além disso, a energia potencial elétrica pode ser escrita como

$$U = q_i V$$

onde  $V$  é uma grandeza escalar denominada potencial elétrico e representa a energia potencial por unidade de carga.

Substituindo

$$\vec{F}_i = q_i \vec{E}_i \quad e \quad U = q_i V$$

na expressão do trabalho conservativo, obtemos que:

$$\int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -[V(P_2) - V(P_1)]$$

sendo

$$V(P_2) - V(P_1) = VP_1 P_2$$

o potencial de  $P_1$  em relação à  $P_2$ , ou também denominado diferença de potencial entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$ , tensão ou voltagem, podendo ser obtido experimentalmente.

Utilizando a expressão matemática anterior, é possível obter uma relação local para o campo elétrico em relação ao potencial eletrostático:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V$$

Enquanto  $V$  é uma grandeza escalar, o campo elétrico  $\vec{E}$  é uma função vetorial. Já o gradiente do potencial em coordenadas cartesianas nada mais é do que a derivada do potencial em relação às três direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  do espaço, multiplicada pelos correspondentes vetores unitários nessas direções, ou seja:

$$\vec{E}(x, y, z) = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{k}\right)$$

onde o gradiente representa fisicamente a direção e sentido da maior taxa de variação do potencial. Portanto, o campo elétrico,  $\vec{E}(x, y, z)$ , é uma grandeza vetorial que pode ser mensurada a partir de uma grandeza escalar chamada potencial elétrico,  $V(x, y, z)$ .

De modo a ilustrar geometricamente o campo elétrico, o Físico inglês Michael Faraday (1791-1867) introduziu o conceito de linhas de campo (ou linhas de força). As linhas de campo elétrico indicam a direção e o sentido do vetor campo elétrico  $\vec{E}$  em cada ponto no espaço, sendo sempre orientadas no sentido de um menor potencial para um maior potencial. Numa

região do espaço onde há uma carga puntiforme positiva, as linhas de força têm direção radial e apontam para fora da carga positiva. Se a carga é negativa, o sentido é contrário, apontando para dentro da carga negativa.

Embora as linhas de força indiquem o sentido e a direção do campo elétrico no espaço, elas não fornecem sua magnitude, entretanto, o espaçamento dessas linhas fornece qualitativamente a magnitude de  $\vec{E}$  em cada ponto: as linhas de força são desenhadas agrupadas de forma mais compacta nas regiões de forte campo e mais espaçadas nas regiões de campo mais fraco. Outra característica dessa representação é que, em qualquer ponto particular, o campo elétrico possui uma única direção e sentido, de modo que somente uma linha de campo elétrico pode passar em cada ponto. Em outras palavras, as linhas de campo jamais se cruzam.

Como citado anteriormente, é possível obter o campo elétrico a partir do potencial elétrico e, além de inferir sua magnitude, também relacionar as linhas de campo elétrico às chamadas superfícies equipotenciais. Nesse contexto, o potencial elétrico possui uma representação análoga a de mapas topográficos, na qual cada linha de contorno representa pontos de mesmo potencial, isto é, o potencial é constante em todos os pontos de uma mesma superfície equipotencial, sendo que estas superfícies são geralmente representadas igualmente espaçadas.

Como a energia potencial de uma carga não varia ao percorrer uma superfície equipotencial, a força elétrica não realiza trabalho sobre a carga, portanto, o campo elétrico é perpendicular à superfície equipotencial em qualquer um de seus pontos (lembre-se que  $\vec{F}_i = q_i \vec{E}_i$ ). Assim, as linhas de campo elétrico e as superfícies equipotenciais são sempre mutuamente perpendiculares.

Para exemplificar o comportamento das linhas de campo elétrico e das superfícies equipotenciais, na Figura 01 são ilustradas três situações planares diferentes: *a)* uma carga puntual positiva, *b)* um dipolo elétrico e *c)* duas cargas positivas localizadas no espaço. Nas figuras as linhas sólidas representam as superfícies equipotenciais e as linhas tracejadas as linhas de campo elétrico.

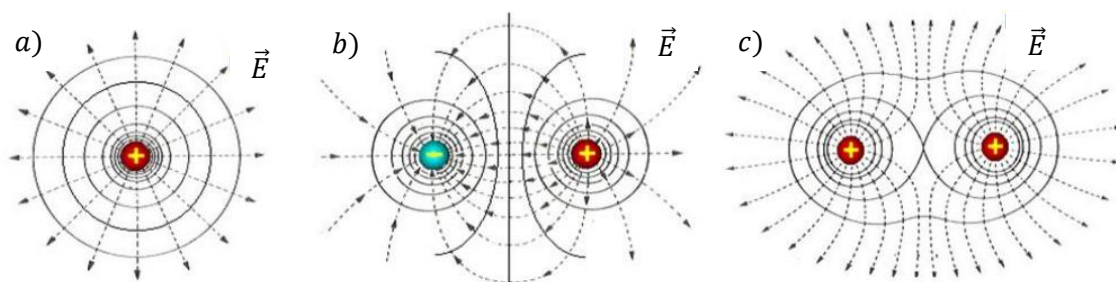


Figura 01: Superfícies equipotenciais para três configurações planares de cargas: *a)* uma carga puntual positiva, *b)* um dipolo elétrico e *c)* duas cargas puntuais positivas.

## Objetivos

- Desenhar as linhas de campo elétrico a partir das correspondentes projeções das superfícies equipotenciais de diferentes configurações de carga;
- Obter o campo elétrico  $\vec{E}$  a partir das variações do potencial nos eixos x e y;
- Descrever o comportamento do potencial elétrico e do campo elétrico no interior e na superfície de um condutor em equilíbrio eletrostático.

## Resumo do experimento

Nesse experimento serão construídas as linhas de força do campo eletrostático, isto é, as curvas que acompanham os vetores de campo elétrico  $\vec{E}$  em cada ponto do espaço (o vetor  $\vec{E}$  é sempre tangente à curva no ponto, lembrando que  $\vec{F} = q\vec{E}$ ). Como não é possível medir diretamente o vetor  $\vec{E}$ , serão realizadas medidas indiretas a partir do potencial elétrico. Sabemos que o campo elétrico é proporcional a variação de potencial ( $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$ ) e, que as linhas de campo elétrico são perpendiculares às superfícies equipotenciais, então utilizaremos medidas de diferença de potencial para obter as linhas de campo elétrico. Utilizando um multímetro, obteremos a diferença de potencial entre diversos pontos no espaço para obter as curvas equipotenciais. Através das curvas equipotenciais, traçaremos as linhas de força do campo  $\vec{E}$ : estas serão traçadas ortogonais às curvas equipotenciais e devem partir da região de maior potencial para a região de menor potencial. Serão analisadas três configurações distintas, relacionadas aos procedimentos A, B e C descritos a seguir.

## Materiais

Para a realização desse experimento serão utilizados os seguintes materiais:

- Fonte de tensão (corrente contínua);
- 2 folhas de papel condutivo, cada uma com duas configurações desenhadas com tinta condutiva de prata;
- Papel milimetrado;
- Superfície de trabalho de cortiça;
- Pinos de papel metálicos utilizados como eletrodos nas figuras condutivas;
- Pinos para prender o papel na superfície de cortiça;
- Cabos com terminais do tipo banana;
- Multímetro;
- Jacarés;
- Caneta de tinta condutiva (utilizadas para desenhar cada configuração na folha de papel condutivo).

## Procedimento Experimental

As configurações que serão investigadas em cada procedimento estão ilustradas na Figura 02 abaixo.

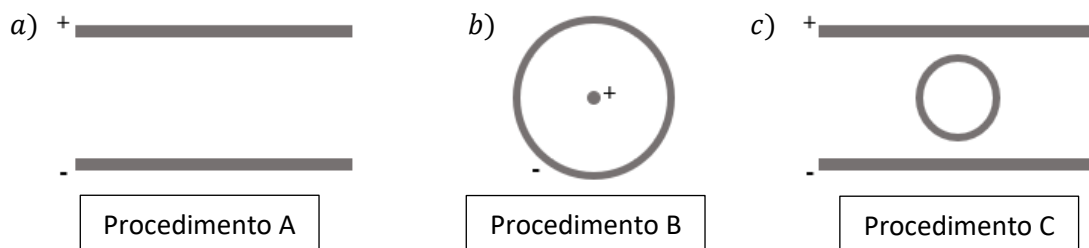


Figura 01: Superfícies equipotenciais para três configurações planares de cargas: a) uma carga puntual positiva, b) um dipolo elétrico e c) duas cargas puntuais positivas.

Caso os pares de cabos bananas (um vermelho simbolizando o terminal positivo e outro preto, simbolizando o terminal negativo) não estejam conectados, você deve:

- Utilizar um par de cabos banana para o multímetro na função voltímetro;
- Utilizar o outro par de cabos banana para conectar os terminais da fonte de tensão ao par de eletrodos colocados em cada uma das configurações (utilizar jacarés para ligar os conectores banana aos eletrodos).

Para cada um dos procedimentos (A, B e C) ilustrados na Figura 02, você deverá obter no mínimo 5 linhas equipotenciais na região entre os eletrodos e, para desenhar cada linha, você deve obter pelo menos 10 pontos de mesmo potencial.

Repita os passos a seguir para cada um dos procedimentos:

- 1) Desenhe na mesma escala as figuras referentes aos procedimentos A, B e C no papel milimetrado;
- 2) Observe a simetria da configuração para ter uma ideia de como são as linhas equipotenciais de cada procedimento. Como elas serão representadas igualmente espaçadas, escolha 5 pontos (coordenadas) aproximadamente equidistantes na reta de maior simetria que une as linhas condutivas de prata (onde os eletrodos encontram-se conectados), podendo inclusive escolher um ponto em cada linha condutiva, registrando-os a seguir no papel milimetrado. Cada um desses 5 pontos será uma referência para encontrar nas etapas seguintes com o voltímetro os outros pontos da mesma linha equipotencial;
- 3) Selecione a escala 200 V (dc) no voltímetro;
- 4) Ligue a fonte de tensão e use o seletor "Coarse" para selecionar a tensão de 10,0 V. Nessa situação haverá uma diferença de potencial de 10,0 V entre os eletrodos positivo e negativo;
- 5) Encaixe o conector banana negativo do voltímetro no eletrodo negativo (utilize como referencial a cor preta). Você pode escolher esse ponto como referencial para o potencial e definir que o potencial nesse ponto é de 0 Volts. Encoste suavemente o conector banana positivo (fio vermelho) do voltímetro no papel condutivo em um dos pontos escolhidos no item 1) e meça a diferença de potencial entre esse ponto e o eletrodo negativo. Note que você está medindo a diferença de potencial entre dois pontos e não o potencial no ponto;
- 6) Utilize uma régua para auxiliar a transferência das coordenadas de cada ponto do papel condutivo para o papel milimetrado e anote, próximo ao ponto, o valor da diferença de potencial obtida;
- 7) Arrastando suavemente o conector banana positivo pelo papel condutivo, procure um ponto na vizinhança do ponto anterior que possui a mesma diferença de potencial. Repita esse procedimento até obter 10 pontos de mesmo potencial e, assim, poder traçar uma linha equipotencial;
- 8) Trace uma curva média (linha tracejada) sobre os pontos do papel milimetrado que representam um mesmo potencial, de modo a visualizar a projeção da superfície equipotencial medida e identifique o valor do potencial nessa região. Se você escolheu

0 Volts para o potencial do eletrodo negativo, o valor do potencial na curva é igual ao da diferença de potencial mensurado pelo voltímetro);

- 9) Repita as etapas 5), 6), 7) e 8) para os outros pontos de referência escolhidos previamente na etapa 2), a fim de obter pelo menos 5 linhas equipotenciais;
- 10) A partir do conjunto de linhas equipotenciais, trace as correspondentes linhas de força do campo elétrico (linhas contínuas), indicando seu sentido;
- 11) Repita todo o procedimento para as outras configurações de eletrodos (procedimentos B e C).

OBSERVAÇÃO: No procedimento C, meça também a tensão na superfície e no interior do círculo condutor.