Campo Eletrostático e Mapeamento de Equipotenciais

Nesta prática vamos estudar o comportamento de grandezas como campo elétrico e potencial elétrico. Determinaremos as superfícies equipotenciais e linhas de campo elétrico, além de observar o fenômeno de blindagem eletrostática.

Sempre que surgir uma dúvida quanto à utilização de um instrumento ou componente, o aluno deverá consultar o professor para esclarecimentos.

I. Potencial e Campo Eletrostático

Uma propriedade do campo eletrostático é ser um campo *conservativo* (seu rotacional é nulo). A força elétrica é simplesmente o campo multiplicado por uma constante (a carga de prova) e também é conservativa. É conhecido da mecânica que as forças conservativas são muito mais simples de se analisar, porque o trabalho que elas realizam depende apenas dos pontos inicial e final, e não da trajetória. Isso permite definir uma função escalar, chamada energia potencial, de tal forma que, se apenas a força conservativa atuar, a soma da energia cinética com a energia potencial permanece constante (essa constante é denominada energia total).

$$U(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_o}^{\vec{r}} \vec{F}.d\vec{r} = -q\int_{\vec{r}_o}^{\vec{r}} \vec{E}.d\vec{r} \tag{1}$$

Da mesma forma que a força é proporcional à carga elétrica, a energia potencial também é. Podemos então definir a energia potencial por unidade de carga, que é chamado de potencial elétrico:

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{q}U(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_o}^{\vec{r}} \vec{E}.d\vec{r} \tag{2}$$

A equação 2 dá o potencial se o campo for conhecido. No entanto, é mais fácil medir o potencial, porque esse é uma função escalar, enquanto o campo é vetorial; ou seja, para determinar o potencial, precisamos apenas de um número, enquanto que para determinar o campo precisamos saber a intensidade, a direção e o sentido. Para calcular o campo supondo conhecido o potencial, precisamos da relação inversa da equação 2, que é:

$$\vec{E} = -\nabla V \tag{3}$$

Uma superfície equipotencial é aquela sobre a qual o potencial é constante: a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer da superfície é nula. Portanto, sobre uma equipotencial:

$$-\int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E}.d\vec{r} = 0 \tag{4}$$

Sendo $\overrightarrow{\Delta S}$ o vetor unitário perpendicular a uma superfície equipotencial, temos, de forma aproximada:

$$\vec{E} = -\frac{\Delta V}{\Delta s}\overrightarrow{\Delta S} \tag{5}$$

II. Medidas de potencias e campos eletrostáticas

As medidas de potenciais e campos eletrostáticos são experimentos difíceis de serem realizados em laboratório convencionais de ensino. Isto ocorre porque o meio no qual o campo é gerado é altamente isolante, e a resistência equivalente entre dois pontos é grande, comparável ou até maior do que a resistência interna dos voltímetros comerciais, de modo que a leitura seria totalmente errônea. Tais medidas exigiriam instrumentos de altíssima resistência interna, como voltímetros eletrostáticos ou eletrômetros e condições ambientais especiais, tais como baixo teor de umidade, atmosfera inerte ou alto vácuo.

Contudo, podemos contornar esta situação fazendo o mapeamento em um meio com baixa resistividade como, por exemplo, uma solução aquosa de $CuSO_4$. Este eletrólito possui cargas que podem se deslocar quando sujeitas à ação de um campo elétrico, que surge quando conectamos uma fonte de tensão a eletrodos metálicos mergulhados no eletrólito. A distribuição de cargas nas superfícies dos eletrodos dá origem a um campo eletrostático no meio eletrolítico. Dessa forma, o potencial $V(P)$ nos diferentes pontos do eletrólito pode ser mapeado e possibilita o estudo do campo eletrostático bidimensional correspondente. Esse método é muito usado na prática para determinar as figuras de potencial de objetos de diferentes formatos, e pode inclusive ser usado para estudar um campo elétrico tridimensional, mergulhando o objeto totalmente no meio eletrolítico.

Para ilustrar o método de mapeamento, a figura 1 ilustra as linhas de campo e as superfícies equipotenciais de dois eletrodos simulando cargas pontuais, opostas e de mesmo módulo (dipolo elétrico). Uma bateria cria a diferença de potencial entre os eletrodos e faz com que um fique com carga positiva e o outro fique com carga negativa.

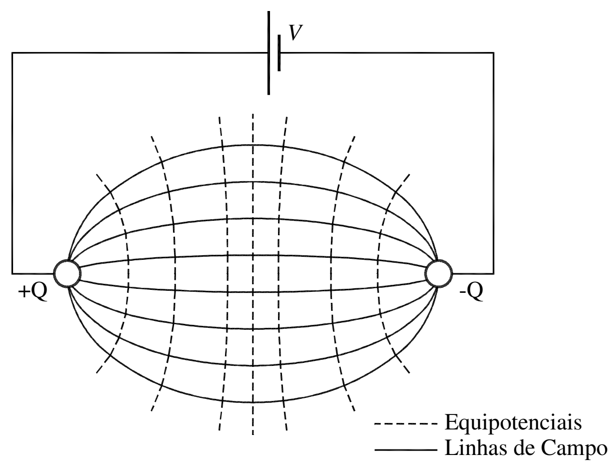

Figura 1 – Padrão do campo elétrico gerado por duas cargas de sinais opostos e mesmo módulo (dipolo elétrico)

As equipotenciais podem ser traçadas ligando um conjunto de pontos que possuem o mesmo valor de potencial, os quais podem ser determinados utilizando um voltímetro convencional. Uma vez traçado um conjunto de linhas equipotenciais, as linhas de campo podem ser encontrada trançando-se linhas perpendiculares as mesmas. O valor do campo elétrico em cada ponto pode ser encontrado de forma aproximada utilizando a equação 5.

Experimentos

1. Medida do potencial entre cargas pontuais utilizando uma cuba

a) A figura 2 ilustra um esquema da montagem experimental a ser utilizada nesta prática. Na cuba é colocada uma solução aquosa (2 M) de $CuSO_4$. Na parte de baixo da cuba há uma folha de papel milimetrado, para servir de guia para as medidas. Os eletrodos A e B são ligados a um transformador 220 V / 6,3 V (o uso de corrente alternada minimiza o desgaste dos eletrodos devido à eletrólise).

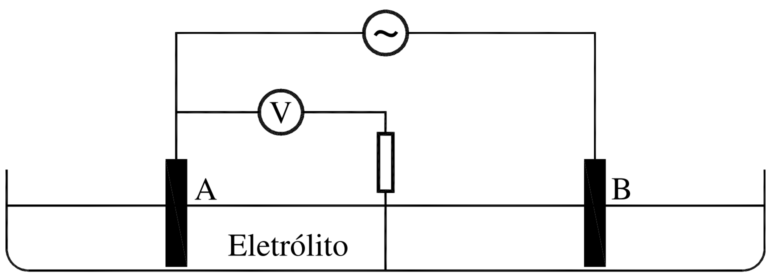

Figura 2 – Diagrama, esquemático, da cuba eletrolítica a ser utilizada

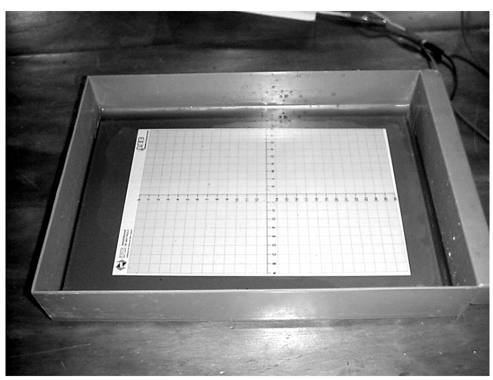

Figura 3 – Fotografia da cuba eletrolítica, mostrando o papel milimetrado

b) Vamos utilizar dois eletrodos cilíndricos (que simulam uma distribuição pontual de carga). Configure o voltímetro para medidas de tesnão alternada (AC) e conecte um dos terminais a um dos eletrodos (eletrodo de referência, marcado como A na figura), ao qual será atribuído o valor de potencial V_R = 0 V. Mergulhe ambos na cuba, a uma distância de 10 a 15 cm um do outro, como mostra a figura 4.

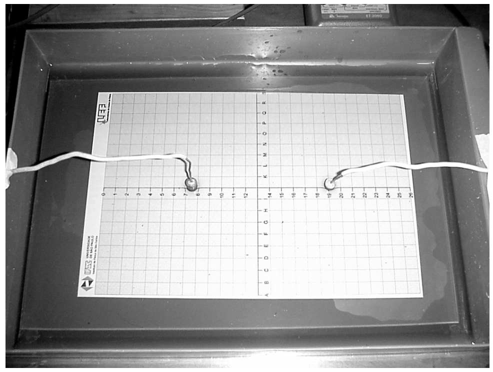

Figura 4 – Dois eletrodos cilíndricos mergulhados na cuba eletrolítica

c) O outro terminal do voltímetro servirá como "sonda móvel", a ser posicionada em qualquer ponto do líquido. Ele será acoplado a uma ponta metálica fina, que, ao ser imersa em um ponto qualquer do eletrólito, fará com que o voltímetro indique a tensão entre o ponto de imersão (P) e o eletrodo de referência (A), permitindo a medida do valor do potencial, $V(P)$, em qualquer coordenada do eletrólito. O valor do potencial será, então, dado pela leitura do voltímetro, uma vez que $V_R = 0$ V.

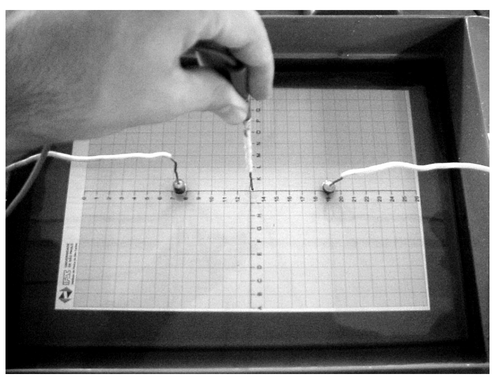

Figura 5 – Medindo o potencial em um ponto da cuba eletrolítica

d) O mapeamento de uma determinada superfície equipotencial será feito movendo-se a "sonda móvel" de forma tal que a leitura do voltímetro permaneça constante. As coordenadas das superfícies equipotenciais serão obtidas com auxílio do papel milimetrado localizado dentro da cuba eletrolítica. Essas coordenadas, bem como os contornos dos eletrodos, deverão ser desenhadas em outro papel milimetrado. O procedimento deverá ser repetido para um número de equipotenciais suficientes para o mapeamento do campo. Para tal, essas equipotenciais devem estar espaçadas de aproximadamente 2 cm uma da outra. Além disso, cada superfície equipotencial deve conter, aproximadamente, 10 pontos eqüidistantes.

e) Desenhe o conjunto de linhas ortogonais às equipotenciais, as quais constituem as linhas de campo elétrico.

f) Determine, utilizando a equação 5, o valor do campo ao longo do eixo que une os eletrodos em três pontos, sendo um próximo de cada eletrodo e o outro no centro. Determine, também, o valor do campo elétrico em um ponto fora do eixo. Obviamente, este procedimento fornece apenas um valor aproximado para o campo, afinal, não podemos fazer, na prática, o que é feito no cálculo diferencial, ou seja, fazer ΔS "tender a zero".

g) Desenhe uma curva fechada qualquer interceptando várias equipotenciais, ou seja, N intervalos. Calcule, então, o valor de $\sum_{i=1}^{N}(V_{i+1} - V_i)$ ao longo do circuito e relacione com a equação 4.

Mapeamentos das equipotenciais de duas cargas pontuais.

***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**

2. Medida do potencial entre uma carga pontual e uma placa

a) Vamos utilizar agora um eletrodo cilíndrico e um eletrodo em forma de placa, simulando uma carga pontual e um plano carregado. Mergulhe os dois eletrodos com uma distância de cerca de 5 cm um do outro, como na figura 6.

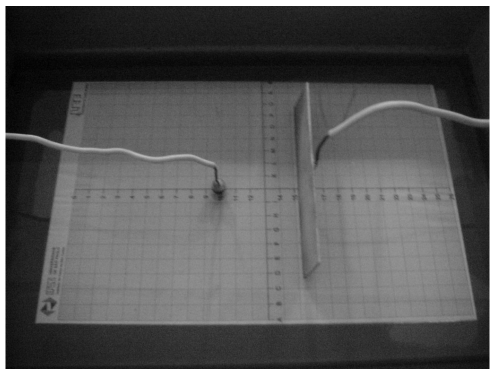

Figura 6 – Um eletrodo cilíndrico e um em forma de placa mergulhados na cuba eletrolítica

b) Mapeie as superfícies equipotenciais dessa configuração. Na região entre o cilindro e a placa, as equipotenciais devem estar espaçadas entre si de 1 cm; anote pelo menos 10 pontos por equipotencial.

c) Calcule o campo elétrico (usando a equação 3) em dois pontos da linha entre o cilindro e a placa.

Mapeamentos das equipotenciais de um carga pontual próxima a uma placa carregada.

x(cm)	*y*(cm)	*V*(V)	*x*(cm)	*y*(cm)	*V*(V)	*x*(cm)	*y*(cm)	*V*(V)	*x*(cm)	*y*(cm)	*V*(V)

3. Medida do potencial entre duas placas

a) Vamos utilizar agora dois eletrodos em forma de placa, simulando dois planos carregados (um capacitor de placas planas e paralelas). Mergulhe os dois eletrodos com uma distância de cerca de 5 cm um do outro, como na figura 7.

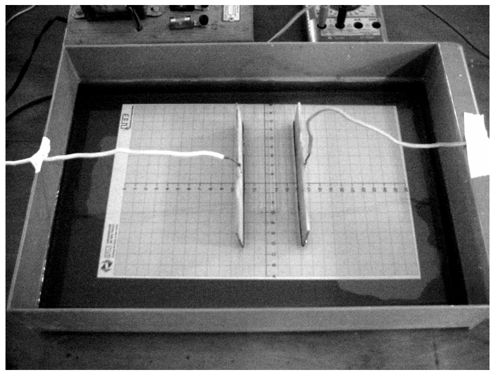

Figura 7 – Dois eletrodos em forma de placa mergulhados na cuba eletrolítica

b) Mapeie as superfícies equipotenciais dessa configuração na região entre as placas. Nessa região, as equipotenciais devem estar espaçadas entre si de 1 cm; anote pelo menos 10 pontos por equipotencial.

c) Calcule o campo elétrico (usando a equação 3) em três pontos da linha entre as placas.

d) Investigue como é o campo elétrico na região externa às placas.

Mapeamentos das equipotenciais entre duas placas planas e paralelas.

x(cm)	*y*(cm)	*V*(V)	*x*(cm)	*y*(cm)	*V*(V)	*x*(cm)	*y*(cm)	*V*(V)	*x*(cm)	*y*(cm)	*V*(V)

4. Medida do potencial em um condutor oco

a) Utilize agora dois eletrodos em forma de placas e insira um eletrodo cilíndrico metálico oco no centro da cuba, como na figura 8. Seguindo o mesmo procedimento anterior, determine as curvas equipotenciais.

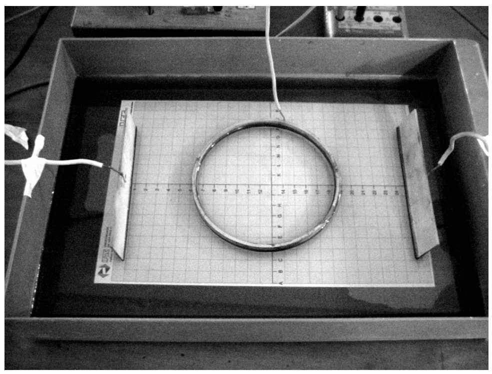

Figura 8 – Eletrodo cilíndrico oco mergulhado na cuba eletrolítica

b) Baseado na equação 4, explique o comportamento do potencial no interior do cilindro oco.

c) Discuta por que as linhas de campo são normais às superfícies metálicas.

Mapeamentos das equipotenciais de um cilindro condutor entre duas placas planas e paralelas.

***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**

d) Substitua o cilindro metálico oco por um cilindro plástico oco, como na figura 9. Analise o comportamento no interior do cilindro plástico. Quais são as diferenças?

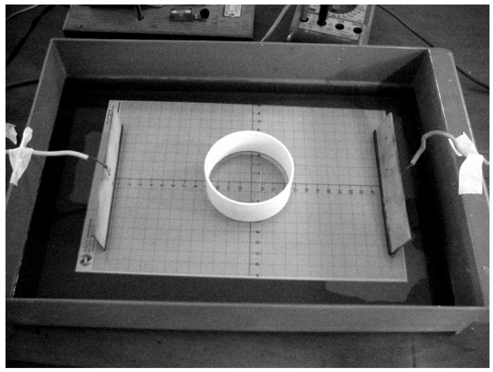

Figura 9 – Cilindro plástico oco mergulhado na cuba eletrolítica

Mapeamentos das equipotenciais de um cilindro isolante entre duas placas planas e paralelas.

***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**	***x*(cm)**	***y*(cm)**	***V*(V)**