

EXPERIÊNCIA 6

LINHAS EQUIPOTENCIAIS

Fazer um mapeamento das linhas equipotenciais e das de força de um campo elétrico, através da simulação do caso eletrostático, utilizando para isso, uma das três diferentes configurações de cargas de sinais opostos.

Configuração 1 - **Dois condutores cilíndricos iguais.**

Configuração 2 - **Duas placas condutoras iguais.**

Configuração 3 - **A critério do seu professor.**

II - PARTE TEÓRICA:

INTRODUÇÃO:

Imaginemos um espaço vazio livre de qualquer influência elétrica. Se a este espaço trazemos agora uma carga elétrica, toda a região em volta é perturbada pela sua presença. A essa perturbação chamamos Campo Elétrico. Para detectar essa nova propriedade do espaço precisamos entretanto, de outra carga.

Podemos então dizer: o Campo Elétrico se manifesta na região do espaço que envolve uma carga elétrica. Ao colocarmos outra carga, esta sofre a ação de uma força de atração ou de repulsão. Isso é apenas uma noção qualitativa do campo elétrico.

Para caracterizar matematicamente as propriedades adquiridas pela região do espaço na qual colocamos uma carga elétrica, ou seja, para caracterizar essa nova qualidade da região, consideraremos a seguinte situação: imaginemos uma carga elétrica Q . Ela modifica as propriedades elétricas de uma certa região do espaço, isto é, produz um campo elétrico ao seu redor. Coloquemos em um ponto qualquer desta região que envolve Q uma outra carga elétrica muito pequena, que chamaremos de “carga de prova” ou “carga de teste”, e que, por conveniência, será positiva. Essa segunda carga sofrerá a ação de uma força \vec{F} .

Definimos então o vetor campo elétrico no ponto onde colocamos a “carga de teste”, como sendo o vetor,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

onde q indica a carga de prova, \vec{F} é a força que atua sobre ela e \vec{E} é o vetor campo elétrico no ponto onde se encontra a carga de prova.

DEFINIÇÕES E CONCEITOS:

Lei de Coulomb

A lei de Coulomb dá a relação quantitativa entre a força eletrostática e as cargas elétricas. A força \vec{F} entre as cargas Q e Q' varia diretamente com o valor de cada carga e inversamente com o quadrado da distância d entre elas; sendo ainda uma função da natureza do meio que envolve as cargas, o que é dado pelo coeficiente $k = 4\pi\epsilon_0$.

$$F = \frac{1}{k} \cdot \frac{Q \cdot Q'}{d^2} \quad (2)$$

O fator k que aparece na lei de Coulomb vale, para o espaço vazio, $k = 1$ (sem dimensão) no Sistema de Unidades Eletrostáticas, e $4\pi\epsilon_0$ (com dimensão de $C^2 / N \cdot m^2$, ou ainda F / m) no Sistema Internacional MKS. Logo:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^{12} m / F \quad (3)$$

ϵ_0 é chamada de constante de permissividade do vácuo (espaço vazio) e vale,

$$\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12} F / m$$

Nos meios físicos reais (ar, plástico, borracha, madeira, etc) o valor ϵ da permissividade é diferente, e é característico do meio considerado. A relação,

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4)$$

é chamada constante dielétrica relativa (sem dimensão).

Direção de um Campo Elétrico

A direção de um campo para qualquer ponto é definida como a direção da força sobre uma carga positiva colocada naquele ponto.

A orientação do campo elétrico numa região pode ser representada graficamente por linhas de força. Uma linha de força de um campo elétrico é uma linha traçada de tal modo que a tangente a ela em qualquer ponto indique a direção do campo elétrico naquele ponto.

Potencial, Superfície Equipotencial

A noção de potencial elétrico provém do conceito de trabalho. O potencial absoluto V em um ponto a uma distância d de uma carga pontual isolada Q é dado pela relação.

$$V = \frac{1}{k} \cdot \frac{Q}{d} \quad (5)$$

e é, por definição, igual ao trabalho W necessário para trazer uma carga de prova q do infinito até a distância d da carga Q , dividido pela carga q :

$$V = \frac{W}{q} \quad (6)$$

O potencial resultante para um ponto situado perto de uma configuração de n cargas é a soma algébrica de todas as contribuições dos diversos potenciais; isso pode ser simbolicamente representado como:

$$V = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{d_i} \quad (7)$$

Uma superfície escolhida de modo a que todos os pontos tenham o mesmo potencial é chamada SUPERFÍCIE EQUIPOTENCIAL. Uma linha de tal superfície é conhecida como LINHA EQUIPOTENCIAL. Superfícies equipotenciais são sempre perpendiculares às linhas de força. Com efeito, o trabalho da força eletrostática é definido como o produto escalar da força pelo deslocamento. Logo, o deslocamento de uma carga teste numa superfície equipotencial não envolve trabalho, uma vez que a força e, portanto, o campo elétrico são sempre perpendiculares às equipotenciais.

Se em um sistema eletrostático as linhas equipotenciais podem ser desenhadas, as linhas de força podem ser imediatamente construídas, uma vez que elas são perpendiculares às linhas equipotenciais.

Exemplo a seguir, figura 1, mostra a influência de uma linha carregada infinita, perpendicular ao plano do desenho, sobre um plano semi - infinito, no potencial zero.

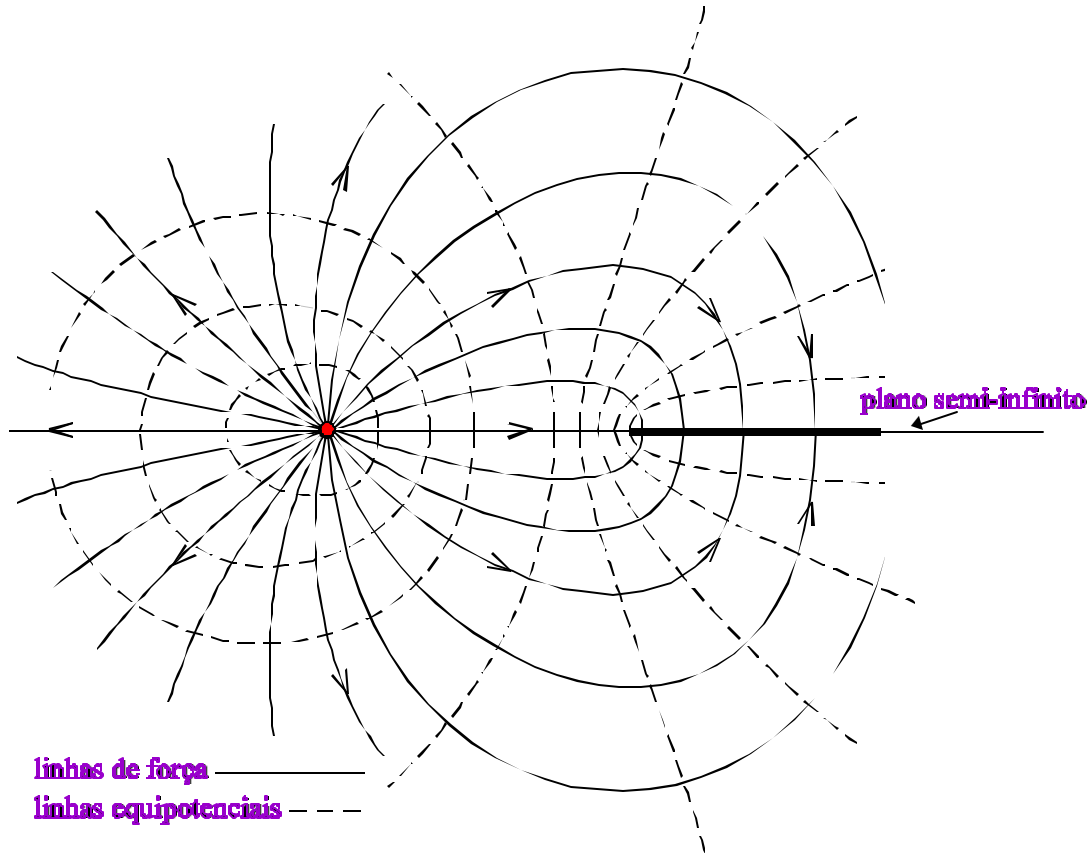


Fig. 1

Superfície Condutoras

Nos parágrafos precedentes, vimos conceitos ligados à eletrostática, onde as cargas elétricas são fixas, ou se deslocam muito devagar. Para o bom entendimento do presente experimento, vamos agora introduzir conceitos ligados ao deslocamento de cargas elétricas. Se as cargas têm relativa liberdade para se deslocar num certo meio, este meio é chamado “meio condutor de eletricidade”. Num meio condutor ôhmico, o fluxo elétrico por segundo (chamado corrente elétrica) é proporcional à diferença de potencial V .

$$I = G \cdot V \quad (8)$$

onde G é a condutância elétrica do meio, em Siemens (S), ainda chamada de mho (\square). A resistência elétrica R é definida como:

$$R = \frac{1}{G} \quad (9)$$

sendo expressa em Ohm, (Ω). Assim, a equação (8) pode ser rescrita como:

$$V = R \cdot I \quad (10)$$

Quando uma diferença de potencial V é mantida entre pontos de uma superfície condutora, há uma corrente elétrica de um lugar de potencial mais alto para outro de potencial mais baixo. As linhas de corrente são os caminhos seguidos pelas cargas elétricas. Essas linhas são perpendiculares às superfícies equipotenciais.

Todas essas linhas de corrente têm exatamente a mesma configuração que as linhas de força em um campo eletrostático. Isso é decorrência do fato de que sua configuração não é alterada quando a corrente é reduzida; quer dizer, os portadores de cargas no meio considerado continuam seguindo os mesmos caminhos, mas em número menor por segundo. Se a corrente fosse reduzida a zero pelo aumento da resistência do meio, as linhas de corrente tornar-se-iam, assim, linhas de força do campo. As linhas equipotenciais permaneceriam imutáveis durante o processo.

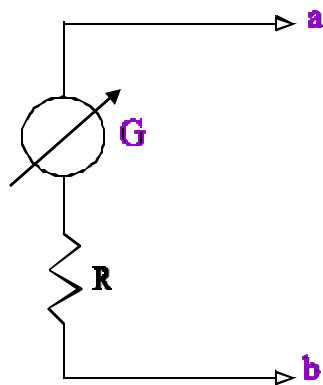
III - TEORIA DA MEDIDA:

Galvanômetro

O funcionamento interno do galvanômetro é quase idêntico ao do amperímetro, voltímetro, etc. (rever a experiência de "MEDIDAS DE CORRENTE E DIFERENÇA DE POTENCIAL"). O galvanômetro, entretanto, possui algumas diferenças no que se refere à escala graduada e a sua sensibilidade.

Essencialmente, o galvanômetro é um detector de corrente de altíssima sensibilidade.

O circuito abaixo representa a montagem que usaremos como detector de zero. Quando os pontos a e b estão no mesmo potencial ($\Delta V = 0$), não há corrente circulando no galvanômetro.



G = galvanômetro de zero central

R = resistência de proteção

a e b - sondas

Fig. 2

No experimento você usará esta montagem como "detector de zero". Cada medida vai consistir em obter uma corrente nula no galvanômetro.

Como ele é um aparelho MUITO FRÁGIL e caro, diminuimos a sua sensibilidade colocando uma resistência de proteção R, em série com o mesmo.

No galvanômetro utilizado, de zero central, pode passar corrente nos dois sentidos. Então o zero da sua escala é obviamente situado no centro.

Líquido Condutor em Cuba de Vidro

Vamos nos limitar ao estudo de um problema em duas dimensões. Assim, o meio condutor (volume) se reduz a uma superfície condutora e os eletrodos (volumes também) se reduzem a simples placas metálicas.

A superfície condutora em nossa experiência será constituída de uma película de uma solução muito diluída de CuSO_4 e colocada em uma cuba de vidro com moldura de madeira. Observe que a condução elétrica da solução de sulfato de cobre é devida ao deslocamento de portadores de cargas positivas (ions Cu^{++}) e portadores de cargas negativas (ions SO_4^{--}). Na parte exterior, por baixo da cuba, foi colocado um papel milimetrado que serve como padrão referencial nas medidas.

Os eletrodos são livres para serem movidos sobre a placa de vidro, parcialmente imersos na solução. A eles é ligada uma fonte de tensão de modo a estabelecer a diferença de potencial.

TÓPICO AVANÇADO:

Neste experimento, você irá determinar as famílias de linhas equipotenciais sem contudo inferir o valor numérico da equipotencial. Esta modificação na montagem do circuito permite traçar as equipotenciais, mas agora são equipotenciais de valor conhecido. A fonte de tensão ajustável é usada aqui como fonte em oposição.

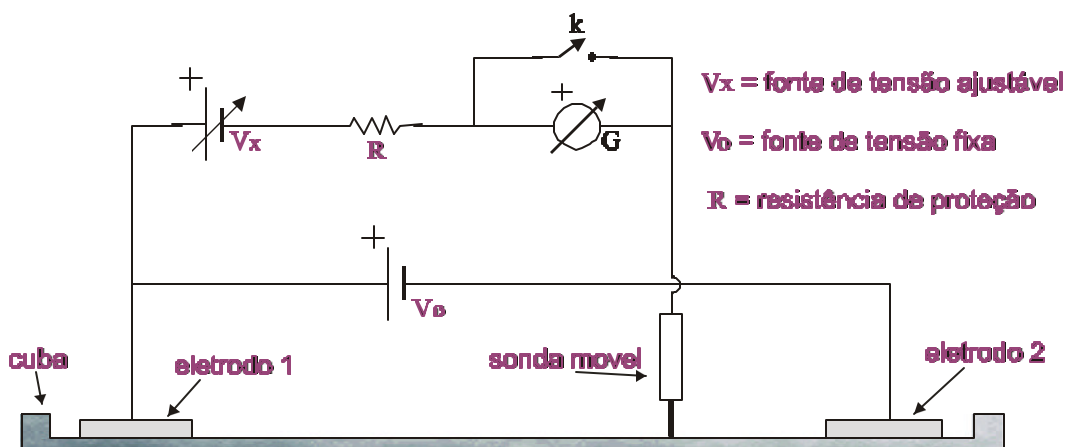


Fig. 3

IV - PARTE EXPERIMENTAL:

O experimento consiste em fazer o mapeamento de algumas linhas equipotenciais num meio líquido condutor (solução de sulfato de cobre, CuSO_4) com ajuda de um "circuito detector de zero". Para produzir a corrente elétrica neste meio, manteremos uma diferença de potencial entre dois eletrodos mergulhados no meio. Das linhas equipotenciais obtidas, podemos deduzir as linhas de corrente e as linhas de campo do problema eletrostático correspondente ao caso onde a resistência do meio se torna infinita.

LISTA DE MATERIAL:

- cuba de madeira e vidro com papel milimetrado na superfície inferior
- fonte de tensão
- eletrodos
- haste e/ou placa de metal
- sonda móvel
- sonda fixa com resistência de proteção para o galvanômetro
- líquido condutor, CuSO_4
- galvanômetro de zero central
- placa de ligação
- chave liga-desliga (duas)
- folha de papel milimetrado
- fios

EQUIPAMENTOS:

CUIDADO COM OS EQUIPAMENTOS:

O galvanômetro é um instrumento muito frágil e **NÃO DEVE SER DESLOCADO**. Os seus terminais devem permanecer NORMALMENTE CURTO-CIRCUITADOS. No circuito temos também uma resistência de proteção R que nunca deve ser retirada ou curto-circuitada. Desligue a chave k , de curto-circuito do galvanômetro somente enquanto estiver procurando os pontos de mesmo potencial, volte a chave à sua posição original imediatamente após a medida. No fim do experimento, ao desarmar o circuito, deixe os terminais do galvanômetro ligados por um pedaço de fio.

Tome muito cuidado com a horizontalidade do fundo da cuba, a fim de garantir uma resistividade constante de solução de CuSO_4 .

MONTAGEM EXPERIMENTAL:

☞ Monte o circuito detector de zero, mostrado na figura 4:

☞ Ajuste a tensão da bateria para valores entre 2 e 4 V.

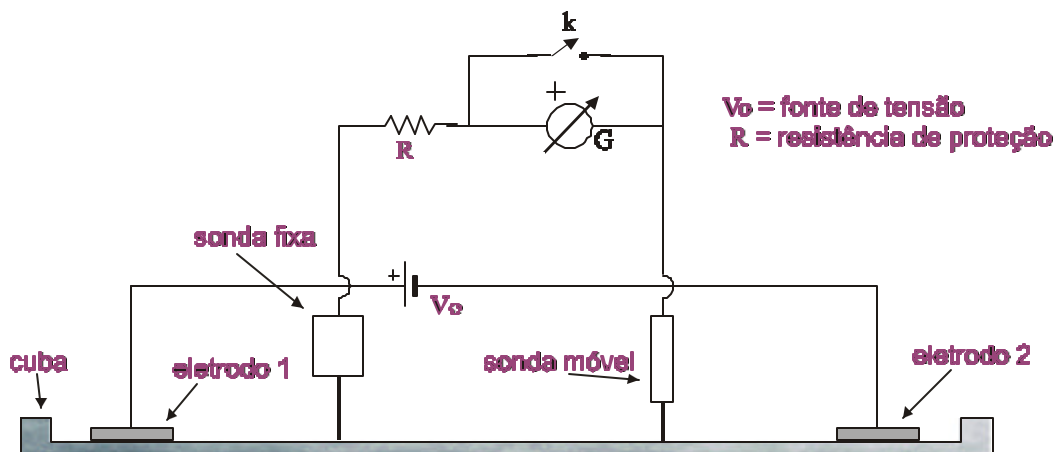


Fig. 4

Para a configuração escolhida, nivele a cuba e coloque o líquido condutor. Nos pontos indicados pelo monitor ou professor coloque os eletrodos. Estabeleça então uma ddp entre os eletrodos utilizando uma fonte de tensão.

As figuras seguintes mostram a montagem experimental para as duas configurações. Realize então, baseado neste desenho e com o auxílio do professor ou monitor, a montagem correspondente à configuração que será estudada.

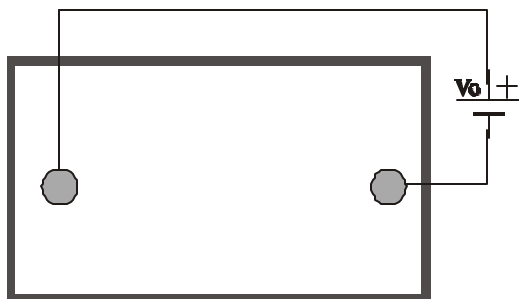


Fig. 5

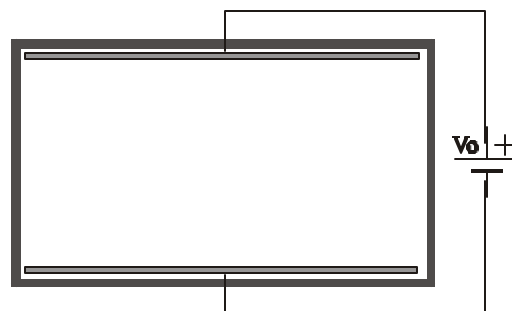


Fig. 6

IV.1 - Configuração

Com a configuração montada de acordo com a figura 5, ou figura 6, ou outra a critério do seu professor, conjunto de figuras 9 a 14, abrimos a chave k . Devemos procurar pontos na solução onde a ddp (ΔV) é nula. Para isto, a sonda fixa é colocada num ponto P arbitrário e com a outra sonda procuramos pontos nas vizinhanças para os quais o galvanômetro não detecta corrente. O ponto encontrado e o ponto da sonda fixa são então transferidos para uma folha de papel milimetrado idêntica à que existe no fundo da cuba. A seguir, devemos procurar outros pontos em número suficiente para traçar a linha equipotencial. Escolha estes pontos de maneira inteligente.


Ao terminar o mapeamento de uma linha a sonda fixa é deslocada para outra posição e todo processo é então repetido, para se mapear uma nova linha.

 Anote a polaridade dos eletrodos.


IV.2 - Configuração 1

Para o mapeamento com esta configuração, figura 5, você utilizará dois eletrodos cilíndricos no primeiro trabalho e acrescentará uma placa retangular metálica para o segundo trabalho, figura 7.

i) Primeiro trabalho

 Colocando sucessivamente a sonda fixa nos pontos indicados pelo professor ou monitor, determine a família de linhas equipotenciais dessa configuração de cargas.


ii) Segundo trabalho

 Coloque, na cuba, no ponto indicado pelo professor ou monitor, a placa metálica, figura 7. Procure as linhas equipotenciais nesta nova configuração, buscando primeiramente determinar a linha equipotencial da placa.


IV.3 - Configuração 2

Para esta configuração, figura 6, você utilizará eletrodos em forma de placa no primeiro trabalho, acrescentando uma haste metálica a um dos eletrodos no segundo trabalho, figura 8.

i) Primeiro trabalho

 Colocando sucessivamente a sonda fixa nos pontos indicados pelo professor ou monitor, determine a família de linhas equipotenciais desta configuração de cargas.

ii) Segundo trabalho

 Coloque a haste fixando-a eletricamente a um dos eletrodos figura 8. Repita o mesmo procedimento feito no primeiro trabalho, mapeando a família de linhas equipotenciais desta nova configuração de cargas.

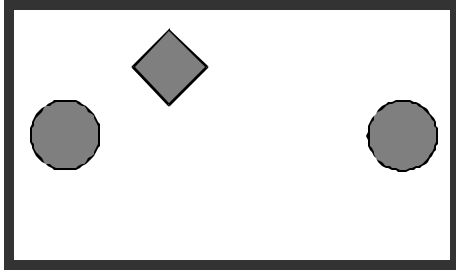


Fig. 7

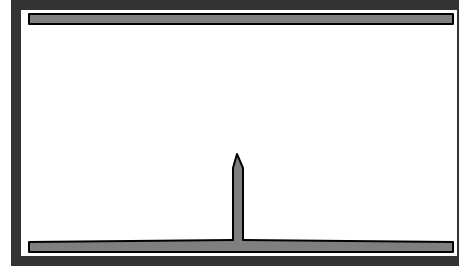


Fig. 8

IV.4 - Configuração 3

A critério do seu professor, determine a família de equipotenciais para a configuração dada.

Apresentamos abaixo algumas configurações clássicas de modelos eletrostáticos, que poderiam ser estudadas.

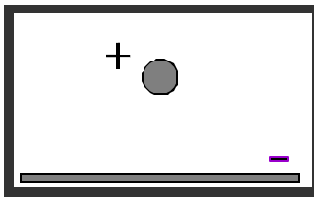


Fig. 9

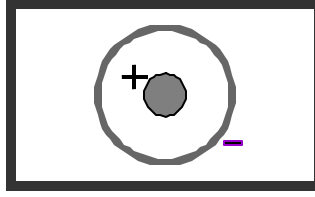


Fig. 10

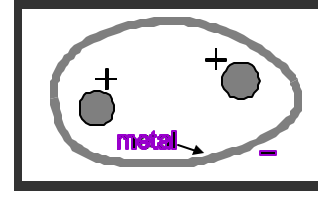


Fig. 11

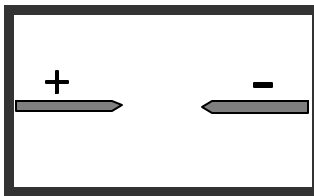


Fig. 12

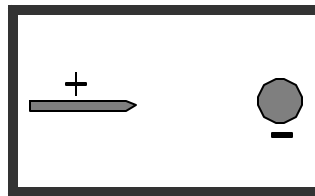


Fig. 13

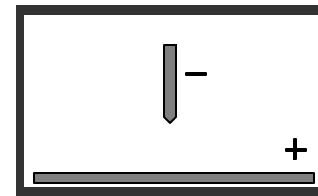


Fig. 14

V - RELATÓRIO:

Este experimento, como aliás todos os outros, deve ser discutido com base na teoria que você aprendeu na aula teórica e/ou no roteiro. Procure identificar e discutir todos os aspectos físicos importantes do experimento.

Como auxílio, daremos a seguir uma lista de possíveis aspectos que devem ser obrigatoriamente abordados em sua discussão.

IMPORTANTE:

- Esta lista não é limitativa e nem pretende estabelecer nenhum tipo de seqüência em sua discussão.

- O que é medido ao se mergulhar a ponta de prova (sonda móvel) na solução?

- Para as configurações, trace as linhas equipotenciais e algumas linhas de corrente não esquecendo os sentidos das mesmas.

- Identifique a polaridade dos eletrodos para a configuração estudada.

- Explique porque se duas linhas equipotenciais se interceptam elas pertencem, obrigatoriamente, à mesma superfície equipotencial.

- Assumindo que a resistividade da solução de sulfato de cobre é muito superior à resistividade do metal dos eletrodos, explique porque os eletrodos também podem ser considerados como sendo equipotenciais.

- Tente analisar o que aconteceria no resultado do experimento se o fundo da cuba não fosse horizontal.

- Explique porque uma variação da profundidade da cuba resistiva é análoga a uma variação de dielétrico no caso eletrostático equivalente.

- Explique porque a equipotencial determinada pela sonda móvel deve passar obrigatoriamente pela sonda fixa.

- A configuração estudada no experimento corresponde a um problema em duas dimensões. Imagine uma modificação do experimento que permita simular problemas eletrostáticos em três dimensões.

- Discuta ainda se for pertinente ao seu trabalho:

- Simetria das linhas equipotenciais e de corrente.
- Configuração das equipotenciais perto dos condutores.
- Linhas de corrente perto dos eletrodos.
- Focalização das linhas de corrente pela placa.
- Regiões de campo mais intenso.
- Efeito de pontas.
- Analogia com o caso eletrostático correspondente.
- Estudo dos erros experimentais.

VI - LEITURA RECOMENDADA:

SCHIEL, D. NOME DO ARTIGO, **Revista de Ensino de Física**, v.1,1979. p. 6.

WESTPHAL, Wilhelm H. Prácticas de Física, 2.ed. Barcelona: Editorial Labor, S.A, 1965. v.3, p. 224 - 230.

BRUHAT, G. Cours de Physique Générale - Electricité, v.2, Masson et Cie, 1959. p. 234.

MEINERS, Harry F. Physics Demonstration Experiments, v.2, The Ronald Press Co. N.Y, 1970. p. 865.

DURAND, E. Électrostatique, v.2, Masson et Cie, 1966.