



Física Experimental III

Notas de aula: www.dfn.if.usp.br/~suaide

LabFlex: www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex

Aula 5

Prof. Alexandre Suaide

Ramal: 7072

Ed. Oscar Sala (Pelletron), sala 246

Experiência II

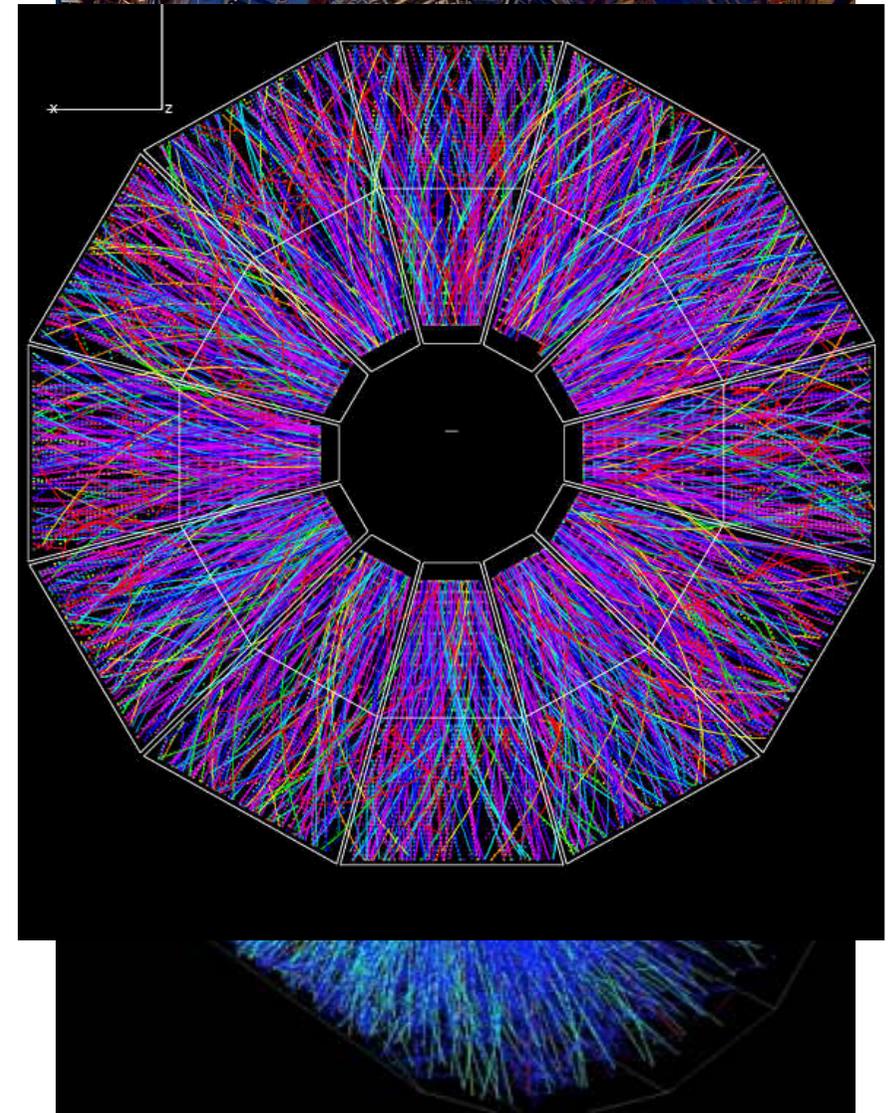
Estudo de uma partícula em um campo
eletromagnético

Experiência 2 - 6 aulas

- Estudar o movimento de uma partícula em um campo eletromagnético
- O Seletor de velocidades do tipo filtro de Wien
 - Configuração especial de campo EM
 - Estudo das propriedades e características deste filtro
 - Como as características experimentais influenciam o funcionamento do filtro?
 - Como contornar as limitações experimentais e como tratar um sistema não ideal do ponto de vista teórico?

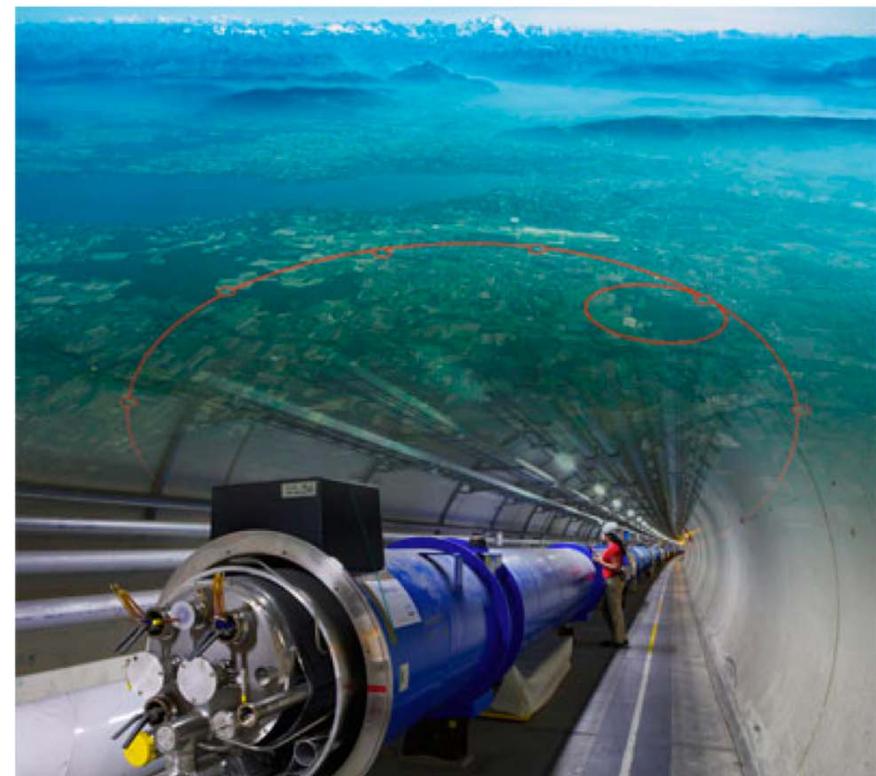
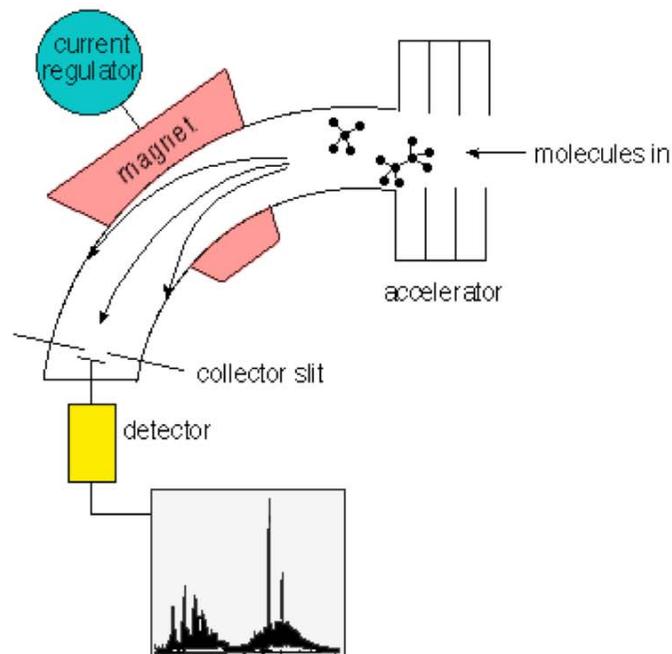
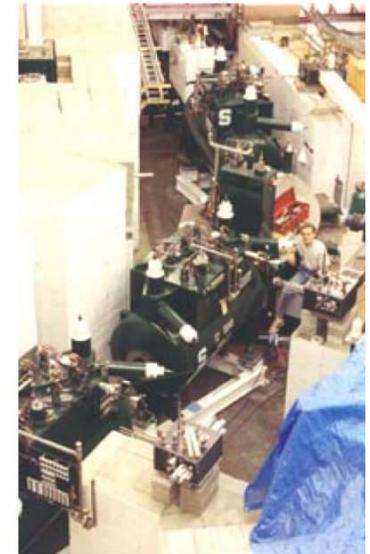
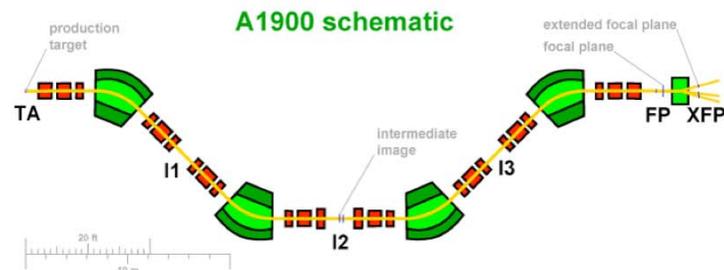
Qual a razão de estudar partículas em campos EM?

- Uma fração significativa do estudo das partículas subatômicas é feito através da análise das suas trajetórias em campos EM.
 - Desde a descoberta do pósitron (*Science* 76, 238, 1932)
 - Até a descoberta de novos estados da matéria nuclear (2007)



Qual a razão de estudar partículas em campos EM?

- Várias aplicações científicas e práticas
 - Aceleradores
 - Pelletron, LAMFI, LHC
 - Analisadores
 - Espectrometro de massa, etc



O Princípio básico é conhecer a interação eletromagnética

- Qual é a força que atua em uma partícula que está imersa em um campo eletromagnético?

$$\vec{F} = \vec{F}_{Elétrica} + \vec{F}_{Magnética} + \vec{F}_{outras}$$

- Por simplicidade (façam as contas e verifiquem)

$$\vec{F}_{outras} \sim 0$$

O Princípio básico é conhecer a interação eletromagnética

- Qual é a força que atua em uma partícula que está imersa em um campo eletromagnético?

$$\vec{F} = \vec{F}_{Elétrica} + \vec{F}_{Magnética}$$

- Se o campo elétrico e magnético são conhecidos

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

... e resolver as equações de movimento

- A trajetória de uma partícula qualquer pode ser descrita resolvendo-se as equações de movimento

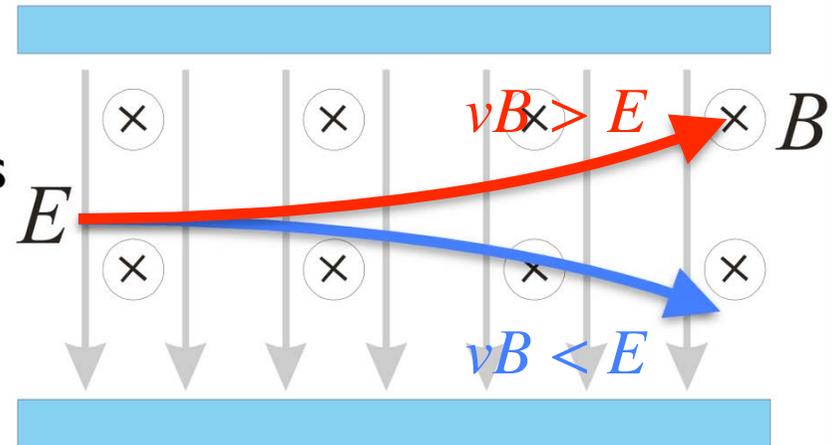
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- Ou seja, no campo EM:

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

Objeto de estudo: o Filtro de Wien

- O filtro de Wien consiste de uma configuração de campo elétrico e magnético cruzados (perpendiculares) e perpendiculares à velocidade **inicial** da partícula incidente



$$\vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

$$\vec{B} = -B \hat{j}$$

$$\vec{E} = E \hat{k}$$

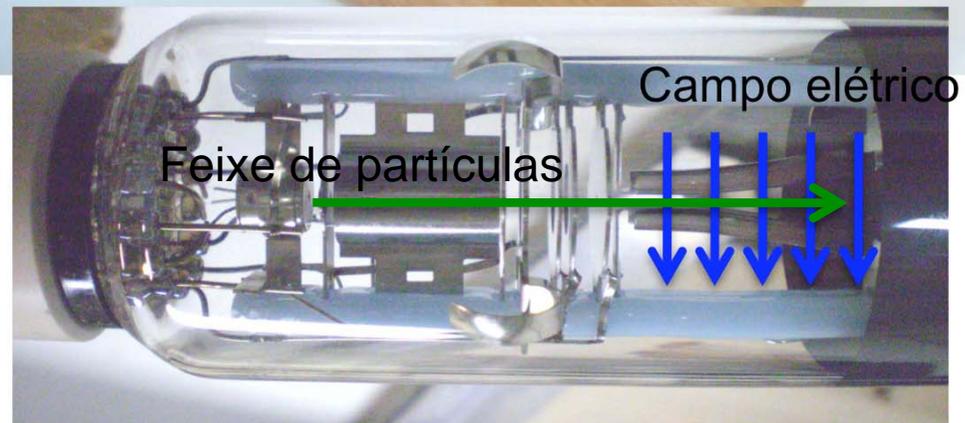
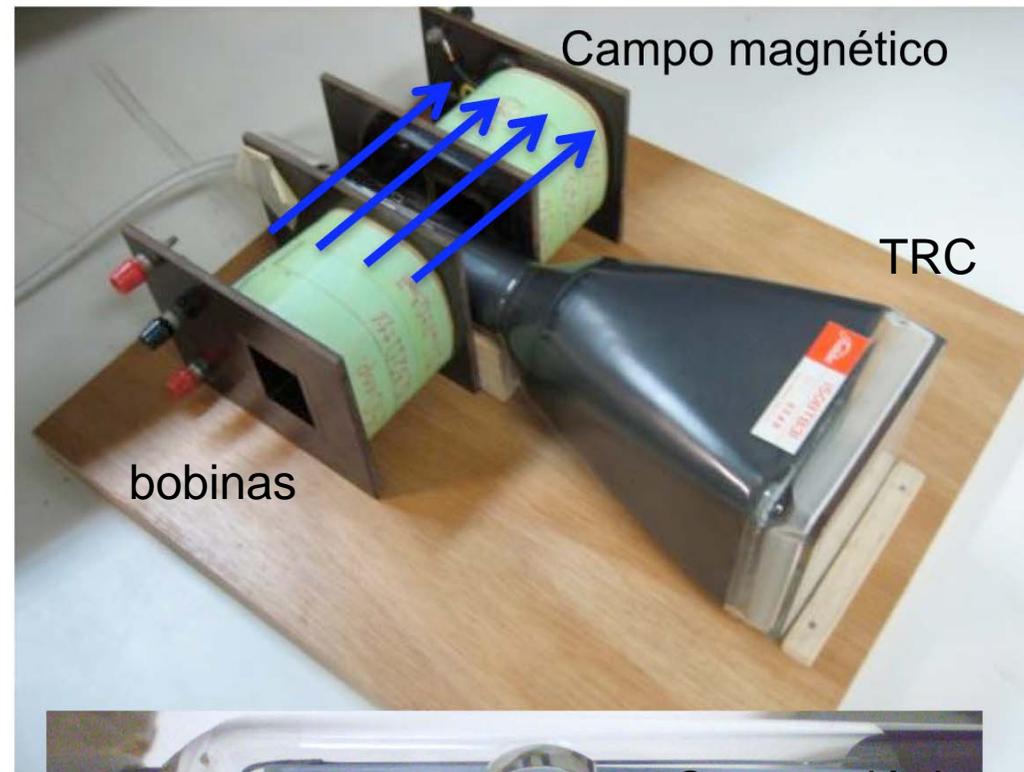
$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q (E - vB) \hat{k}$$

Aceleração apenas na direção k . Sentido depende das intensidades de E , v e B

Nosso acelerador de partículas

- TRC
 - Produz feixe de elétrons acelerados e propicia campo elétrico
 - Tela é o detector de partículas
- Bobinas
 - Campo magnético



Como estudar um problema complexo?

- O movimento de uma partícula no campo do filtro de Wien pode ser bastante complexo
 - Muitas forças envolvidas.
 - Movimento não é unidimensional
- Como tornar o problema mais simples?
 - Tentar isolar contribuições dos diferentes fenômenos. A compreensão individual de cada um dos fenômenos torna o entendimento do todo mais fácil.



Metodologia a ser adotada

- Isolar o campo elétrico
 - Como gerar o campo elétrico
 - Estudar o campo elétrico gerado
 - Do que depende o campo? Qual a intensidade em cada ponto do espaço e como a geometria do problema altera este campo?
- Entender como é o movimento de partículas dentro deste campo elétrico?
 - Como gerar estas partículas?
 - Podemos descrever o movimento destas partículas teoricamente? Quais os compromissos adotados e as limitações teóricas e experimentais?

Metodologia a ser adotada

- Isolar o campo magnético
 - Como gerar o campo magnético?
 - Como estudar este campo? Como medi-lo?
 - Do que depende este campo? Podemos entendê-lo teoricamente?
- Como é o movimento destas partículas dentro deste campo magnético?
 - Podemos descrever este movimento teoricamente? Como fazer um experimento para testar as hipóteses teóricas?
 - Quais as limitações e aproximações adotadas

Metodologia a ser adotada

- Após entender cada fenômeno separadamente fica mais fácil entender o problema completo
 - Ligar, simultaneamente, os campos elétrico e magnético
 - Como se dá o movimento das partículas neste campo?
 - Quais as grandezas que devemos observar para comparar com previsões teóricas
 - Do que depende as trajetórias envolvidas? Geometria? Intensidade dos campos? Energia da partícula incidente?
 - Quais as limitações teóricas e experimentais?
 - Após entender o filtro de Wien, como utilizá-lo em aplicações práticas?

Metodologia a ser adotada

- Resumo do experimento
 - **Aula 1** - Entender o campo elétrico. Medir o campo elétrico gerado. Quão próximo está o experimento de uma situação de campo ideal (uniforme)
 - **Aula 2** - Entender a geração das partículas (elétrons) e como elas se movimentam no campo elétrico estudado na aula anterior? QField
 - **Aula 3** - Entender a geração do campo magnético. Como medi-lo e como compará-lo com previsões teóricas?
 - **Aula 4** - Movimento dos elétrons no campo magnético gerado. Qfield.
 - **Aula 5 e 6** - Ligando o campo elétrico e magnético. Estudar o movimento das partículas no campo EM. Determinar comportamentos gerais do filtro de Wien. Caracterização deste filtro. Comparação com simulações.

Medindo campos elétricos

- Força conservativa → Potencial

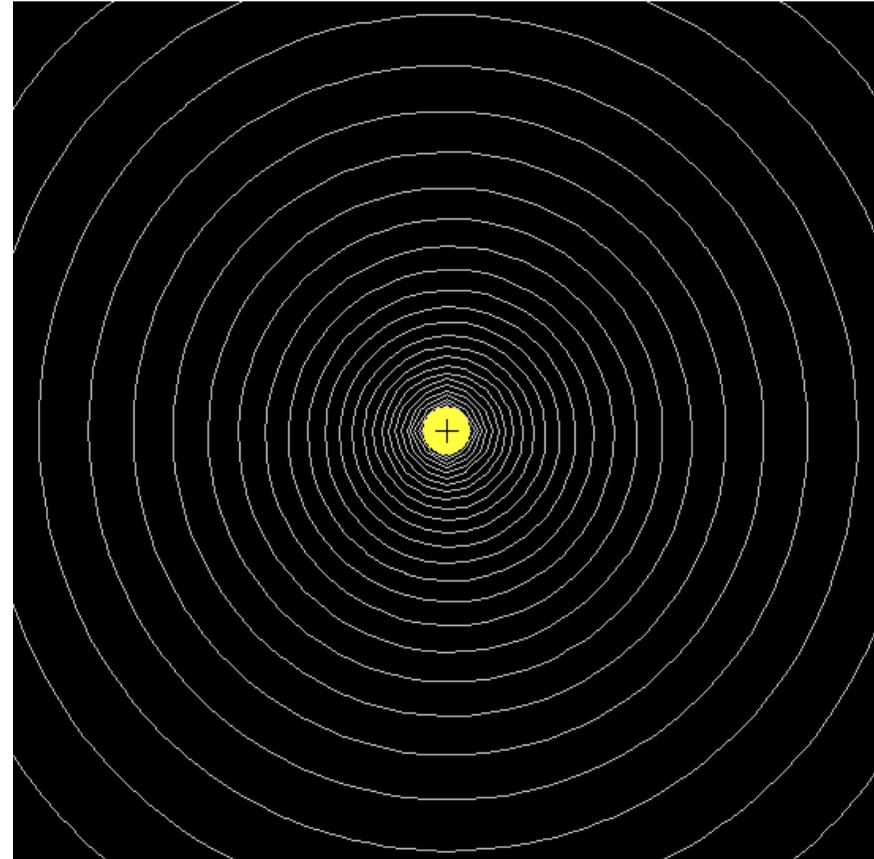
$$\vec{E} = -\nabla V$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$$

- Conhecendo-se a distribuição espacial do potencial pode-se calcular o campo facilmente.
 - Potencial eu sei medir...

Conceito importante: Superfícies (3D) ou linhas (2D) equipotenciais

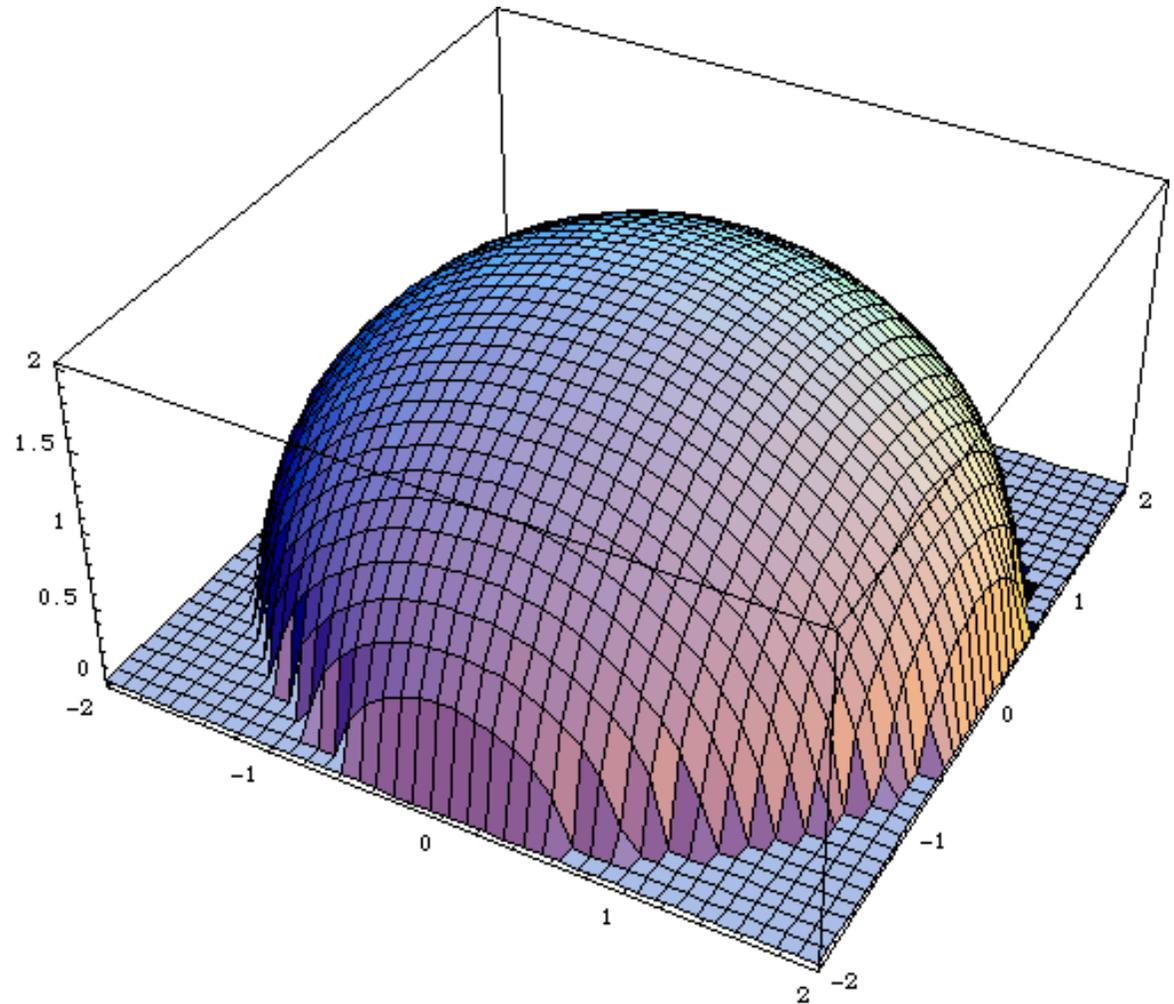
- São aquelas superfícies onde o potencial é constante, qualquer que seja o ponto desta superfície.



Campo elétrico a partir do conhecimento das equipotenciais

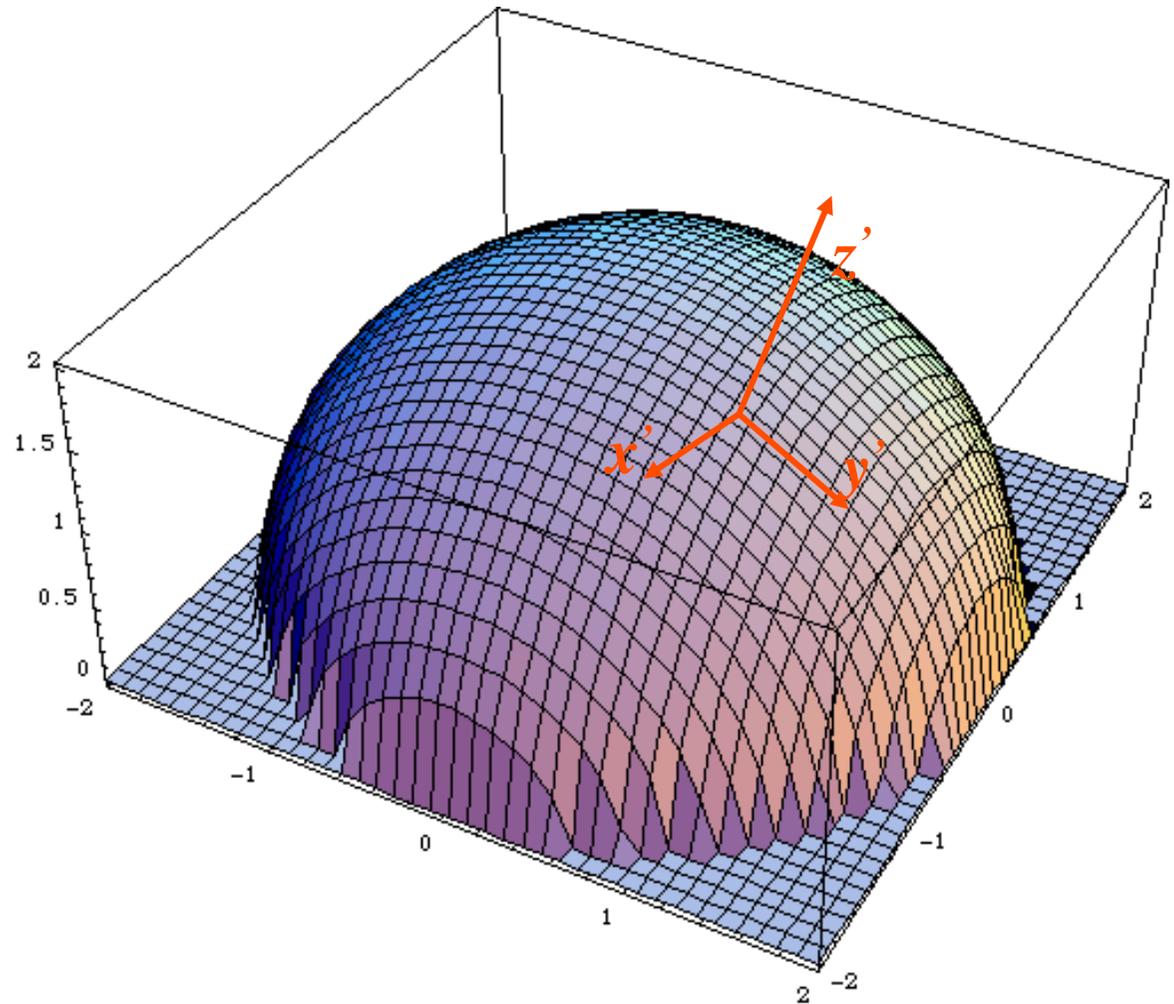
- Seja uma superfície equipotencial
 - Sabemos que:

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



Campo elétrico a partir do conhecimento das equipotenciais

- Fazemos um sistema de referência no qual um dos eixos (z') é normal à superfície



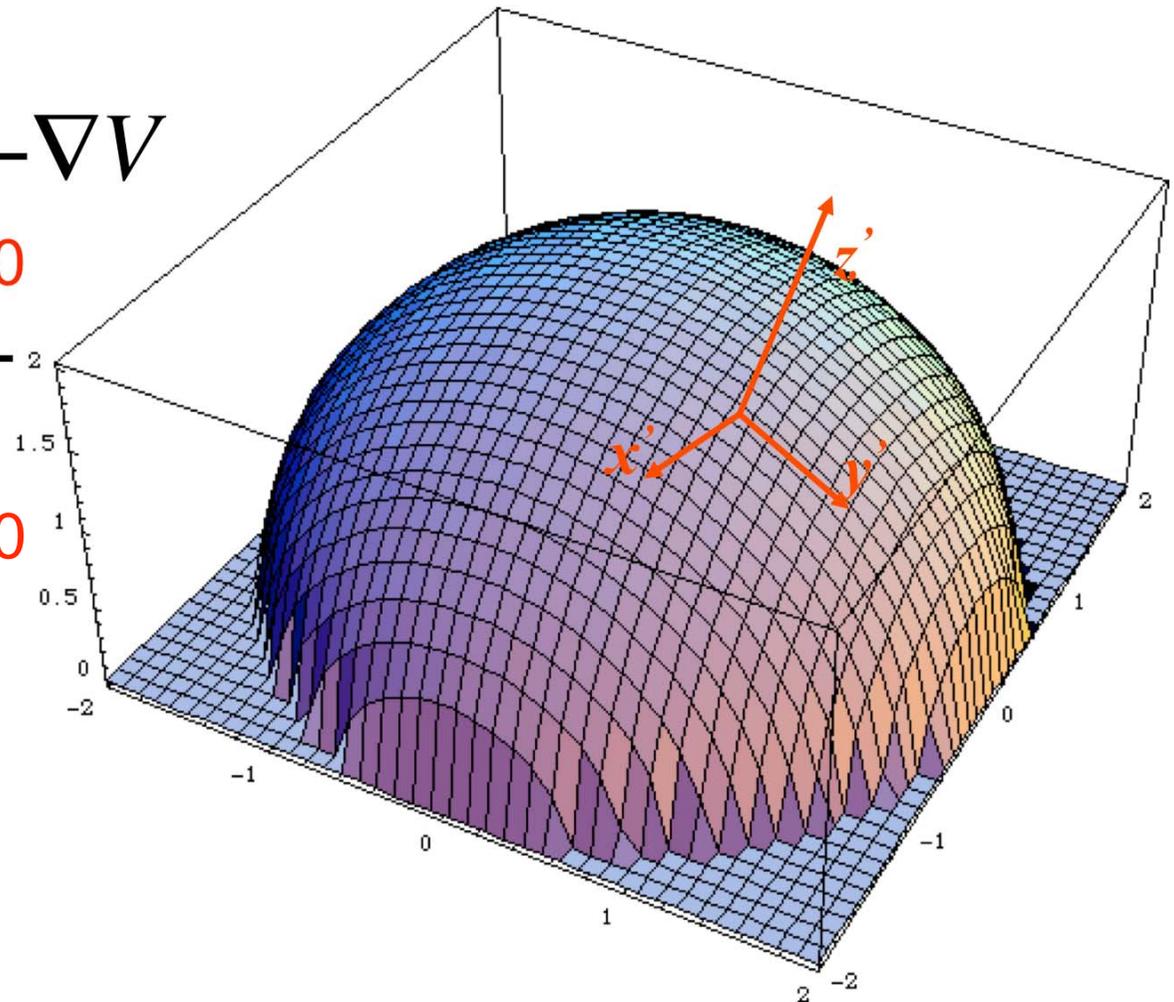
Campo elétrico a partir do conhecimento das equipotenciais

- Cálculo do campo $\vec{E} = -\nabla V$

$$\vec{E} = -\frac{\partial V}{\partial x'} \hat{i}' - \frac{\partial V}{\partial y'} \hat{j}' - \frac{\partial V}{\partial z'} \hat{k}'$$

$$\frac{\partial V}{\partial x'} \hat{i}' - \frac{\partial V}{\partial y'} \hat{j}' - \frac{\partial V}{\partial z'} \hat{k}'$$

$$\frac{\partial V}{\partial z'} \hat{k}'$$

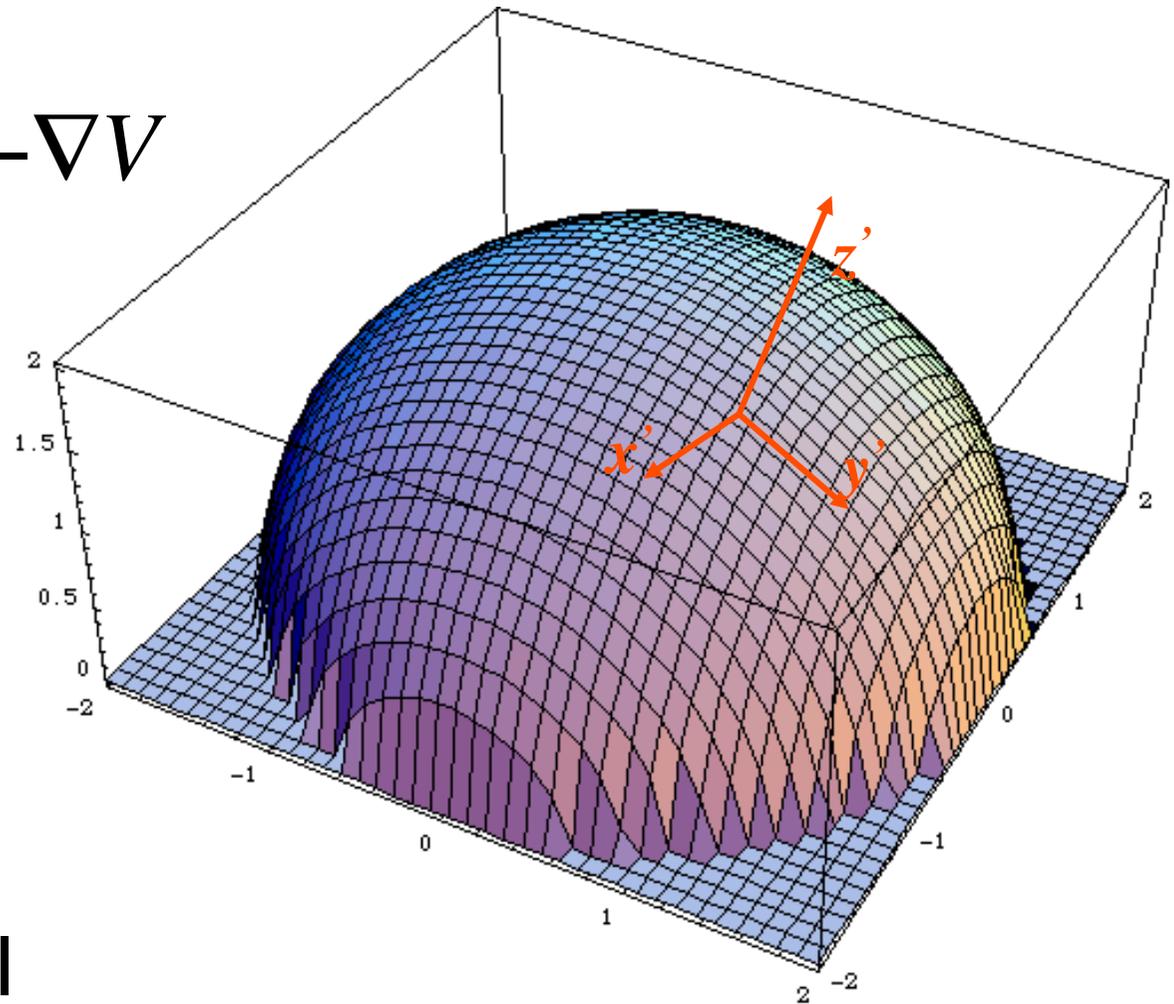


Campo elétrico a partir do conhecimento das equipotenciais

- Cálculo do campo $\vec{E} = -\nabla V$

$$\vec{E} = -\frac{\partial V}{\partial z'} \hat{k}'$$

- O campo elétrico é sempre normal à equipotencial

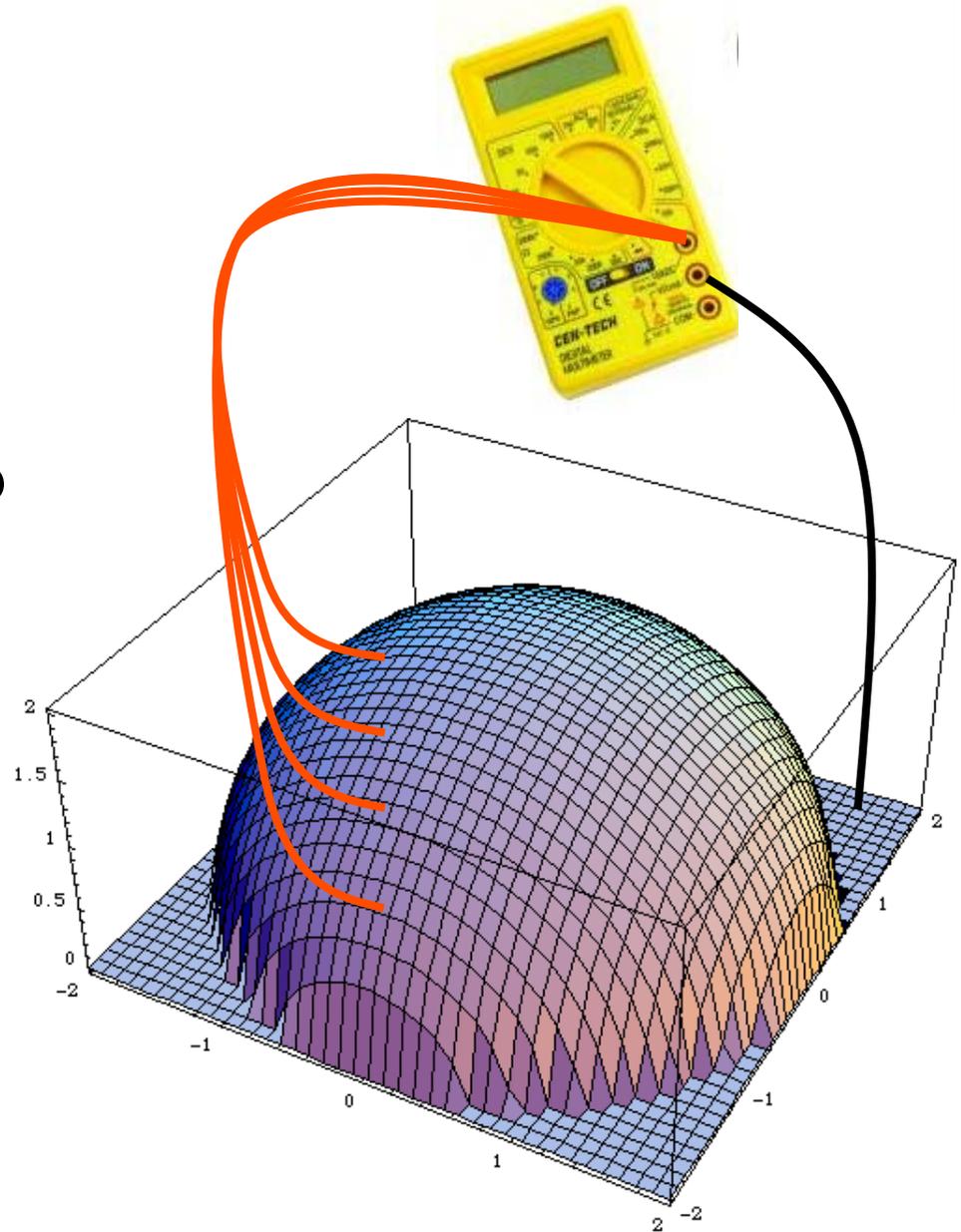


Então...

- Sabendo o potencial elétrico eu sei, facilmente, o campo elétrico e posso saber como partículas carregadas se movimentam neste campo
- Determinando o potencial
 - Analiticamente a partir do estudo teórico do problema e resolução das equações diferenciais
 - Computacionalmente, através de cálculos numéricos
 - Experimentalmente, a partir da medida das superfícies equipotenciais
 - VOLTÍMETRO!

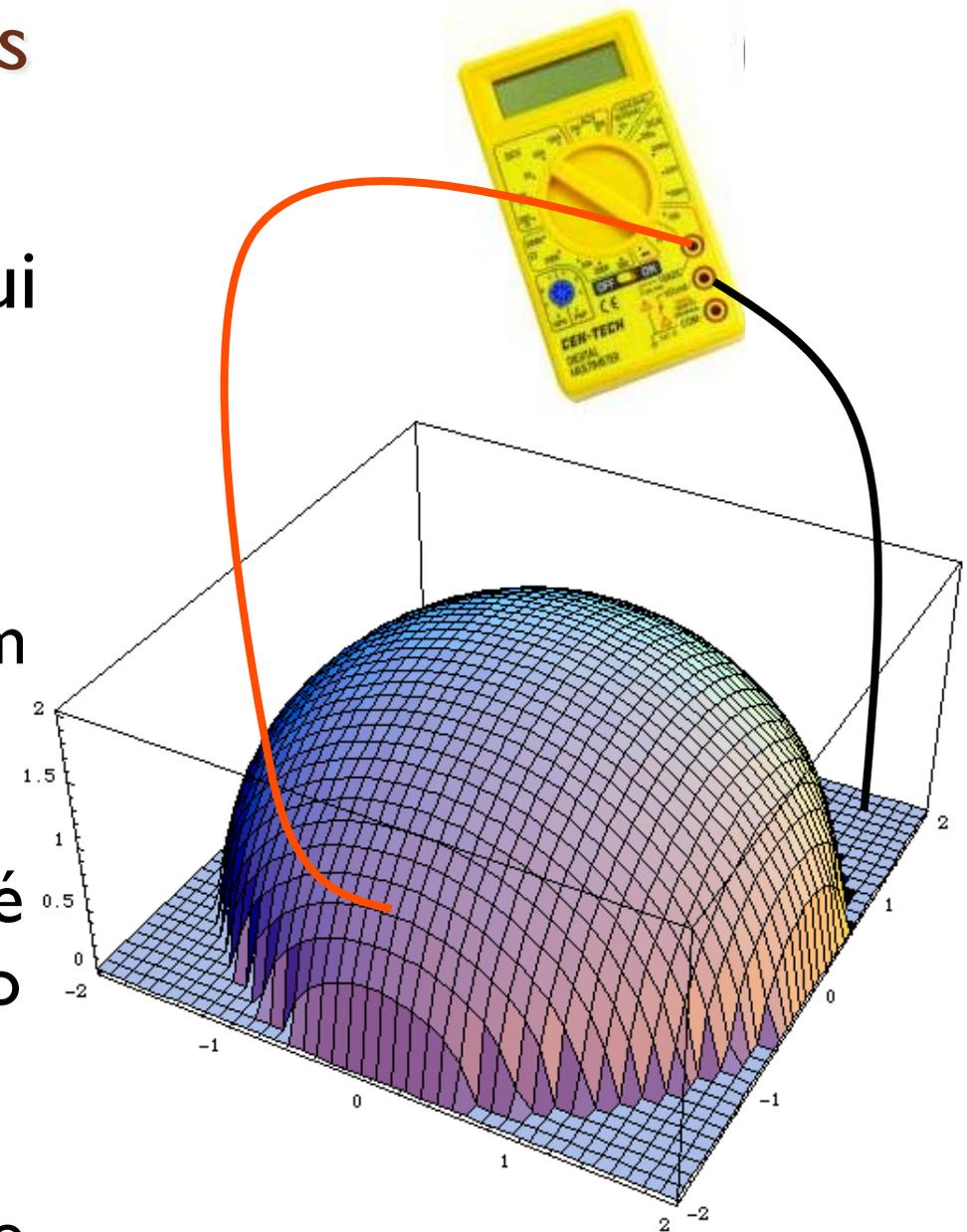
A técnica

- Medidas de diferença de potencial em função da posição espacial
 - A medida de tensão é feita em relação a uma referência
 - Esta referência, por definição possui $V = 0$



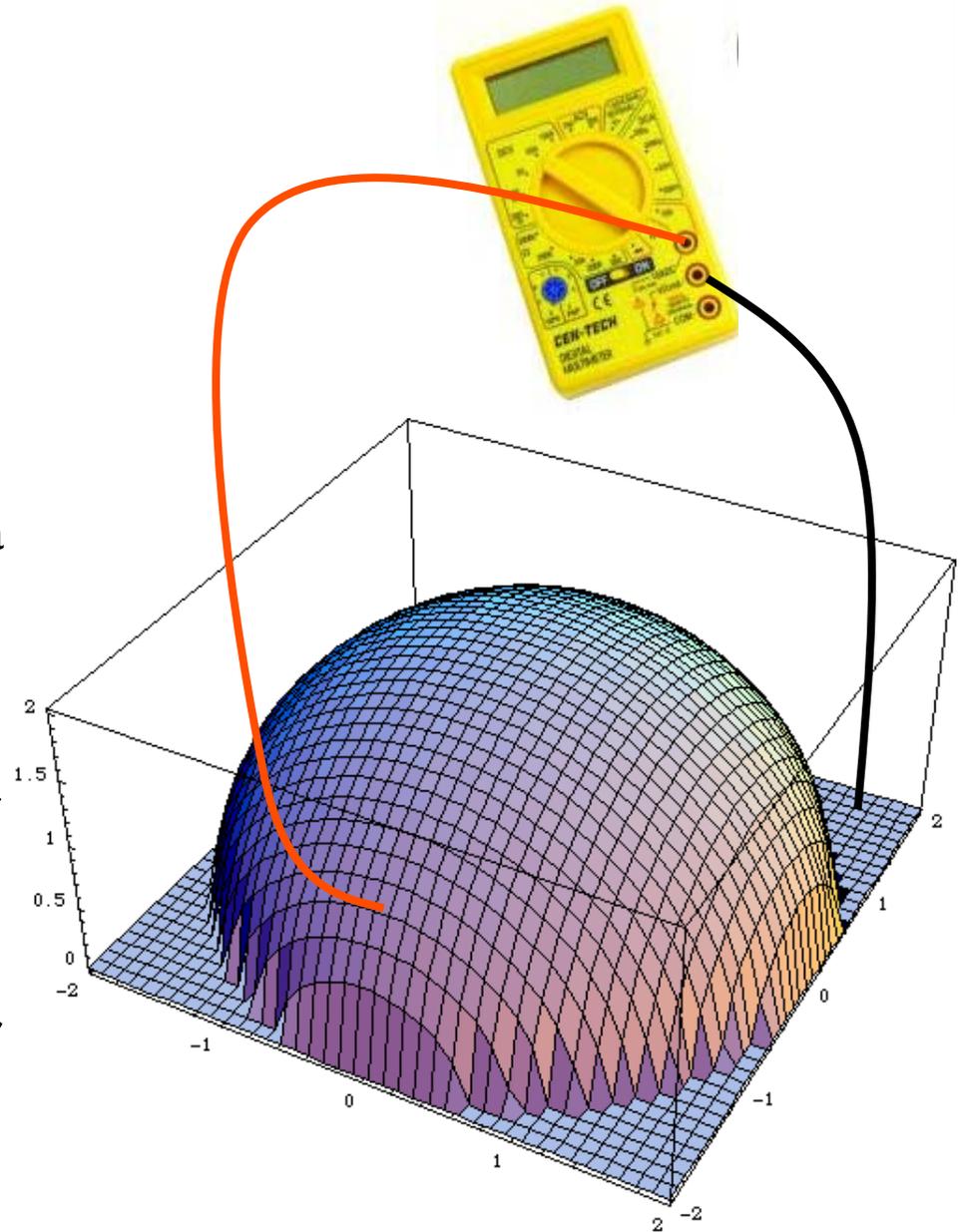
Eu posso medir estes potenciais no ar?

- O voltímetro possui resistência elétrica
 - Logo, caso a resistência do meio seja comparável com a do voltímetro ele altera a medida
 - A resistência do ar é muito elevada, muito maior que a do voltímetro
 - Não dá para medir no ar!



Solução:

- Utilizar um meio cuja resistência seja baixa se comparada a do voltímetro
 - Em geral uma solução aquosa
- Porém a condutividade deve ser baixa, se comparada a um condutor
- O meio tem que ser ôhmico para não distorcer os campos

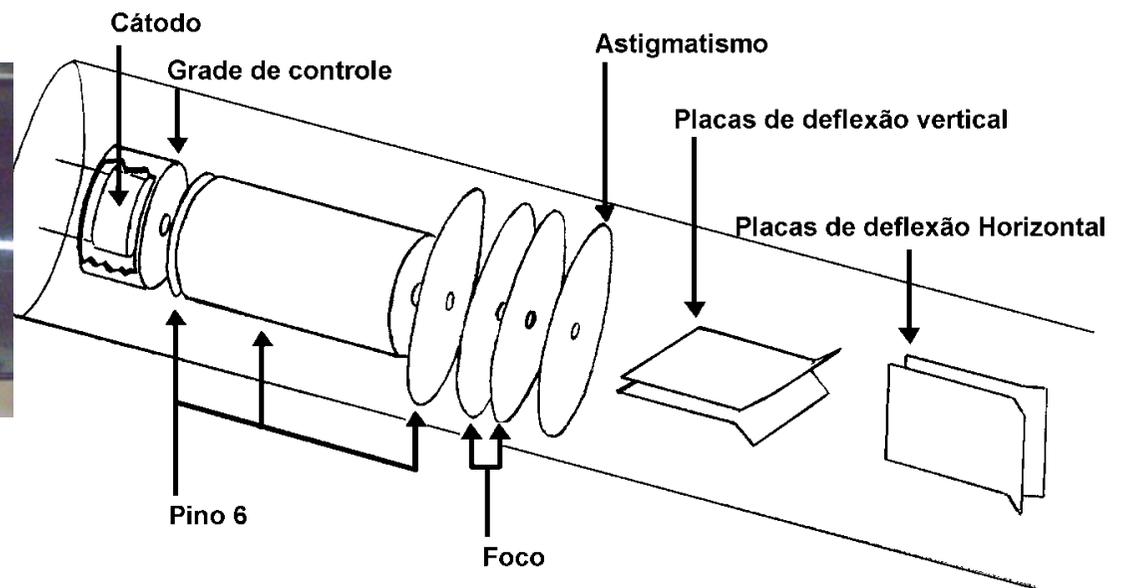
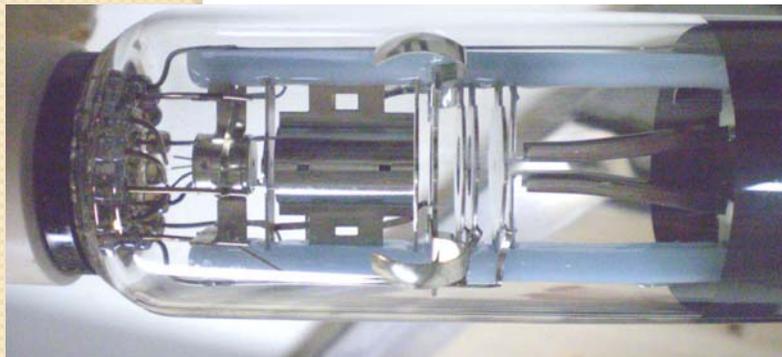


Objetivos desta semana

- Estudar o campo elétrico que será utilizado no estudo do movimento da partícula.
- Qual o campo utilizado?
 - Tubo de raios catódicos
 - Será utilizado para gerar as partículas estudadas
 - Será também utilizado para gerar o campo elétrico

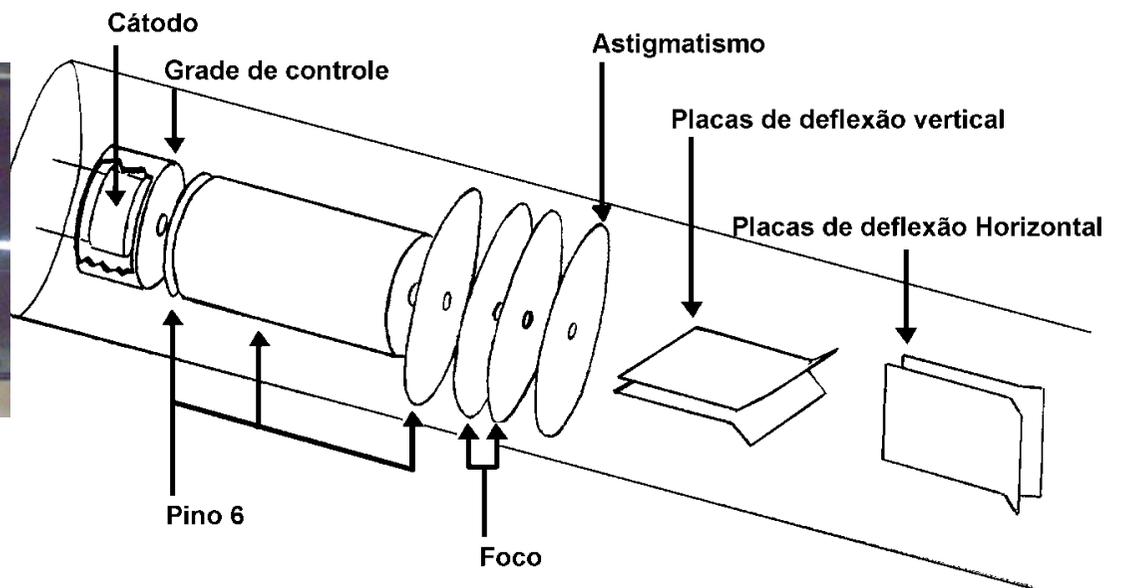
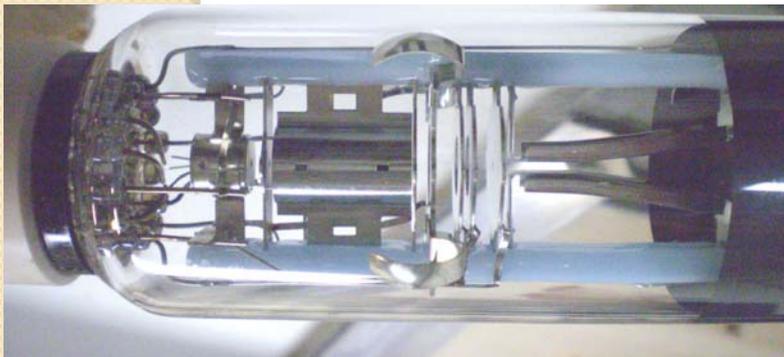
Tubo de raios catódicos

- Um tubo contendo vários eletrodos distintos e com geometrias específicas para controlar o movimento de elétrons no seu interior



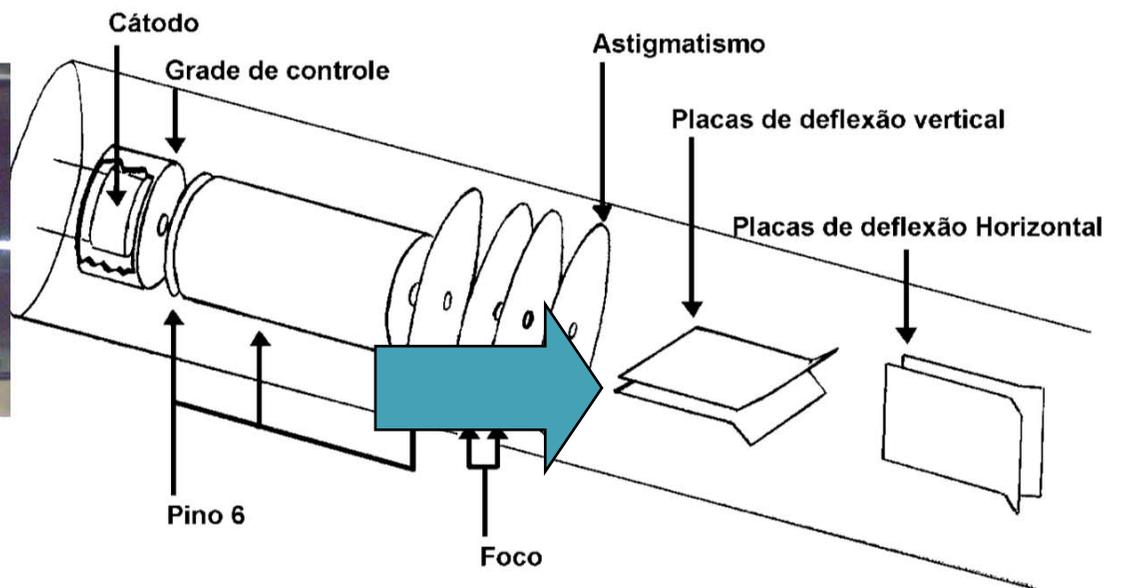
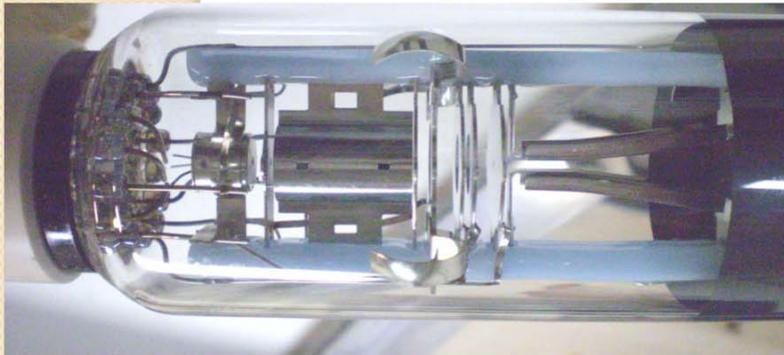
Tubo de raios catódicos

- 3 componentes básicas
 - Geração dos elétrons com uma certa velocidade
 - Focalização do feixe de elétrons
 - Direcionamento do feixe para uma posição na tela



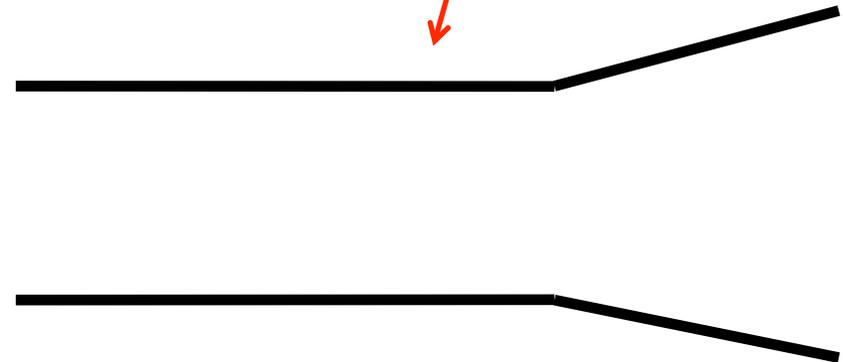
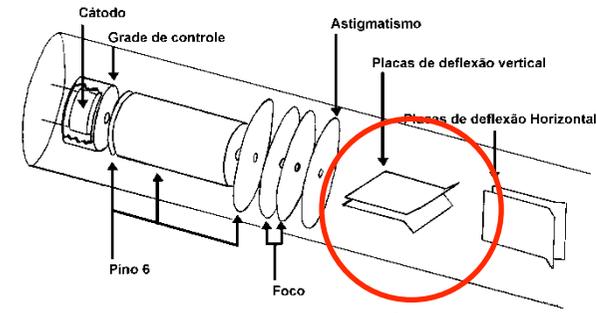
Tubo de raios catódicos

- Deflexão do feixe de elétrons
 - Sistema de placas paralelas
 - 2 conjuntos, x e y
 - Vamos usar somente um deles



Precisamos conhecer o campo entre as placas

- Como é o campo?
- É uniforme?
- Efeitos de borda?
- Quais são as superfícies equipotenciais?



Método experimental

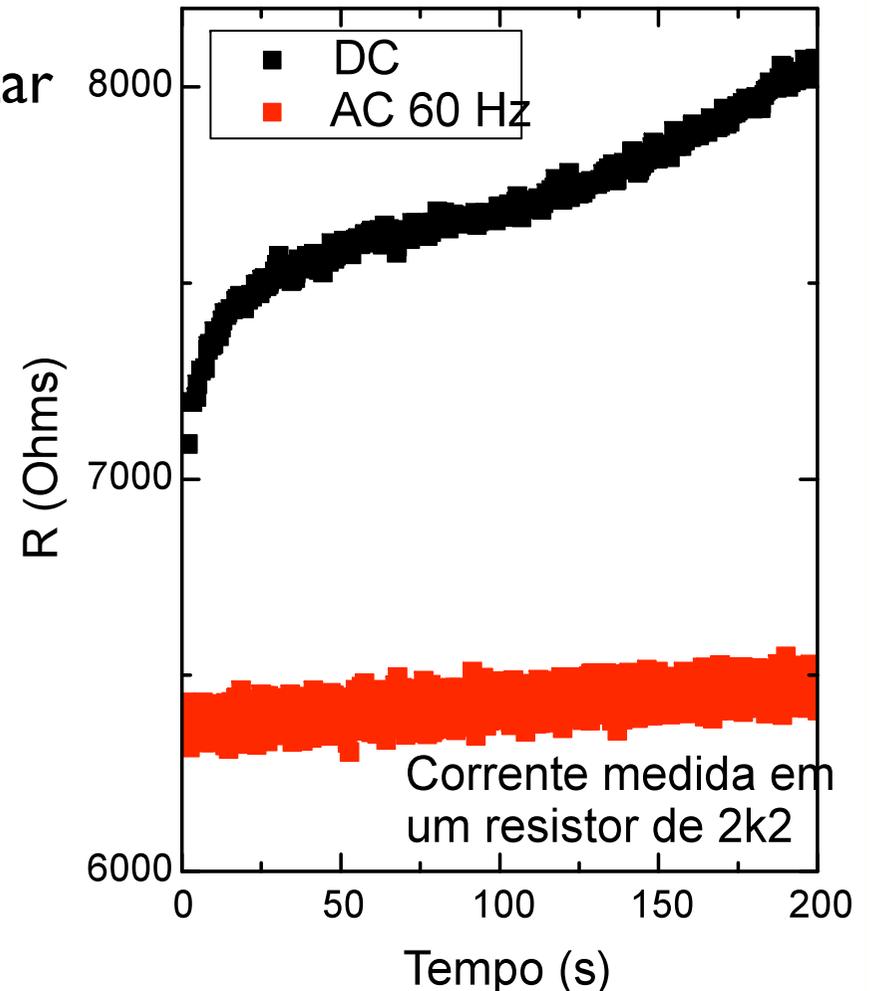
- Cuba eletrolítica
 - Solução aquosa
 - Coloca-se os eletrodos para simular a configuração de campos a ser mapeada
 - Estabelecer um ponto de referência, $V = 0$
 - Em geral utiliza-se um dos condutores
 - Mede-se o potencial em vários pontos.
 - Calcula-se o campo elétrico a partir do cálculo do gradiente do potencial



Problemas (antes de mapear)

- Polarização da água
 - Acumulo de íons → utilizar tensões alternadas
- A cuba é ôhmica?
 - Em AC, a água é razoavelmente ôhmica
- A resistência da cuba com solução aquosa é muito menor que a do voltímetro?
- E é muito maior que a dos condutores?

Resistência em função do tempo para $L = 5,1$ cm e $V = 5$ Volts



Primeiro passo: medir resistividade da água em corrente contínua

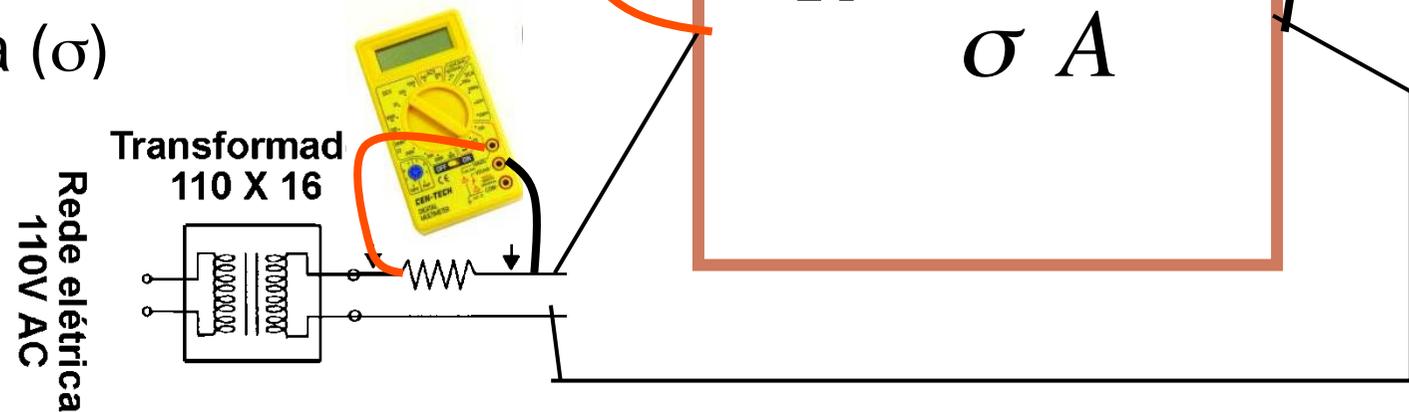
- Usar placas laterais da cuba como eletrodo
 - Cuba com água.
- Usar um Ohmímetro conectado a estas placas
- Observar se a resistência da água medida muda com o tempo e qual o intervalo de medidas



Cuidado com a escolha das paredes utilizadas. Duas estão em curto e duas estão isoladas. Qual utilizar?

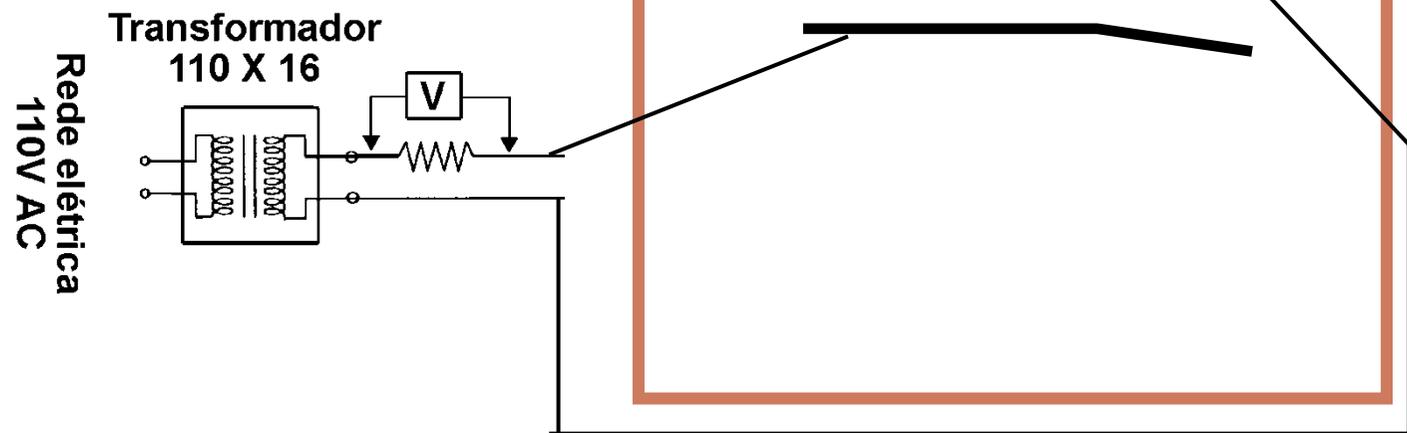
Segundo passo: medir resistividade da água em corrente alternada

- Medir tensão entre as placas
- Medir a corrente usando um resistor de proteção
 - Aprox. $1k\Omega$
- Calcular a resistência da água na cuba
 - Ela varia muito no tempo?
- Obter resistividade da água (σ)



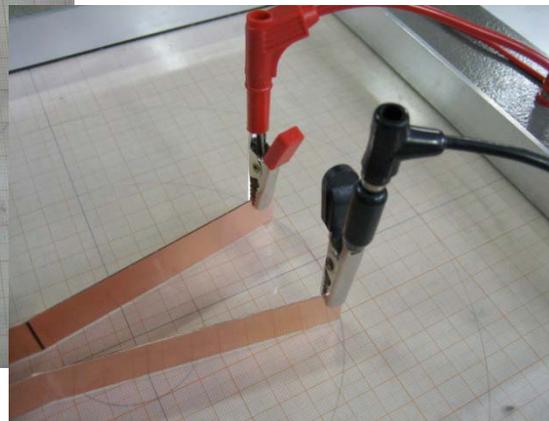
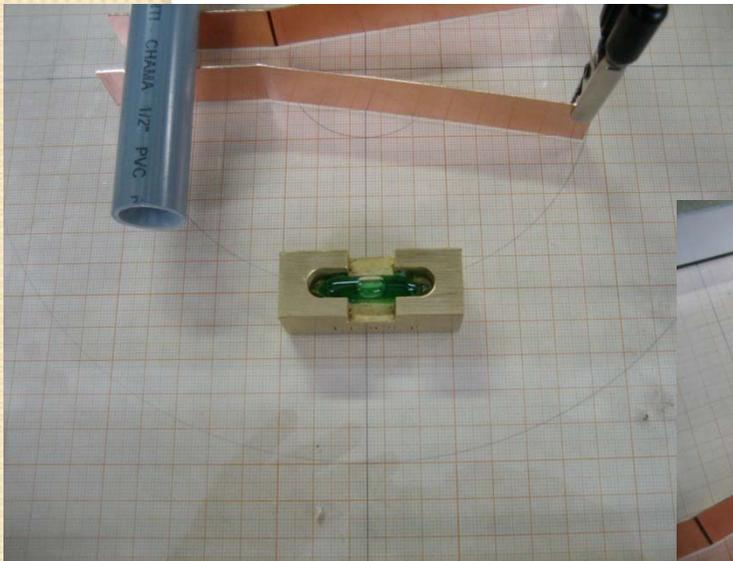
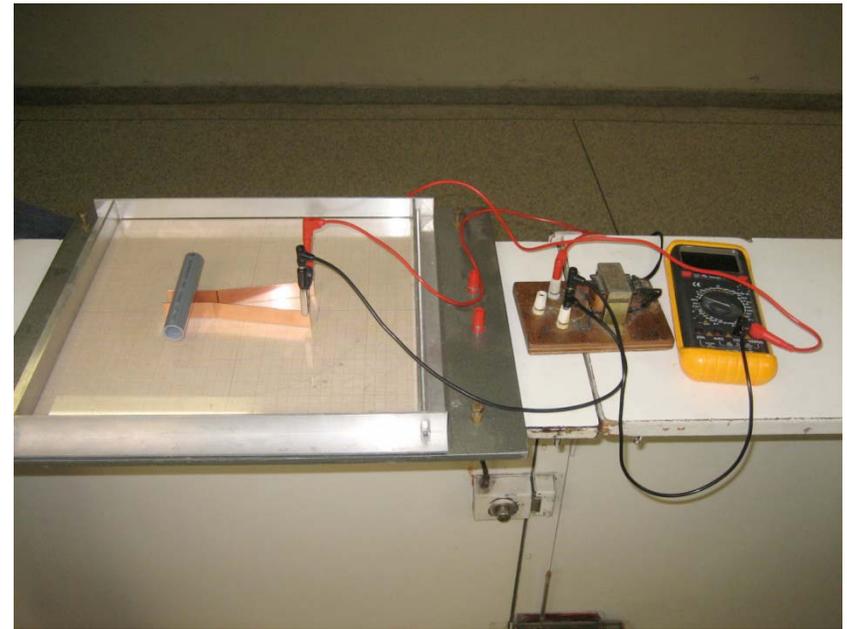
Terceiro passo: mapear campos

- Montar o circuito abaixo
 - Usar 1 cm de espaçamento entre as placas



Medidas experimentais: Montagem

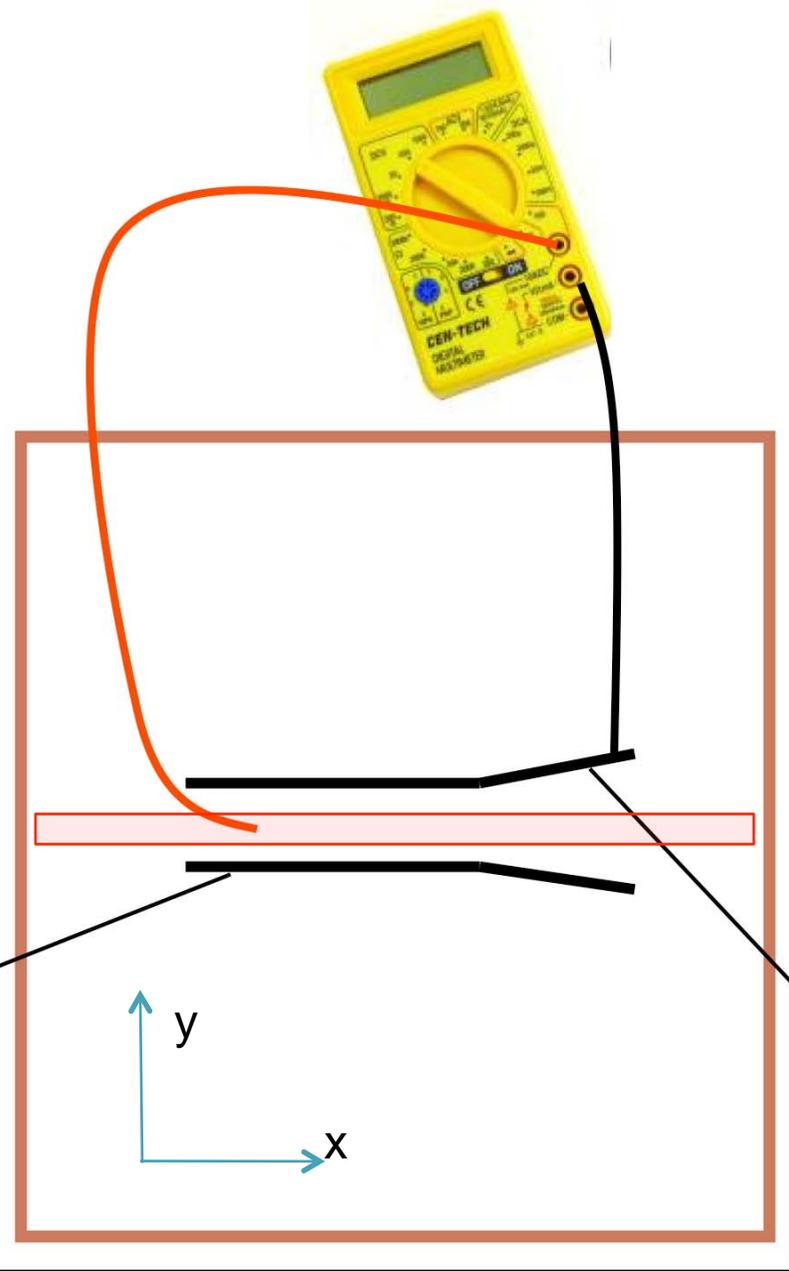
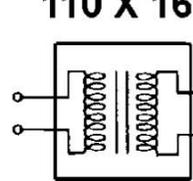
- Cuidados
 - No máximo 1 cm de altura de água
 - Nivelar a cuba
 - Lustrar os eletrodos!



Medidas experimentais: Mapeamento do campo

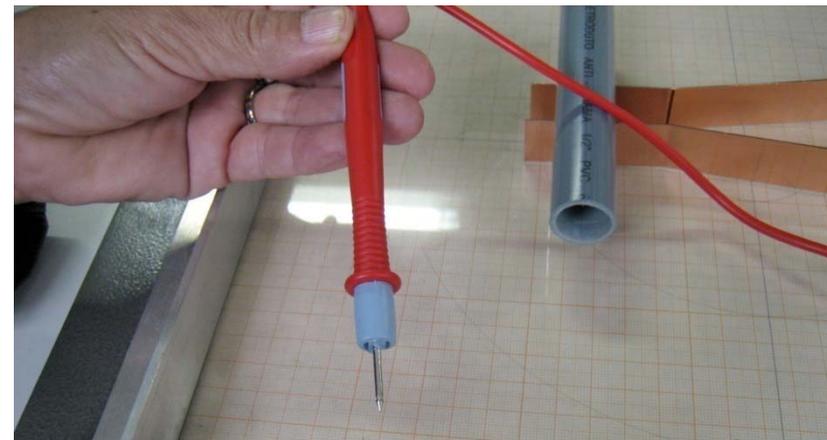
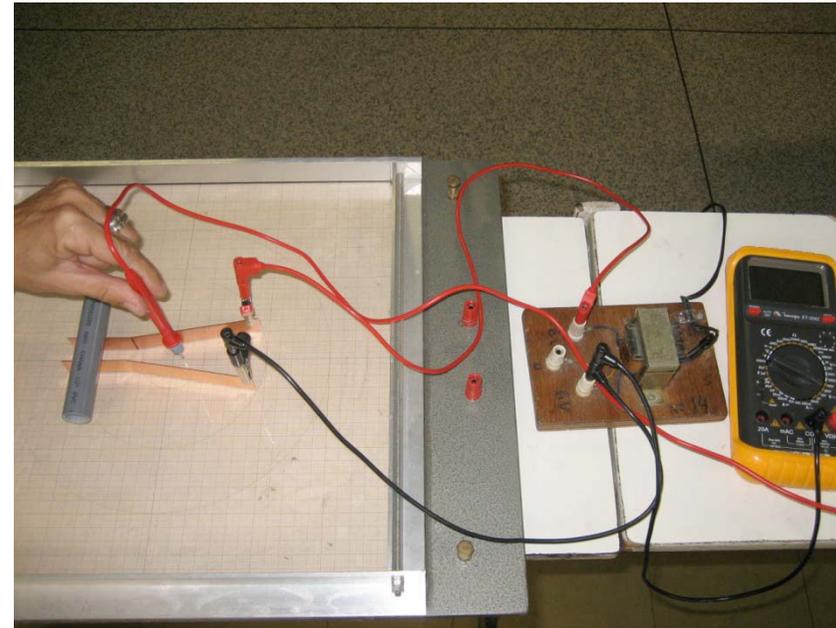
- Medir o potencial, nesta região, 0,25 cm acima e 0,25 cm abaixo da linha de simetria
 - $E_x \sim \Delta V_x / \Delta X$
 - $E_y \sim \Delta V_y / \Delta Y$

Transformador
110 X 16
Rede elétrica
110V AC



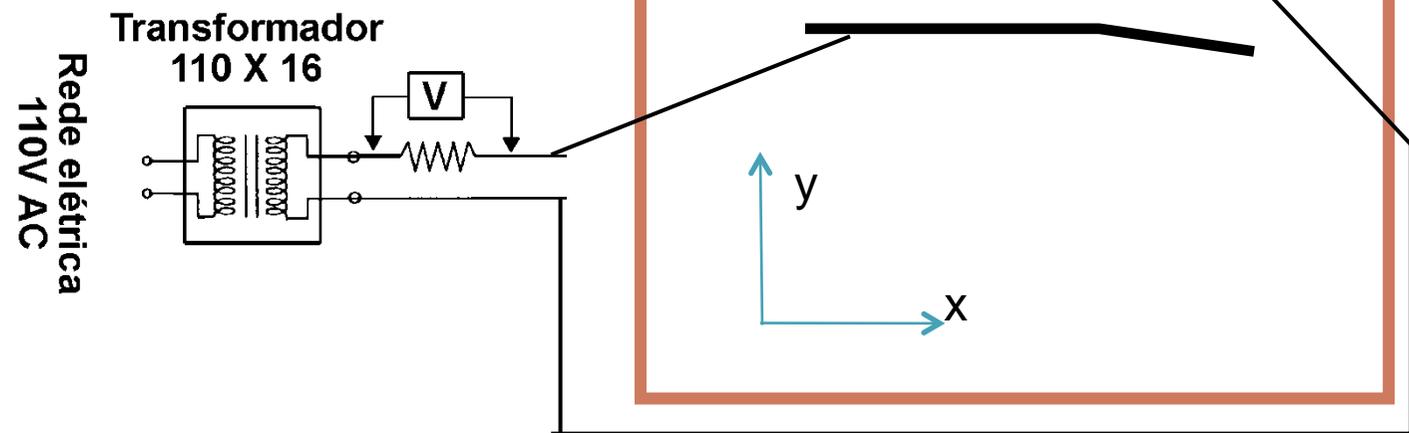
Medidas experimentais: fazendo medidas

- Utilizar o voltímetro
 - Perpendicular à cuba
 - Incerteza em posição
 - Usar o arame enrolado na ponta de prova para aumentar a precisão



Medidas experimentais: Equipotenciais

- Medir **pelo menos uma** equipotencial.
 - Medir pares (x,y) mantendo V constante



Atividades a serem entregues

- Resistividade da água em AC e DC
 - Como varia a resistência da água em DC? E em AC? Como ela se compara à resistência interna do voltímetro?
 - Qual a resistividade da água em AC? Como ela se compara à do cobre?
- Gráfico de campo em função da posição x decomposto nas componentes E_x e E_y .
 - Indicar no gráfico onde começa e termina os eletrodos.
 - Gráfico de E_x em função de x ao longo do centro entre as duas placas
 - Gráfico de E_y em função de x ao longo do centro entre as duas placas
- Gráfico bi-dimensional das equipotenciais
 - Lembrar de desenhar os eletrodos
- Discutir os resultados obtidos