

# Circuitos

Notas de aula: [www.fap.if.usp.br/~hbarbosa](http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa)

LabFlex: [www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

Profa. Eloisa Szanto  
[eloisa@dfn.if.usp.br](mailto:eloisa@dfn.if.usp.br)  
Ramal: 7111  
Pelletron

Prof. Henrique  
Barbosa  
[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)  
Ramal: 6647  
Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin  
[nelson.carlin@dfn.if.usp.br](mailto:nelson.carlin@dfn.if.usp.br)  
Ramal: 6820  
Pelletron

Prof. Paulo Artaxo  
[artaxo@if.usp.br](mailto:artaxo@if.usp.br)  
Ramal: 7016  
Basílio, sala 101

## Física Exp. 3 Aula 1, Experiência 1

# Experiência 1: Circuitos

## 1. Circuitos de Corrente Contínua

- Como medir grandezas elétricas?
- Os instrumentos de medida influenciam no resultado de uma medida? Como escolher o instrumento certo?

## 2. Pilha e Lâmpada

- Como varia a tensão de uma pilha ou em uma lâmpada em função da corrente? Curvas características, força eletromotriz e resistência interna

## 3. Capacitores

- Como é o campo elétrico de um capacitor real de placas paralelas? Simulações, medidas e teoria.

# Alguns Conceitos Importantes

Vamos precisar rever uma série de conceitos que vocês já aprenderam no 2º grau e que devem estar vendo com detalhes em Física 3.

- Potencial elétrico
- Corrente elétrica
- Energia e potência
- Resistência elétrica
  - Lei de Ohm
- Medindo tensões, correntes e resistências.

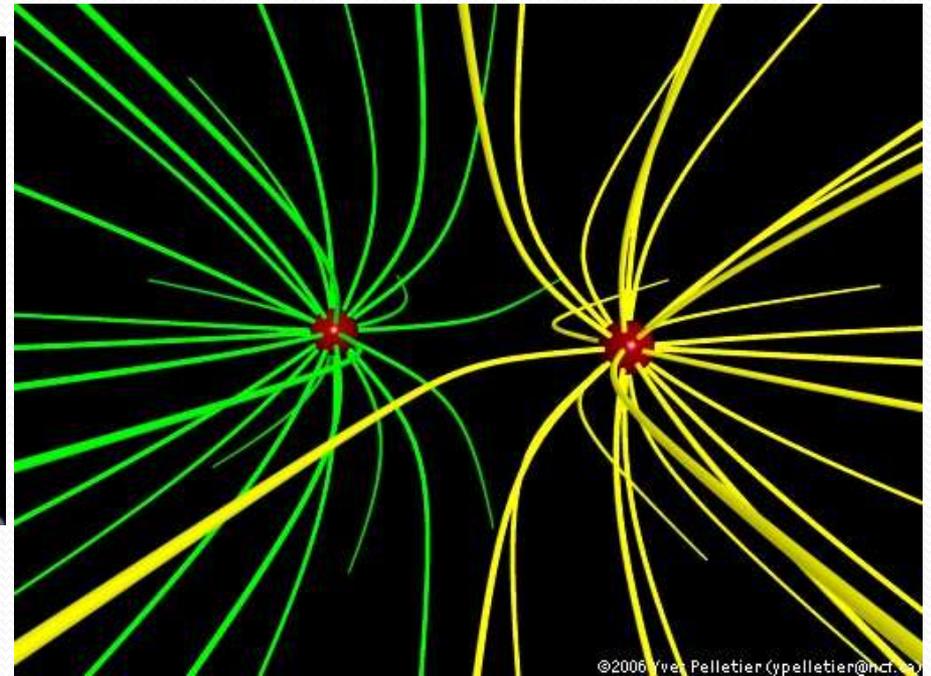
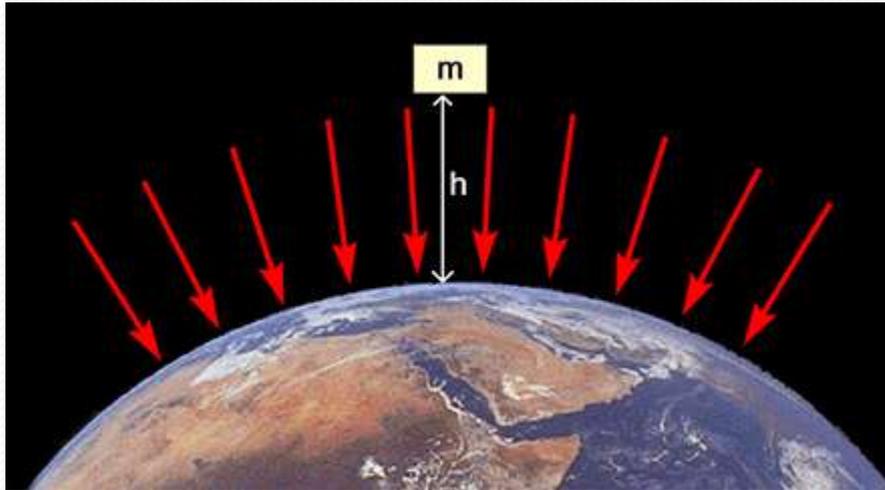
# Carga Elétrica

- Carga elétrica
  - dois tipos de carga, positiva e negativa . Objetos carregados interagem exercendo forças uns sobre os outros: dada pela Lei de Coulomb.
- A unidade (SI) é o coulomb (C), pela lei de Coulomb, duas cargas elétricas pontuais de 1 coulomb separadas de um metro exercem uma sobre a outra uma força de  $9 \times 10^9$  N, isto é, aproximadamente o peso de 9 000 000 toneladas. Então o Coulomb é uma unidade muito grande!!
  - Carga fundamental: e
    - e=carga do elétron =  $1,60217653(14) \times 10^{-19}$  C.

A unidade de carga foi definida a partir do ampère:  
*1 coulomb é a quantidade de carga elétrica carregada pela corrente de 1 ampère durante 1 segundo.*

# Campo elétrico

- Campo elétrico é o campo de força provocado por cargas elétricas.
  - Como o campo gravitacional que é provocado por massas, o elétrico é um campo de forças provocado por cargas.
  - Portanto o campo é a força elétrica dividida pela carga.



# Campo e Força

- A força elétrica entre duas cargas:

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

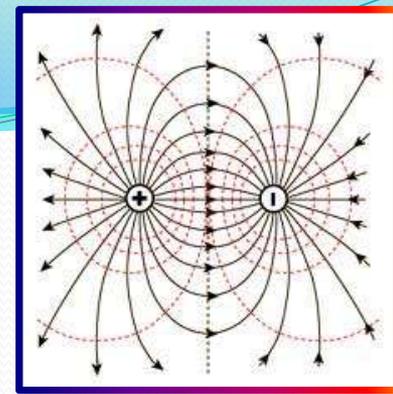
- A interação entre cargas elétricas pode ser descrita por intermédio de um campo (análogo ao campo gravitacional), que chamamos campo elétrico:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}(q)}{q} \quad \text{V/m (Volt por metro)}$$

- Se for um conjunto de cargas:

$$\vec{F}(q) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

# Potencial Elétrico

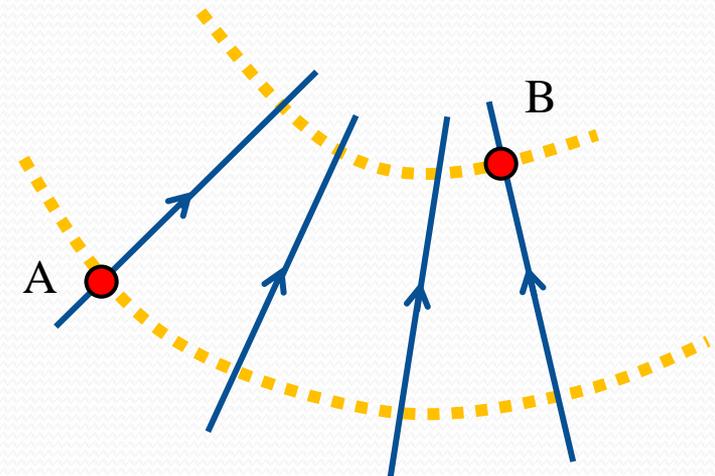


- Potencial elétrico
  - Potencial elétrico é uma propriedade do espaço onde existe um campo elétrico.
  - O potencial depende da carga que cria o campo e da posição relativa a essa carga, não depende da carga de prova.
  - Portanto, em uma região do espaço onde existe um campo elétrico todos os pontos possuem um potencial.
  - O potencial é a capacidade que um corpo carregado tem de realizar trabalho, ou seja, atrair ou repelir outras cargas elétricas.

# Diferença de potencial elétrico

- **Tensão ou diferença de potencial**

- para mover uma carga de prova,  $q$  positiva, de um ponto com potencial  $V_a$  para outro com potencial maior  $V_b$ , é necessário realizar um trabalho  $W$  sobre ela. Damos um nome para a quantidade de trabalho por unidade de carga, esse nome é **diferença de potencial**.
- Ou seja, a **ddp**, que é  $V_b - V_a$ , é igual ao trabalho realizado sobre uma unidade de carga.
- Dizemos que o potencial em um ponto **A** (representamos por  $V_a$ ) é equivalente ao trabalho elétrico (por unidade de carga) realizado para trazer uma carga de prova  $q$  do **infinito** até o ponto **A**.
  - Que é igual ao trabalho (por unidade de carga) para levar a carga de prova  $q$  desde o ponto **A** até o **infinito**.
- A unidade de medida da diferença de potencial no SI é o volt. Apenas diferenças de potencial elétrico possuem significado físico.



# Potencial

- A força elétrica é **conservativa**, isto é, o trabalho realizado por ela, sobre uma carga, depende das posições inicial e final da carga mas não do caminho entre elas. Assim sendo, podemos associar a ela uma **energia potencial**:

$$U = \int_{P_0}^{P_1} \vec{F} \cdot d\vec{l} + U(P_0)$$

- E definimos o **potencial eletrostático** (análogo ao potencial gravitacional) como a energia potencial de uma carga dividida pela carga:

$$V(P) = \frac{U}{q} = - \int_{P_0}^P \frac{\vec{F}}{q} \cdot d\vec{l} + \frac{U(P_0)}{q} = - \int_{P_0}^P \vec{E} \cdot d\vec{l} + V(P_0)$$

# Campo elétrico e potencial

- Usando o que aprendemos de cálculo vetorial, podemos escrever o campo elétrico como o gradiente do potencial:

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

- O gradiente pode ser escrito nas coordenadas mais convenientes à simetria do problema que se quer resolver. Em coordenadas cartesianas:

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

- Unidade do potencial = volt
- Unidade do campo elétrico = volt/m

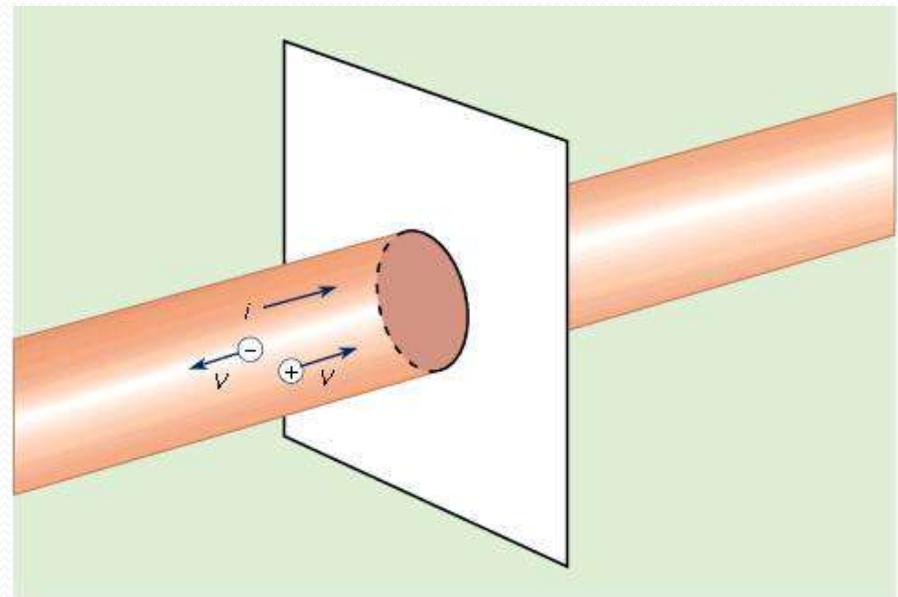
# Corrente

- Se uma carga sofre ação de uma força, então ela deve se movimentar!
- Define-se a corrente elétrica como sendo a quantidade de carga que atravessa uma secção transversal de um condutor por unidade de tempo:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

- Unidade:

Ampere:  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$



# Energia e Potência

- Sob a ação de uma força (aceleração), uma carga vai também **mudar sua velocidade** e, conseqüentemente, **mudar sua energia cinética!**
- Sejam dois corpos iguais que aumentam a sua velocidade de uma mesma quantidade, porém em intervalos de tempo diferentes.
  - Em um corpo a transferência de energia se deu mais rapidamente que no outro.
  - Ou seja, a potência aplicada foi diferente nos dois!

# Energia e Potência

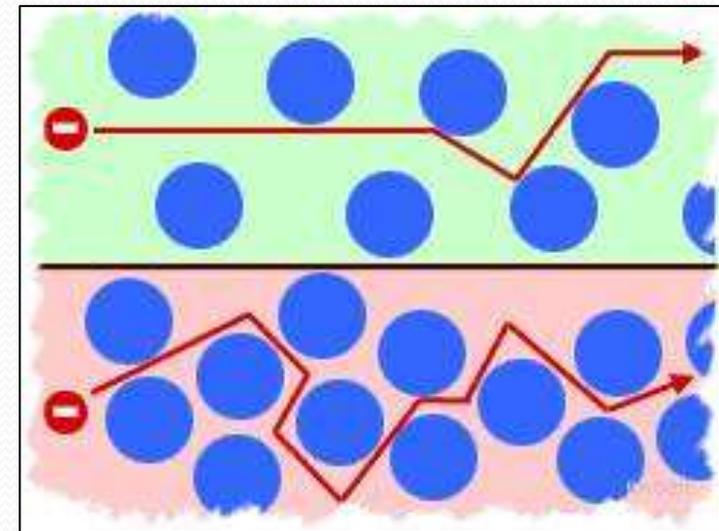
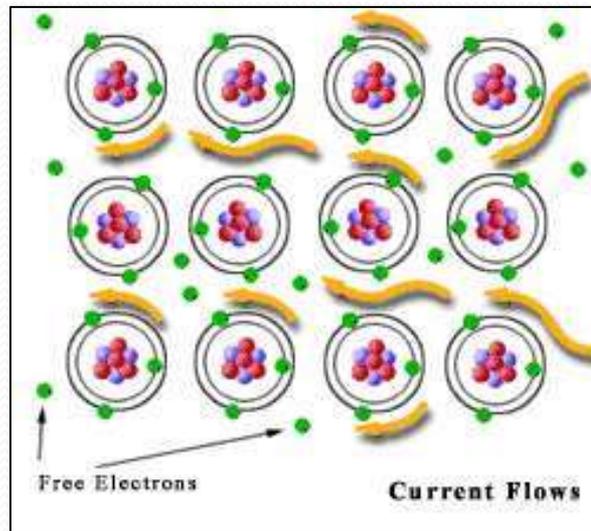
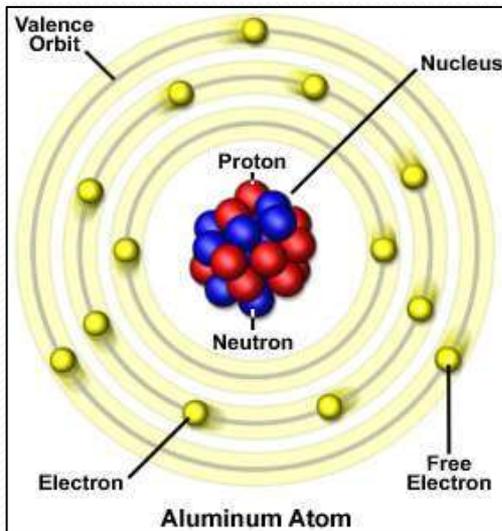
- Define-se potência como sendo a taxa de realização de trabalho, ou seja:

$$P = \frac{dW}{dt} = V \cdot i$$

- Dois casos distintos
  - Potência negativa → Fornecendo energia.
  - Potência positiva → Absorvendo energia.
- Unidade: Watt:  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$

# Resistência elétrica

- Corrente elétrica
  - Elétrons livres se movendo em um condutor
  - Interação com outros elétrons e átomos do material
    - Resistência à movimentação das cargas



<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/superconductivity101/fullarticle.html>

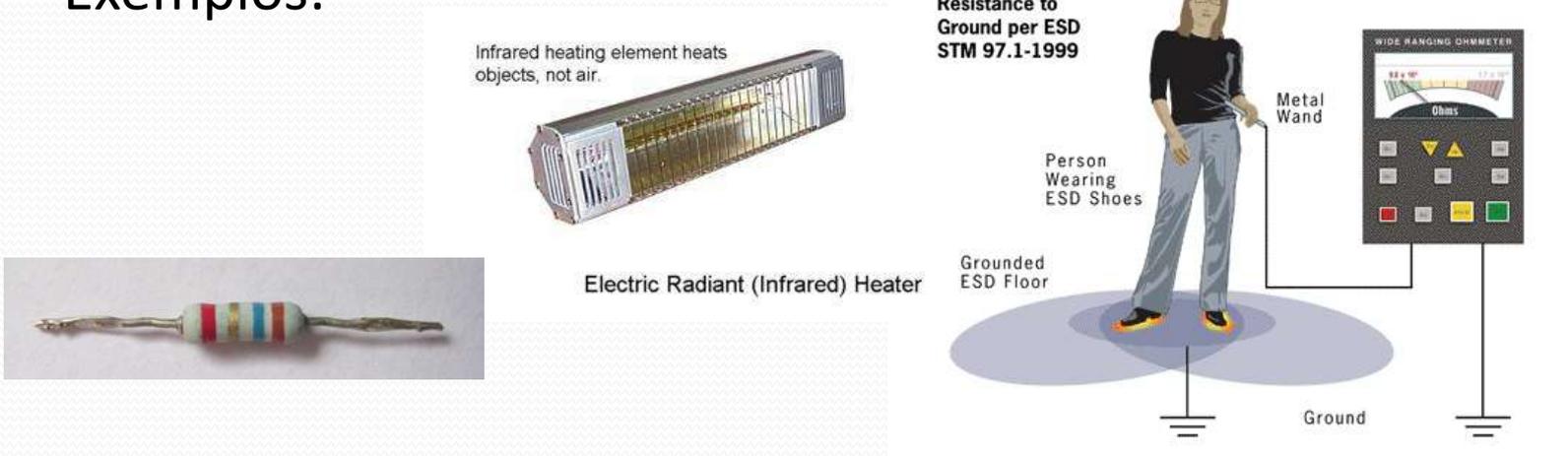
[http://www.powerworks.com.au/env\\_electricity01.asp](http://www.powerworks.com.au/env_electricity01.asp)

[http://www.physics4kids.com/files/elec\\_conduct.html](http://www.physics4kids.com/files/elec_conduct.html)

# Resistência elétrica

- **Resistência:** é a propriedade física que define a facilidade que um material oferece à passagem da corrente.

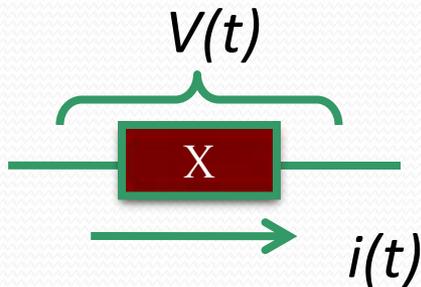
- Exemplos:



- Materiais bons condutores de corrente → resistência baixa
- Materiais maus condutores de corrente → resistência alta

# Resistência elétrica

- A resistência elétrica de um elemento resistivo X é a razão entre a voltagem e a corrente que passa por esse elemento:



$$R_X = \frac{V_X}{I_X}$$

- Essa é a definição geral de resistência elétrica, que vale para elementos resistivo:
  - **ôhmico (linear)**, caso em que a resistência é constante seja qual for o valor de  $V_x$  e de  $i_x$
  - **não ôhmico (não linear)**, que é o caso em que a resistência varia para valores diferentes de  $V_x$  e  $i_x$ .

# Lei de Ohm

- A lei de Ohm diz que:

$$V_X = Ri_X \quad \text{sendo} \quad R = cte$$

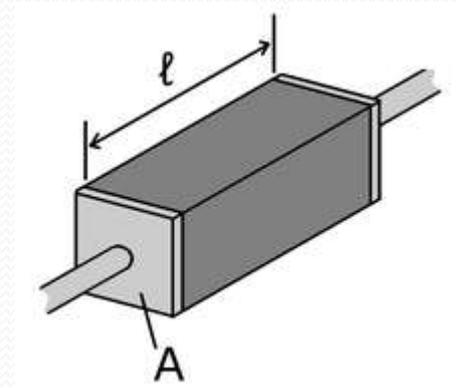
- Esta resistência não deve depender da tensão ou corrente no circuito utilizado, bem como de outras variáveis, como temperatura. Quando isso ocorre o elemento é dito ôhmico ou linear.
- Unidade de resistência
  - Ohm = volt/ampere
  - $\Omega = V / A$



Georg Simon Ohm (Erlangen  
1789 — Munique, 1854)

# Do que depende a resistência de um resistor ?

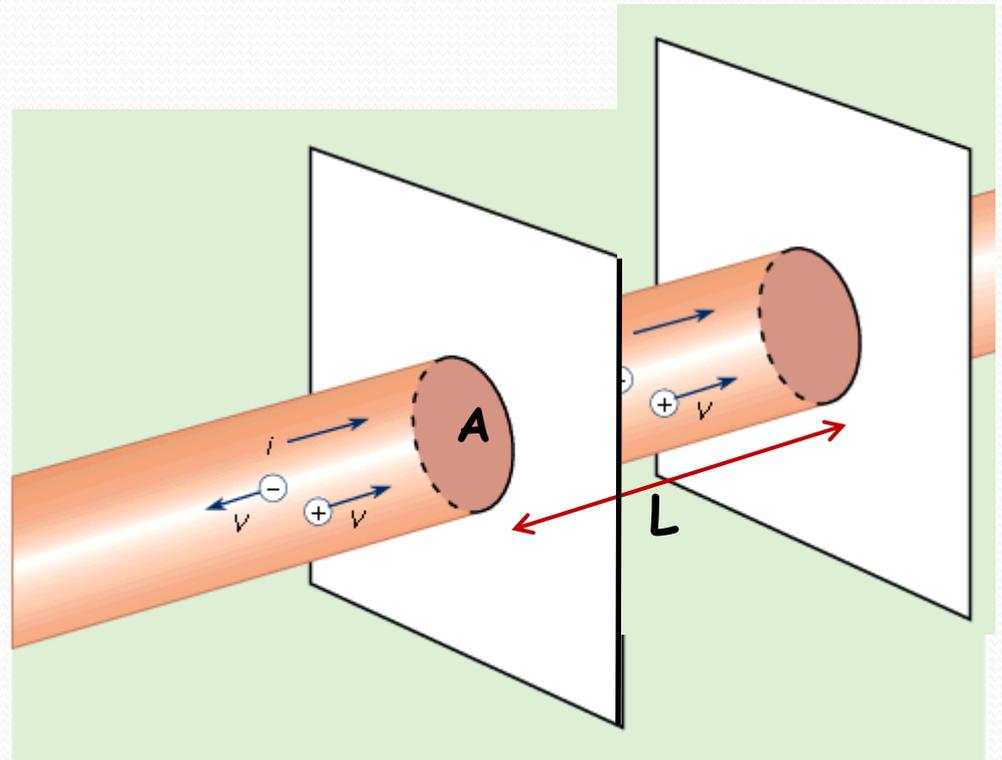
- De vários parâmetros:
  - Do material de que ele é feito
  - Da geometria da seção reta
  - Do comprimento que a corrente tem que atravessar
  - Da temperatura
  - Da luminosidade, etc
- Mas no caso dos resistores lineares, ou ôhmicos, a resistência só depende de :
  - Material de que ele é feito
  - Da área da seção reta
  - Do comprimento



# Resistividade elétrica

- Como a resistência depende do material?
  - A cada material está associada uma resistividade,  $\rho$ , que é a sua resistência por unidade de comprimento para uma seção reta uniforme:

$$\rho = \frac{R}{L} A$$



# Potência dissipada em um Resistor

- Em um resistor

$$R = \frac{V}{i}$$

- Deste modo, podemos calcular a potência absorvida como sendo:

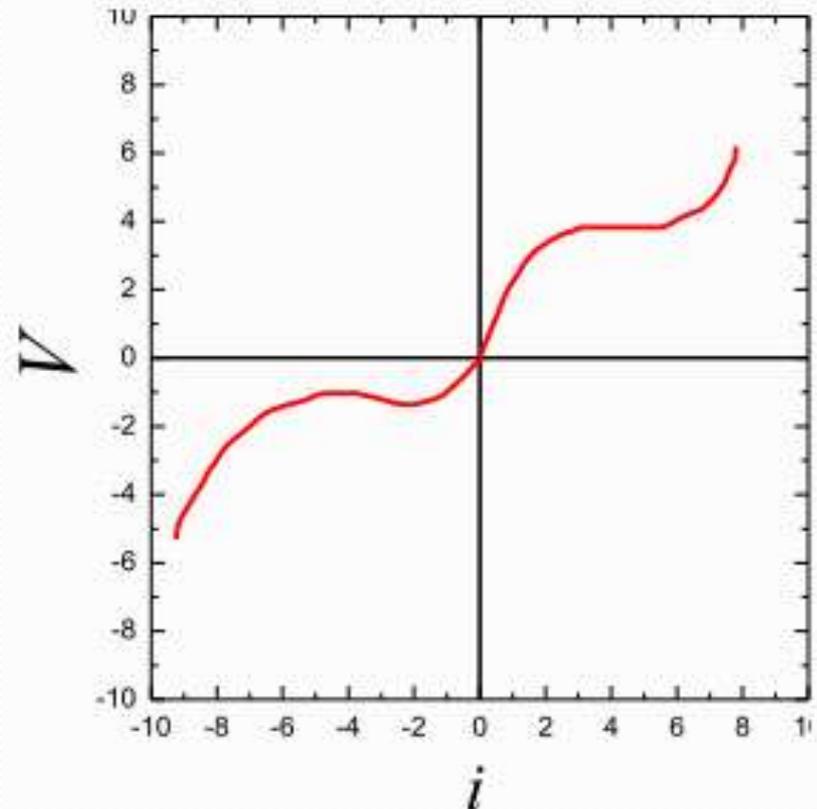
$$P = V \cdot i$$

$$P = R \cdot i^2 \quad \text{ou} \quad P = \frac{V^2}{R}$$

Nada disso é novidade!

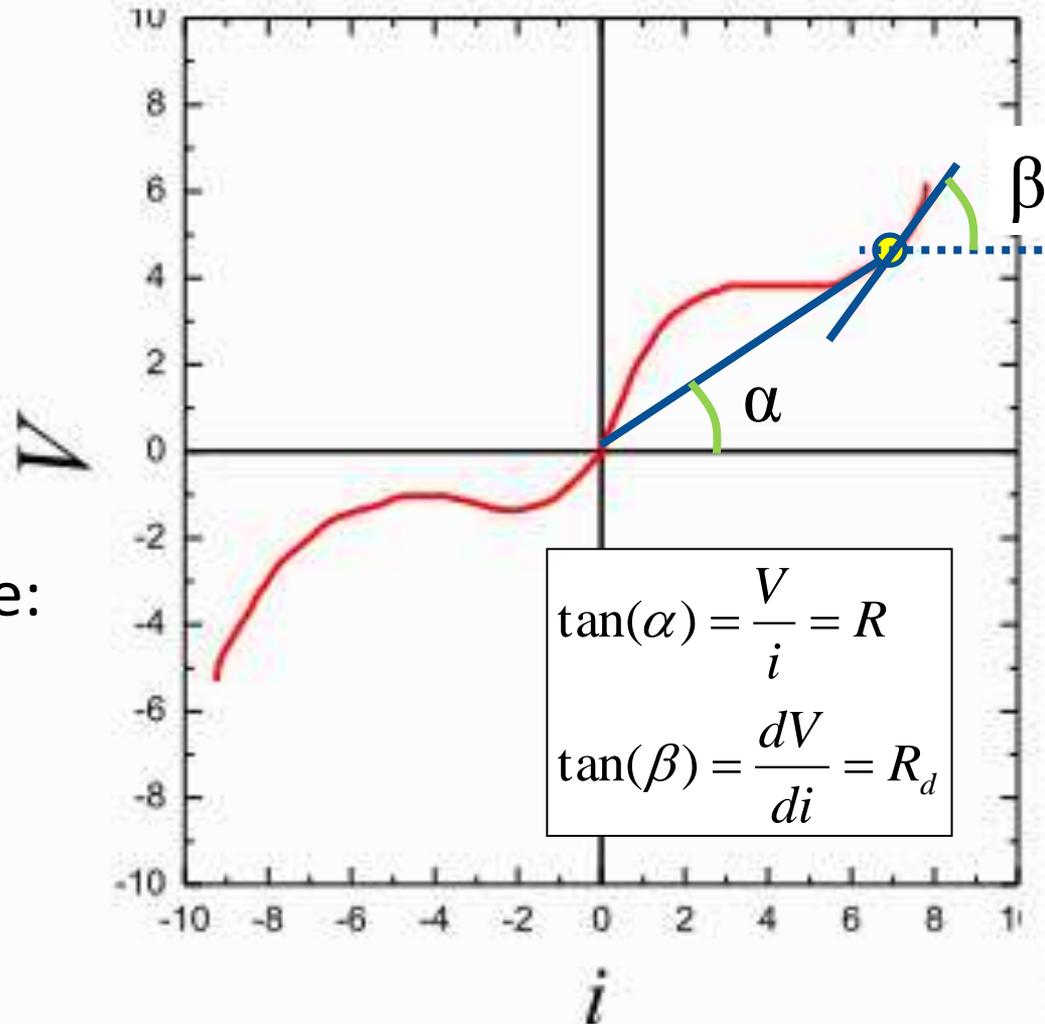
# Curva Característica

- Uma **curva característica** é o gráfico da **tensão  $V$**  (ordenada) em função da **corrente  $i$**  (abscissa). Esse gráfico serve para caracterizar o comportamento do elemento sob determinadas condições de trabalho.
- Pela definição de elemento resistivo temos que  $V_x=0$  quando  $i_x=0$ .
- Ou seja, para um elemento resistivo a curva sempre passa pelo “zero”.



# Curva Característica

- Pontos importantes
  - $i=0$  para  $V=0$ 
    - Não há corrente se não há tensão aplicada
- A resistência vale:
  - $R=V/i$
- A resistência dinâmica vale:
  - $R=dV/di$
  - Relevância prática



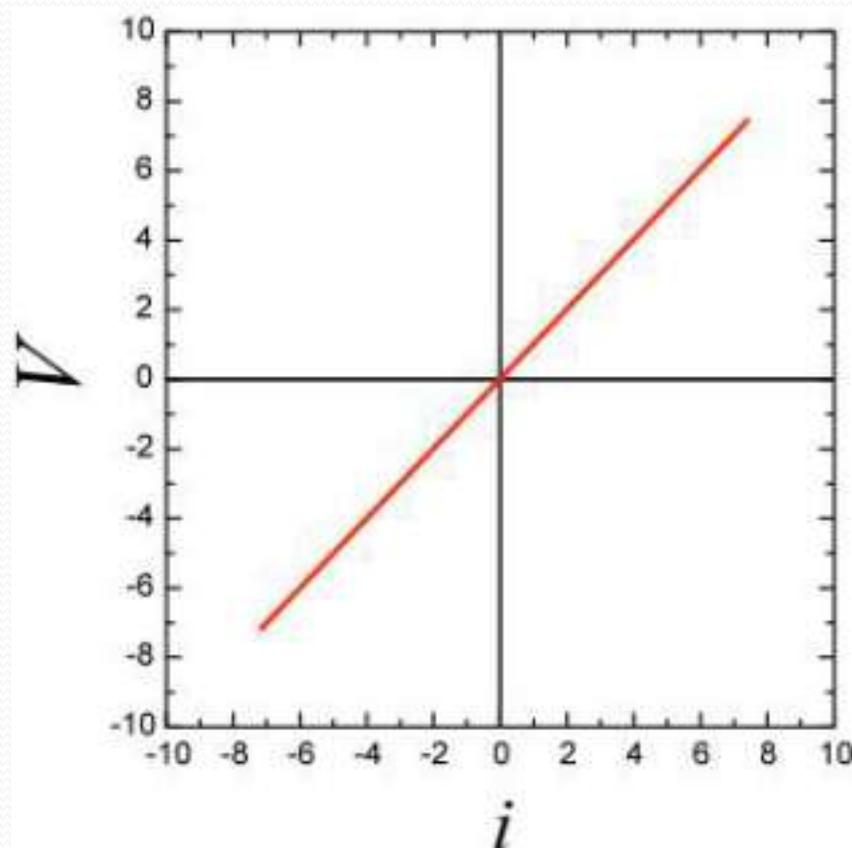
Técnicos e engenheiro preferem  $i \times V$

# Exemplo: Resistor Ôhmico

- No caso do resistor ôhmico,
  - $R = V/i = \text{const.}$ , ou seja:

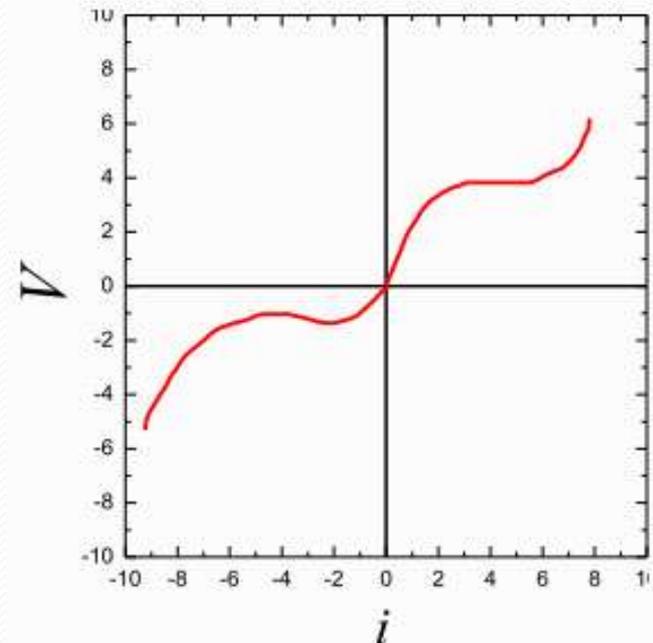
$$V \propto i$$

- Curva característica
  - Reta
  - Resistência dinâmica = resistência



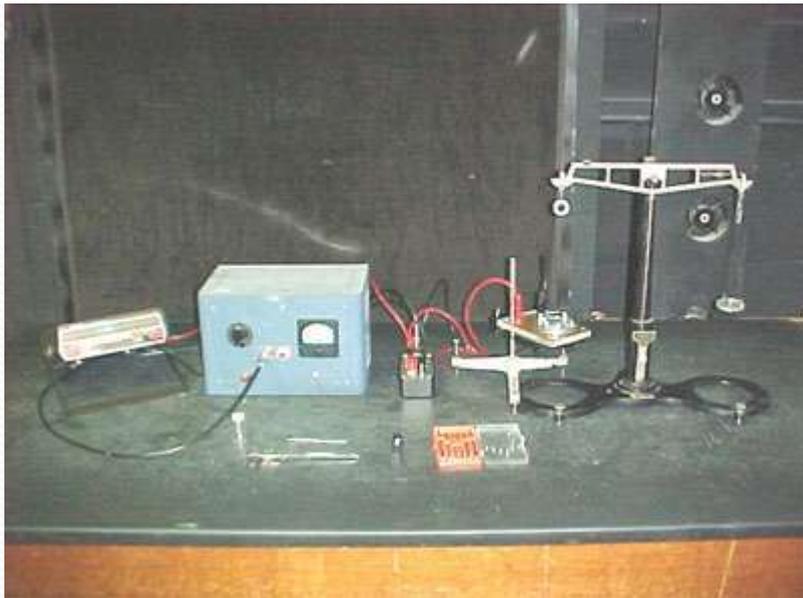
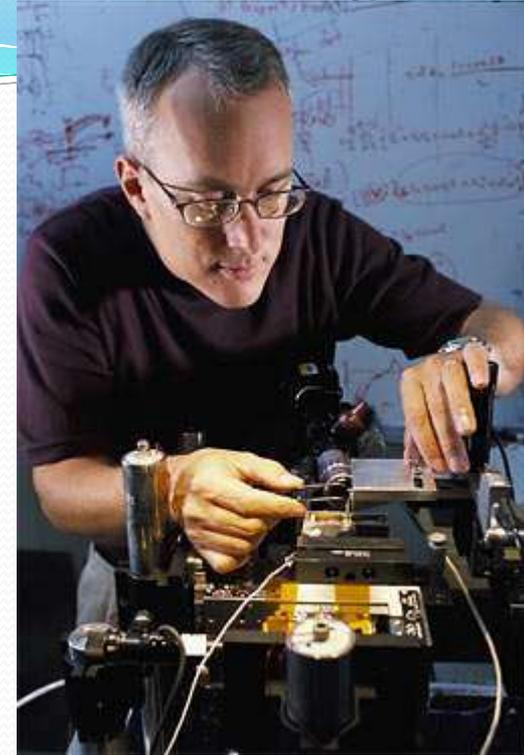
# Objetivos da Semana

- Como através da medida da curva característica, pode-se descobrir propriedades de um elemento de circuito desconhecido:
  - a proposta é medir a curva característica de resistores ôhmicos desconhecidos, com circuitos diferentes e achar o valor da resistência.
  
- Investigar se os instrumentos de medida utilizados no laboratório influenciam ou não o resultado das medidas.



# Como medir eletricidade?

- Exemplos:
- Balanças mecânicas que medem a força
  - entre dois fios (de corrente)
  - ou entre dois objetos (eletrostática)



<http://physics.unl.edu/history/histinstr/electric.html>

<http://www.mel.nist.gov/galleryph/calres/pages/pratt.htm>

<http://www.dartmouth.edu/~physics/labs/descriptions/electrostatic.balance.html>

# Como medir eletricidade?

Instrumentos mais práticos:

- Amperímetros/voltímetros/osciloscópios/etc.
  - Instrumentos utilizados para medir correntes, tensões elétricas, etc.



## **Sir William Thomson's Patent Electrostatic Voltmeter #10004 J. White, Glasgow**

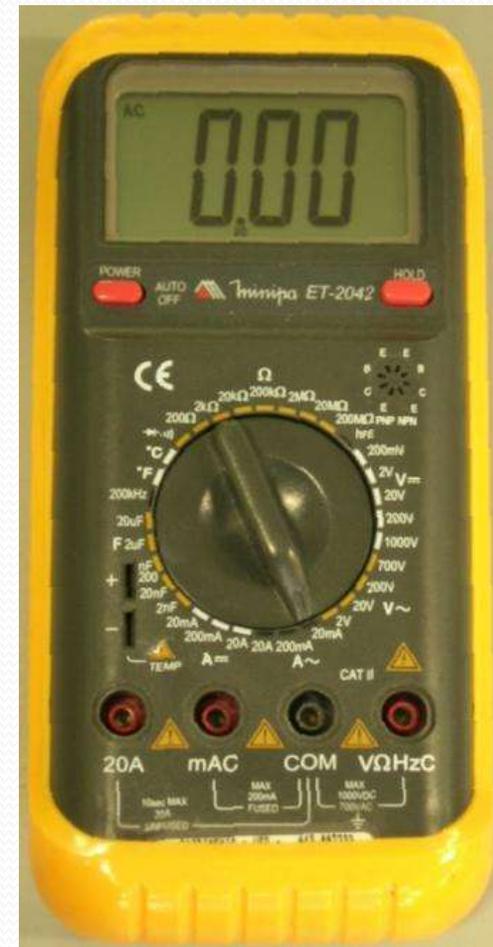
This instrument, devised by William Thomson (Lord Kelvin) in 1887, met a need in the growing electrical industry. It utilizes the force between two electrified bodies, in this case insulated parallel plates, one set fixed and the other moveable. Using the different weights supplied with the instrument one can measure potential differences of 50 to 10,000 volts. Electrostatic meters have the advantages that they use no current and can equally well be used with alternating and direct potential differences.

# Como medir eletricidade?

- Instrumentos mais práticos e mais modernos, como os multímetros.

MULTÍMETRO

Voltímetro  
Amperímetro  
Ohmímetro  
Capacitômetro  
Indutômetro  
Frequencímetro

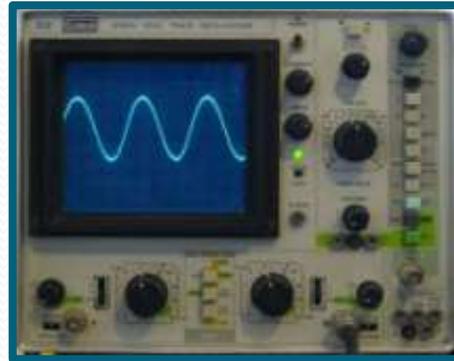


# Instrumentos básicos de um laboratório de eletricidade

- Multímetros

- Osciloscópio

Voltímetro instantâneo  $V(t)$   
Cronômetro / Freq.

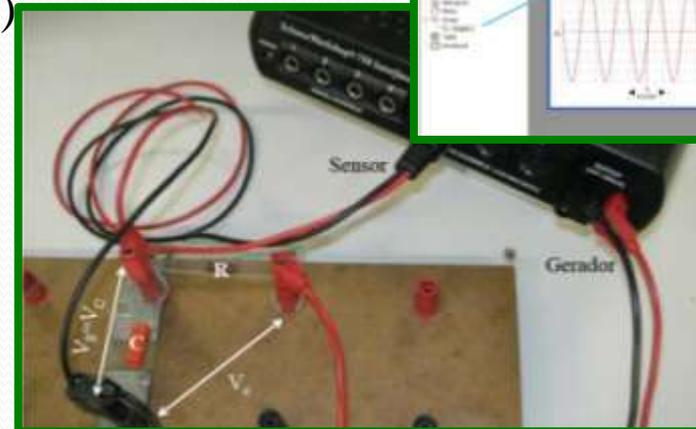
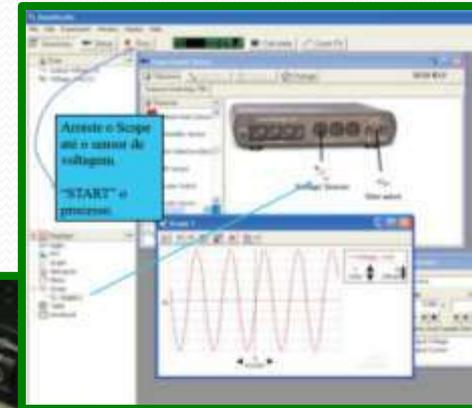


- Fontes de tensão e corrente

Pilhas/baterias  
Fonte C.C. (DC)  
Fonte C.A. (AC)

- Interfaces para aquisição de dados

Fontes programáveis  
Voltímetro  
Cronômetro  
Frequencímetro



# Como usar o multímetro

- Entrada (ou porta) COM (comum)
  - Utilizada sempre

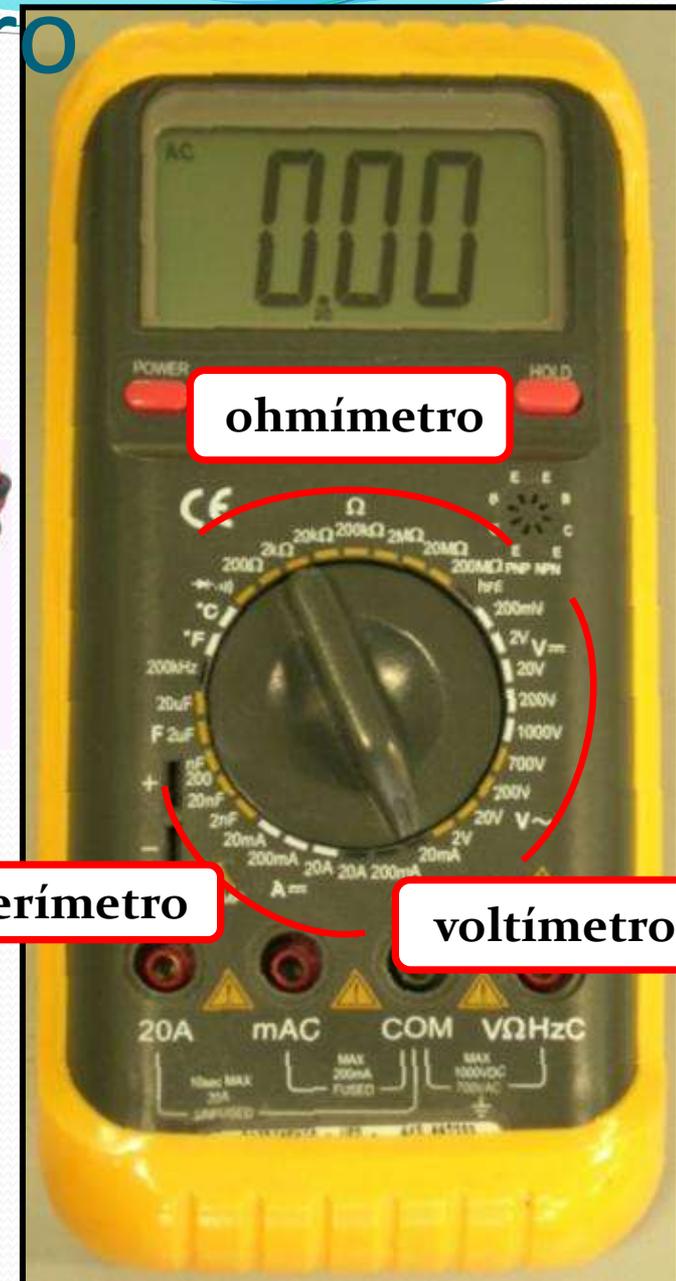
- As outras portas dependem do que vai medir

- V,  $\Omega$ , mA, etc



- Olhe o seletor para saber o que está medindo

- Cuidado com tensão (e corrente) ele mede contínua e alternada!



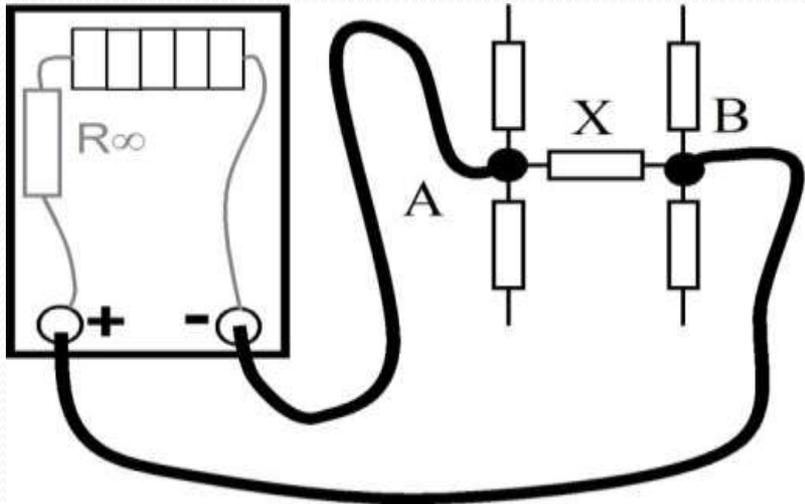
# Dicas

- Fiquem atentos à escala utilizada
- Olhem os Algarismos disponíveis na tela, os Algarismos podem mudar com o valor medido.
- Fiquem atentos à precisão (incerteza) do instrumento
  - Olhem o manual - depende do modelo e da escala utilizada!
- Atenção aos Algarismos significativos!

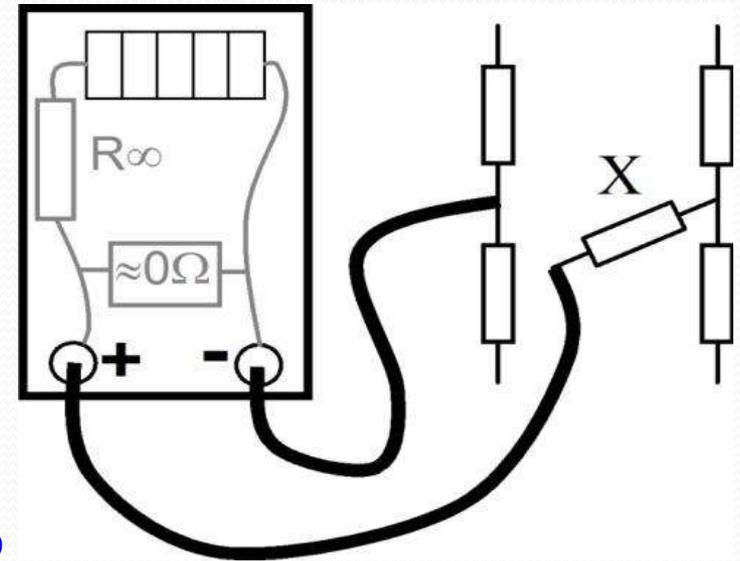


# Como usar os medidores

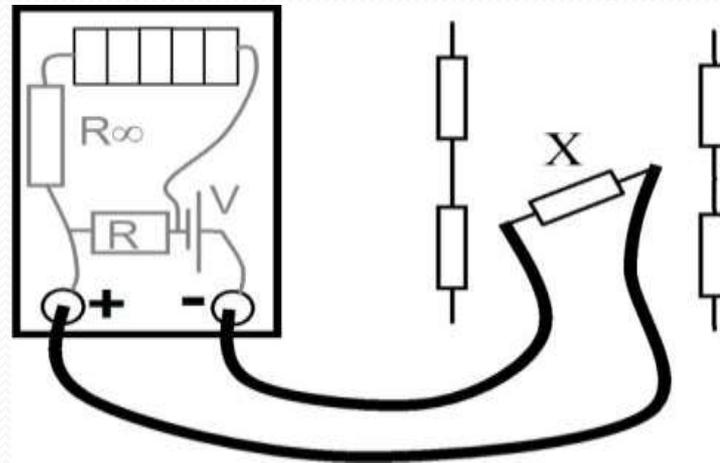
Voltímetro



Amperímetro



Ohmímetro



# Interface de Aquisição de dados



Entradas digitais:  
medir pulsos digitais

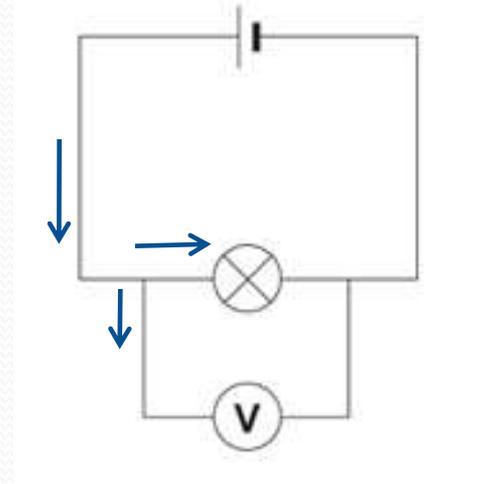
Entradas analógicas:  
Um osciloscópio com  
memória

Saída analógica  
programada:  
Fonte DC  
Fonte AC  
rampa

- Podemos utilizar esta interface como voltímetro, osciloscópio ou fonte e adquirir os dados diretamente no computador
- Ver programa DataStudio nos micros do Lab

# Como usar um voltímetro

- Para medir a tensão o aparelho deve experimentar a mesma tensão que o elemento → **ele deve estar em paralelo** com o elemento de interesse.
  - Para isso parte da corrente que flui pelo circuito deve atravessar o medidor.

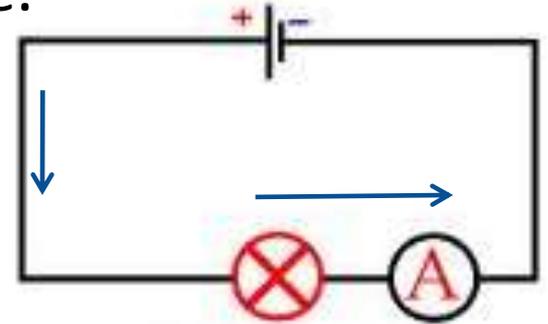


- Um medidor ideal é aquele que absolutamente não altera o circuito que está medindo ( $R_V = \infty$ ).
- Então como ele tem que desviar corrente para efetuar a medida, para não alterar o circuito a corrente que ele desvia deve ser zero. Portanto a resistência interna do instrumento deve ser infinita.

# Como usar um amperímetro

- Para medir a corrente o aparelho **deve estar em série** com a malha de interesse.

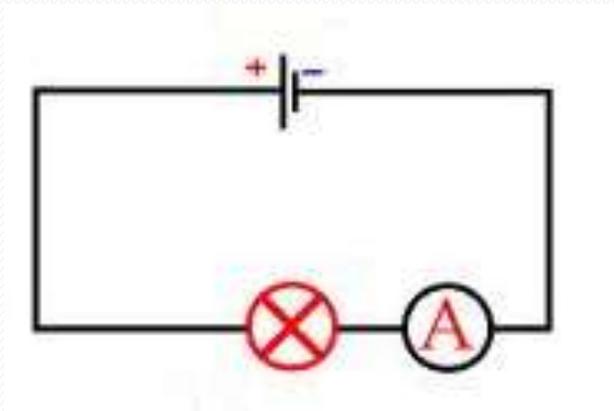
- Assim **toda** a corrente que flui pelo circuito atravessa o medidor.



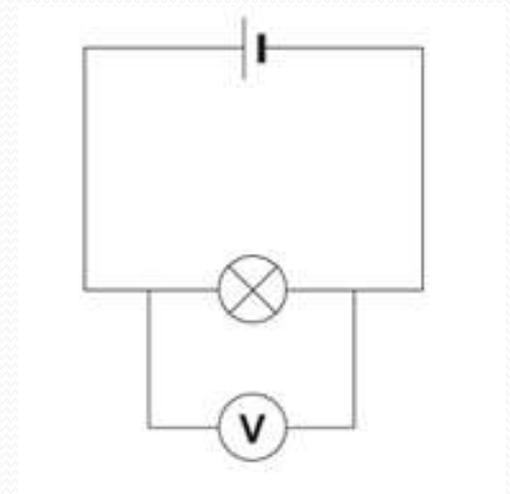
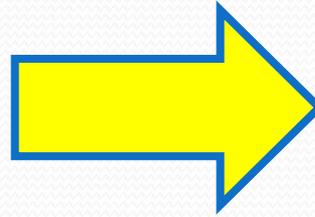
- Um medidor ideal é aquele que absolutamente não altera o circuito que está medindo ( $R_A=0$ ).
- Mas todo material possui alguma resistência, certo?

# Amperímetro Seguro

- Para evitar de queimar o amperímetro, podemos medir a corrente usando um resistor de proteção conhecido:



$$I_A = I_{\text{circuito}}$$



$$I_V \approx 0$$

$$I_{\text{circuito}} = \frac{V_X}{R_X}$$

# Atividades da Semana (parte 1)

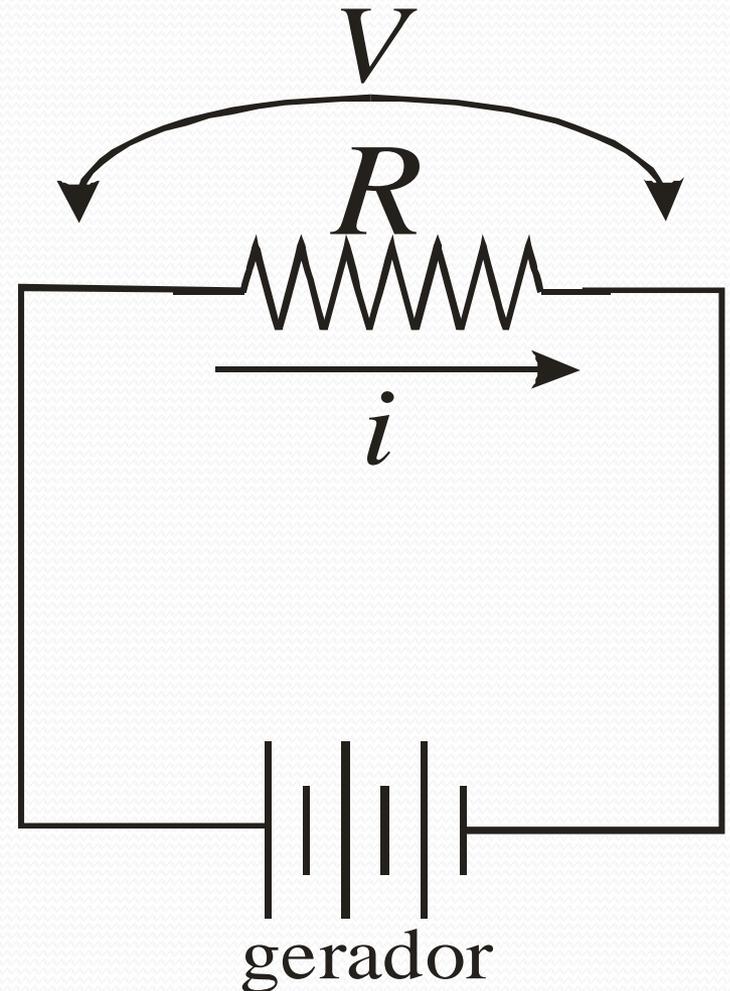
- Realizar medidas elétricas de elementos simples:
- Tensão elétrica de uma pilha A ou AA
- Resistência elétrica de:
  - Chuveiro elétrico (posições inverno e verão)
  - Resistor comercial simples
  - Lâmpada comum de 60W (ou 100W), 127 V
  - Resistência entre as mãos, entre polegar e indicador de uma mão e entre sua mão e seu pé
- Comparar com valores nominais
  - Ou calcular valores esperados a partir de valores nominais
  - Apresentar resultados em uma tabela apropriada e discutir.

# Atividades da Semana (parte 2)

- Levantar a curva característica de cada um dos resistores desconhecidos com os dois circuitos.
  - São 2 resistores em 2 circuitos: 4 curvas características.
- Fazer um ajuste para calcular as resistências dos resistores desconhecidos a partir dessas curvas. Não esqueça da qualidade do ajuste (chi quadrado ou resíduos)
- Com base nos resultados diga qual é o melhor circuito para medir cada um dos resistores. Justifique.
- Dica: a principal é verificar que o botão de tensão da fonte está em zero antes de ligá-la.

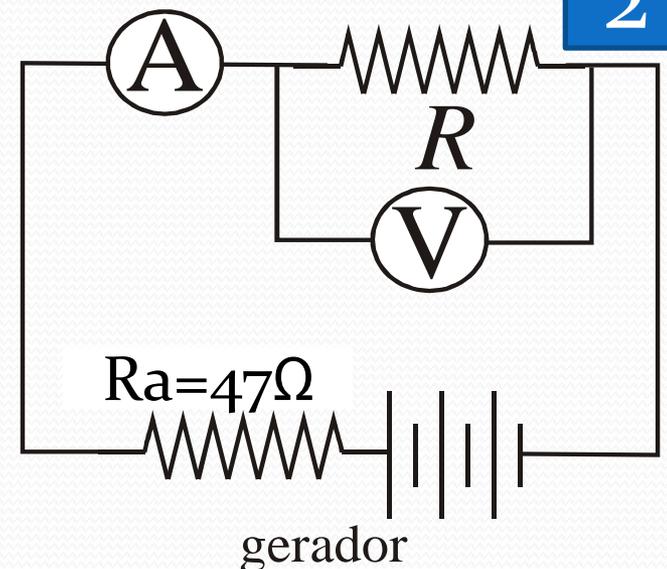
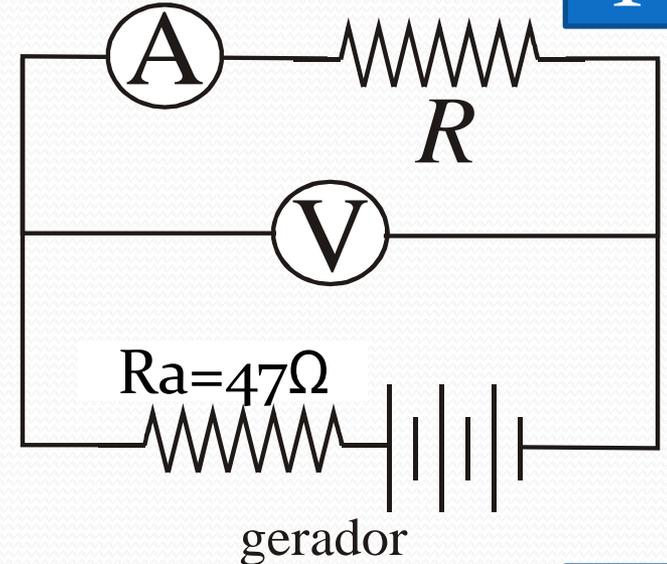
# Levantando a curva característica

- Como se mede uma curva característica?
  - Medimos a tensão sobre o elemento utilizando um voltímetro
  - Medimos a corrente que atravessa o elemento utilizando um amperímetro
  - **Variamos a tensão no gerador** e **repetimos a medida**
- Fazemos o gráfico  $V \times i$
- Quantos pontos são necessários para caracterizar bem a curva?



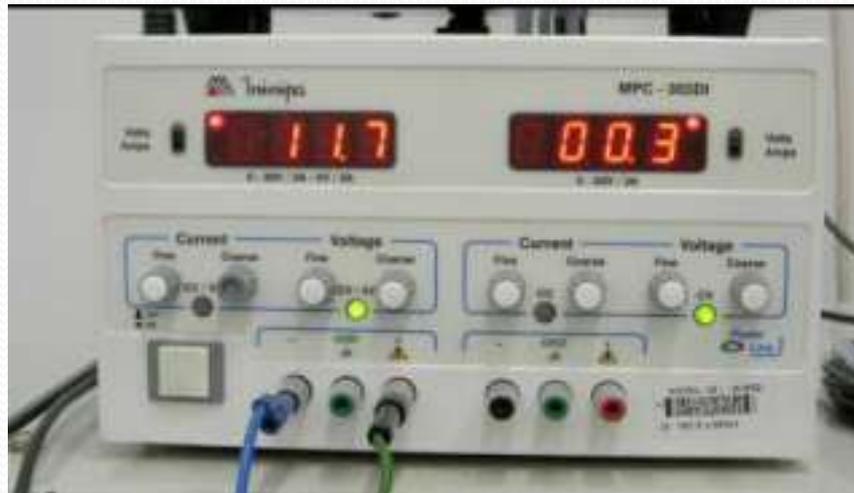
# A medida na prática

- Utiliza-se um voltímetro para medir a tensão no resistor
- E um amperímetro para medir a corrente no resistor
- O resistor de  $47\ \Omega$  é para limitar a corrente no circuito
  - Cheque qual é a corrente máxima, neste caso
- Duas opções de circuito elétrico
  - Qual é melhor?
  - Faz diferença?
- Existem outras opções??



# Quem é a nossa pilha?

- Vai ser uma fonte de corrente/tensão
  - DC - Direct Current - Tensão/Corrente contínua
  - Modo tensão (regula **V**, **I** depende do circuito)
  - Modo corrente (regula **I**, **V** depende do circuito)

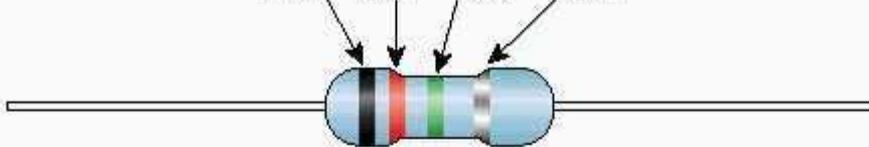


# Quem é nosso resistor?

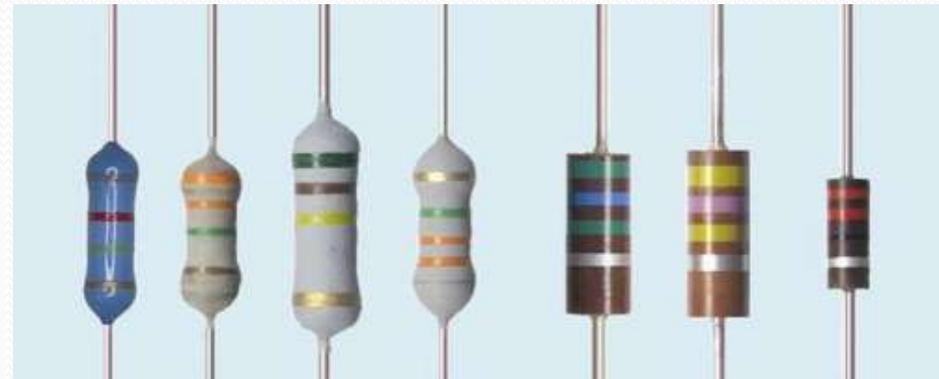
- Serão dois resistores desconhecidos (pintados de **preto**), de tamanho e resistências bem diferentes.

Standard EIA Color Code Table 4 Band:  $\pm 2\%$ ,  $\pm 5\%$ , and  $\pm 10\%$

1st Band    2nd Band    3rd Band    4th Band



Color	1st Band (1st figure)	2nd Band (2nd figure)	3rd Band (multiplier)	4th Band (tolerance)
Black	0	0	$10^0$	
Brown	1	1	$10^1$	
Red	2	2	$10^2$	$\pm 2\%$
Orange	3	3	$10^3$	
Yellow	4	4	$10^4$	
Green	5	5	$10^5$	
Blue	6	6	$10^6$	
Violet	7	7	$10^7$	
Gray	8	8	$10^8$	
White	9	9	$10^9$	
Gold			$10^{-1}$	$\pm 5\%$
Silver			$10^{-2}$	$\pm 10\%$



# Atividades da Semana (parte 3)

- Com as medidas de resistências realizadas, a partir das curvas características com os circuitos 1 e 2, é possível determinar as resistências internas do voltímetro e amperímetro utilizados.
- Obtenha as **resistências internas** do voltímetro (**RV**) e amperímetro (**RA**) e compare-as com as fornecidas pelo fabricante (manual)
- Com base nos resultados diga qual é o melhor circuito para medir cada um dos resistores. Justifique.
- Calcule a potência dissipada nos resistores desconhecidos

# Dica 1

- Quantos pontos em cada curva característica??
- **Resposta:** Tantos quantos forem necessários para uma boa definição da resistência (coeficiente angular). O que você acha que é uma boa definição da resistência?
- **Atenção:** Tudo que aprenderam sobre análise de erros nos laboratórios 1 e 2 é absolutamente necessário neste laboratório, e se espera que vocês apliquem tudo o que aprenderam em todas as experiências. Sínteses sem análise de erros não têm valor prático e são bastante penalizadas.

# Dica 2

- **Teste do dedo:**
- Como os resistores que têm à disposição não são ideais, se a potência dissipada por eles for muito elevada, primeiro eles **aquecem**, depois **cheiram a queimado** e em seguida se **queimam**.
- Já quando aquecem, dependendo da temperatura, deixam de ser ôhmicos, e **você não quer que isso aconteça, certo?**
- Então ponha o dedo sobre eles e se estiverem quentes, desligue a fonte e repense a sua experiência.
- **Se cheirar queimado, desligue a fonte antes de qualquer outra ação!!!! Não fique tentando ver o que está errado com a fonte ligada!!!!**

# Choques elétricos

- Não é a tensão que é perigosa: é a potência
- O corpo humano é muito sensível à passagem da corrente elétrica:
  - atividade muscular incluindo os batimentos cardíacos e a respiração são controlados por correntes elétricas internas
- A passagem de uma corrente externa resulta em graves descontroles como, paralisia respiratória, fibrilação ventricular ou parada cardíaca.
- A tabela a seguir mostra resultados obtidos em experiências com animais e acidentes, sendo portanto aproximados.

# Choques elétricos

- Há um período vulnerável do ciclo cardíaco em que uma corrente de duração de apenas 100ms pode provocar fibrilação ventricular.

**Engano supor que choque rápido não é perigoso**

- Outra coisa importante é o percurso da corrente elétrica através do corpo:
  - correntes de 50microA através do coração podem induzir a fibrilação
  - correntes de 500mA entre os dedos polegar e indicador podem provocar apenas uma queimadura
  - veja a tabela a seguir com limites considerados seguros

Corrente alternada 60Hz	Duração	Efeito provável no corpo humano
0 a 0,3 mA	qualquer	nenhum
0,3 a 0,6 mA	qualquer	limiar de percepção
1 a 10 mA	qualquer	dor
10 a 25 mA	minutos	dor, contração muscular, dificuldade respiratória, aumento da pressão arterial
25 a 50 mA	segundos	paralisia respiratória, fibrilação ventricular, inconsciência
50 a 200 mA	mais de um ciclo cardíaco	paralisia respiratória, fibrilação ventricular, inconsciência, marcas visíveis
mais de 200mA	menos de um ciclo cardíaco	fibrilação ventricular, inconsciência, marcas visíveis
mais de 200 mA	mais de um ciclo cardíaco	Parada cardíaca, inconsciência, queimaduras