

Física Experimental IV

Primeiro semestre de 2016

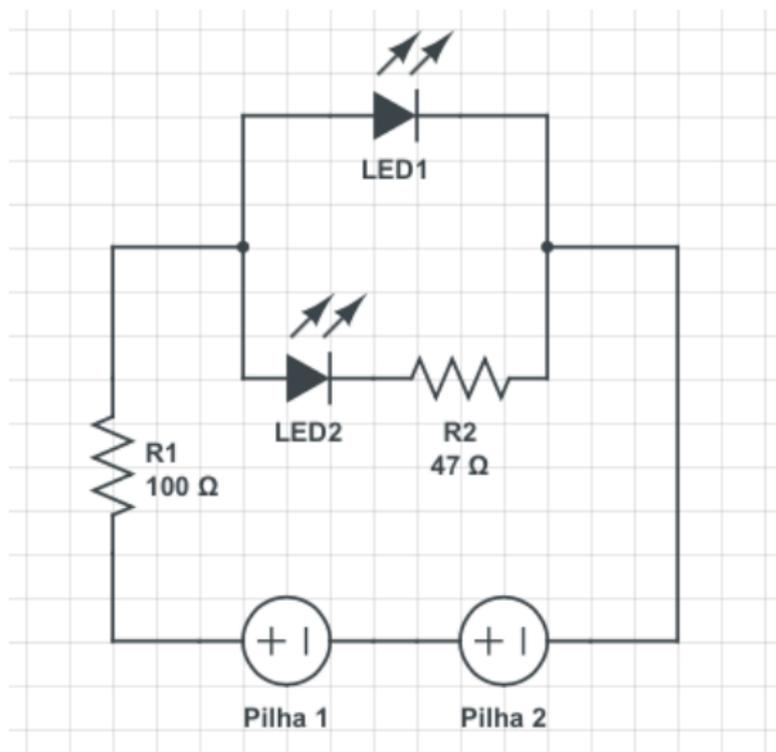
Aula 1 - Experimento I - semana 1

Página da disciplina:

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view?id=10374>

23 de Fevereiro de 2016

Experimento I - Circuitos elétricos de corrente contínua



1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

Objetivos do experimento

- Estudar alguns elementos simples de circuitos elétricos a partir de suas curvas características
 - ▶ Resistores
 - ▶ Diodos LED
 - ▶ Baterias recarregáveis
- Utilizar estas curvas para resolver um circuito elétrico proposto em sala

- 4 semanas
 - ▶ Semana 1
 - ★ Medida da curva característica de um resistor ôhmico e do LED

- 4 semanas
 - ▶ Semana 1
 - ★ Medida da curva característica de um resistor ôhmico e do LED
 - ▶ Semana 2
 - ★ Medida da curva característica de uma pilha comum

- 4 semanas
 - ▶ **Semana 1**
 - ★ **Medida da curva característica de um resistor ôhmico e do LED**
 - ▶ **Semana 2**
 - ★ **Medida da curva característica de uma pilha comum**
 - ▶ **Semana 3**
 - ★ **Montagem de um circuito proposto, medidas diversas e comparações com previsões**

- 4 semanas
 - ▶ **Semana 1**
 - ★ **Medida da curva característica de um resistor ôhmico e do LED**
 - ▶ **Semana 2**
 - ★ **Medida da curva característica de uma pilha comum**
 - ▶ **Semana 3**
 - ★ **Montagem de um circuito proposto, medidas diversas e comparações com previsões**
 - ▶ **Semana 4**
 - ★ **Estudo da resistividade de condutores e semicondutores com a temperatura**

IMPORTANTE!

- Síntese da semana (até 1 ponto)
 - ▶ Tabela com os dados brutos (exemplo no site da disciplina)
 - ▶ Arquivo em PDF com os gráficos das curvas obtidas, ajustes realizados e eventuais comentários
 - ▶ **A data máxima para upload é 18h00 da segunda-feira**
 - ★ Upload no site de reservas como “síntese”
- Muitas atividades são feitas através da comparação dos resultados de toda a turma
- **Banco de dados no site da disciplina** (até 1 ponto)
 - ▶ Grupos DEVEM fazer upload de resultados no site
 - ▶ A data máxima para upload é 18h00 da última segunda-feira do experimento

1 Experimento

- Experimento I
- **Conceitos importantes**
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

Alguns conceitos importantes

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

- Força coulombiana entre duas cargas

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

- Força aplicada a uma carga devido à interação com várias cargas diferentes

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

- Em analogia ao campo gravitacional podemos dizer que a carga q sofre uma força devido ao campo elétrico resultante da presença das outras cargas:

$$\vec{F}(q) = q\vec{E}$$

- O campo elétrico, neste caso, vale:

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

- Forças conservativas podem ser escritas através de um potencial, de tal modo que o campo de uma força conservativa é dado por:

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

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

- Unidades
 - ▶ Potencial elétrico $\Rightarrow V$ (volt)
 - ▶ Campo elétrico $\Rightarrow V/m$ (volt por metro)

- Cargas em movimento geram corrente
- Define-se a corrente elétrica como sendo a quantidade de carga que atravessa uma secção transversal de um meio por unidade de tempo

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

- Unidade
 - ▶ Corrente elétrica \Rightarrow A (Ampere = C/s)

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

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

- Dois casos distintos
 - ▶ Potência negativa \Rightarrow Fornecendo energia
 - ▶ Potência positiva \Rightarrow Absorvendo energia
- Unidade
 - ▶ Potencia $\Rightarrow W$ (Watt = J/s)

Resistência de um material

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

- Resistência elétrica

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



- Unidade

- ▶ Resistência elétrica $\Rightarrow \Omega$ (Ohm = V/A)

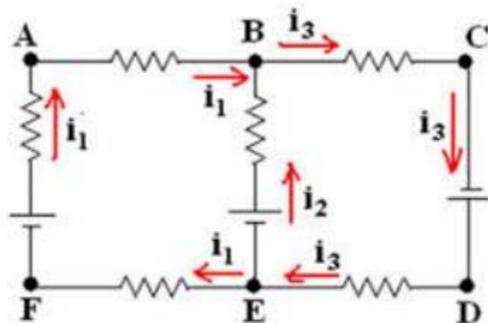
- Estabelece que a resistência elétrica

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

deve ser **constante** para um determinado material. Esta resistência não deve depender da tensão ou corrente no circuito utilizado, bem como de outras variáveis, como temperatura. Neste caso diz-se que o **resistor é ôhmico**.

Leis de Kirchhoff

- Soma das tensões em um loop qualquer deve ser nula
- Soma das correntes em um nó qualquer deve ser nula
- Cuidado com orientações e sinais



- Em um resistor

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

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

$$P = V i$$

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

1 Experimento

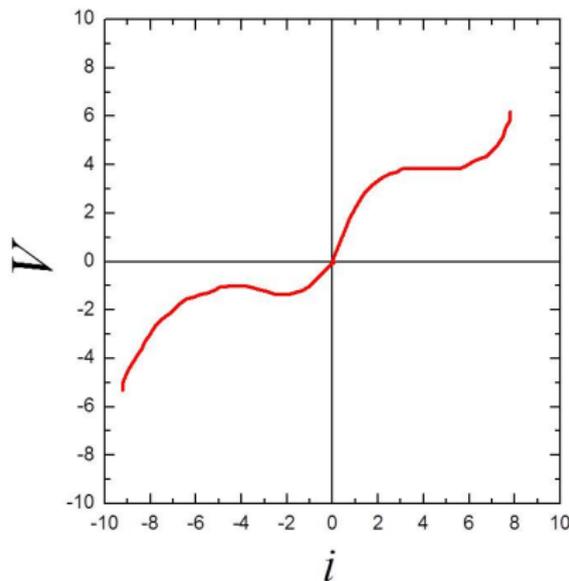
- Experimento I
- Conceitos importantes
- **Curvas características**
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

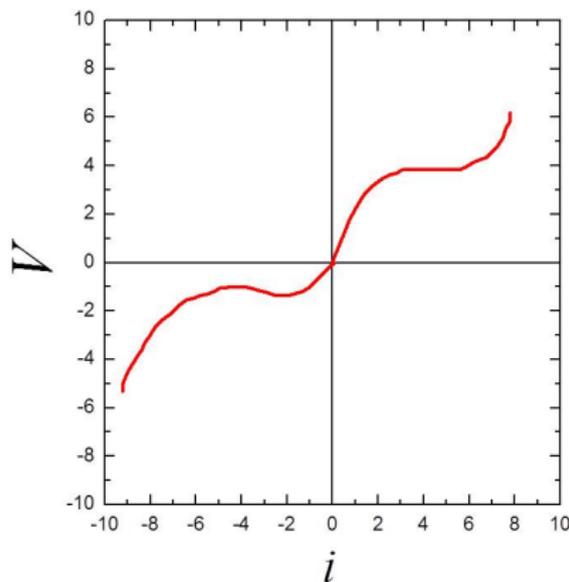
Curva característica

- O que é?
 - ▶ É um gráfico, característico de cada elemento, que estabelece qual a corrente que flui pelo elemento como função da tensão aplicada
 - ★ Em geral, gráfico de $V \times i$ para Físicos
 - ★ Técnicos, engenheiros preferem $i \times V$



Curva característica

- Pontos importantes
 - ▶ $i = 0$ para $V = 0$
 - ★ Não há corrente se não há tensão aplicada
- Resistência do elemento
 - ▶ $R = \frac{V}{i}$
- Resistência dinâmica
 - ▶ $R = \frac{dV}{di}$
 - ▶ Relevância prática

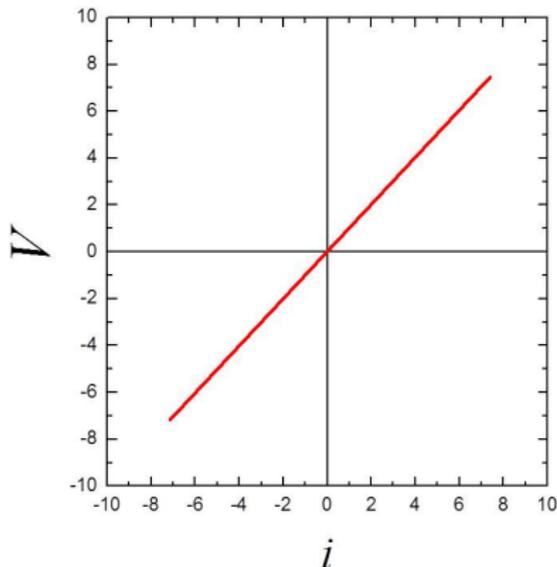


Exemplo: resistor ôhmico

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

$$V = R i$$

- Curva característica
 - ▶ Reta
 - ▶ Resistência dinâmica = resistência



1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- **Medidas elétricas**
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

- Várias técnicas
 - ▶ Balanças de correntes
 - ★ Medem a força entre dois fios utilizando uma balança mecânica
 - ▶ Balanças eletrostáticas
 - ★ Medem a carga entre dois objetos utilizando uma balança mecânica
 - ▶ Amperímetros/voltímetros/osciloscópios/etc.
 - ★ Instrumentos utilizados para medir correntes, tensões elétricas, etc.
 - ★ Muito utilizados em situações práticas do dia-a-dia

Instrumentos básicos de um laboratório de eletrônica

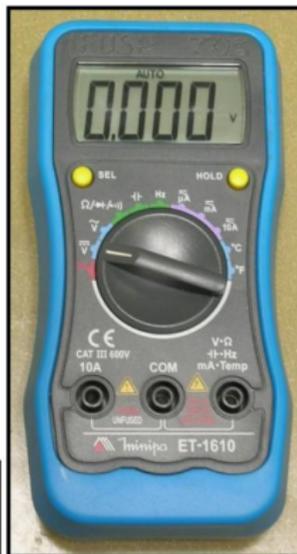
Multímetro {
Voltímetro
Amperímetro
Ohmímetro
Capacitômetro
Indutômetro
Frequencímetro

Osciloscópio { Voltímetro $v(t)$
Cronômetro

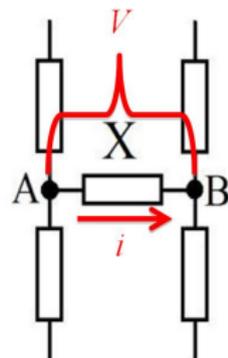
Fontes de tensão e/ou corrente {
Pilha / bateria
Fontes CC (DC)
Fontes CA (AC)

Interfaces para aquisição de dados (multi I/O) {
Fontes CA/CC programáveis
Voltímetro
Cronômetro
Frequencímetro

Multímetro

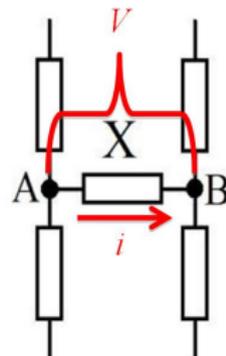
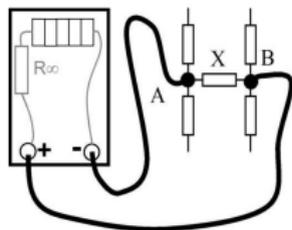


Utilizando um multímetro



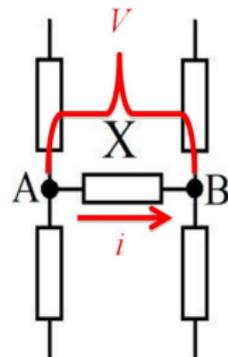
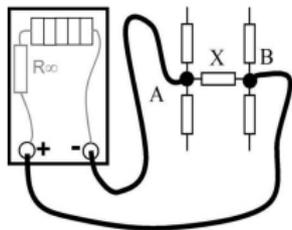
Utilizando um multímetro

Voltímetro

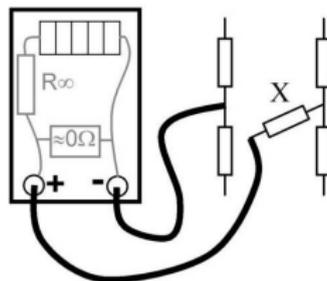


Utilizando um multímetro

Voltímetro

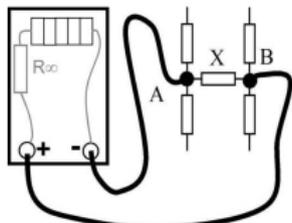


Amperímetro

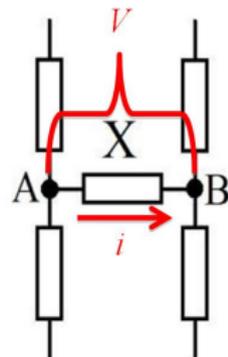
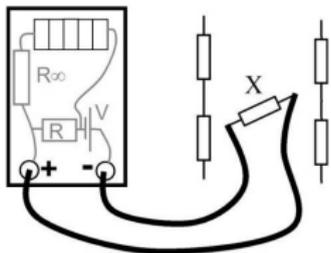


Utilizando um multímetro

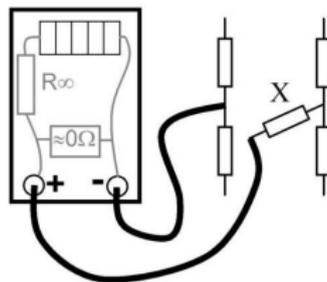
Voltímetro



Ohmímetro

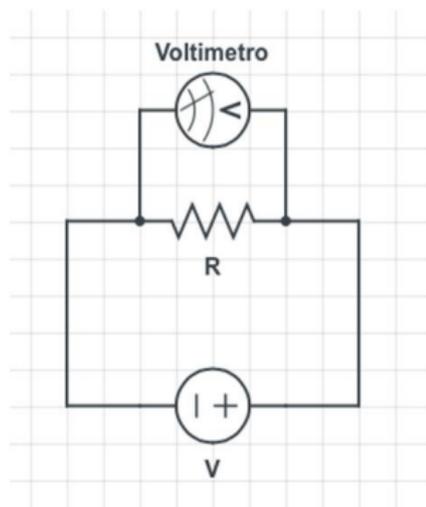


Amperímetro



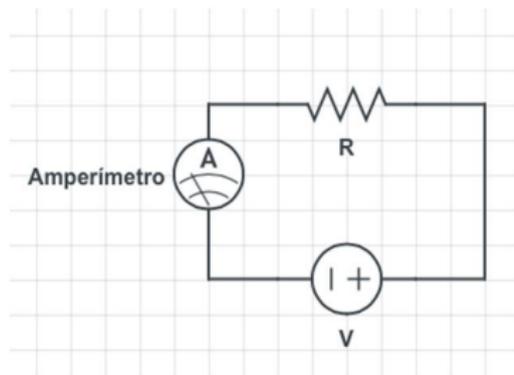
Medindo tensão

- O Voltímetro deve ser colocado em paralelo ao elemento que se quer medir a tensão



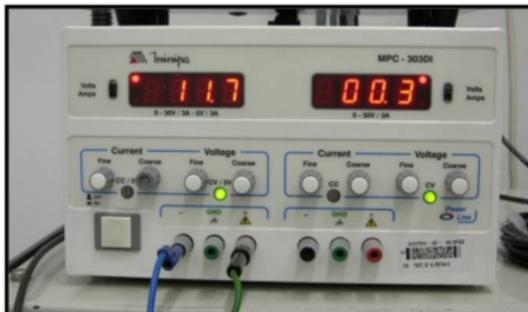
Medindo corrente

- O Amperímetro deve ser colocado em série ao elemento que se quer medir a corrente



Geradores

- DC - Direct Current - Tensão/Corrente contínua
- Modo tensão (regula V, I depende do circuito)
- Modo corrente (regula I, V depende do circuito)



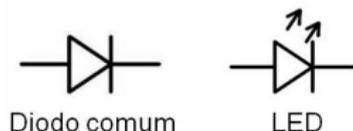
1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- **O diodo LED**
- Atividades da semana I

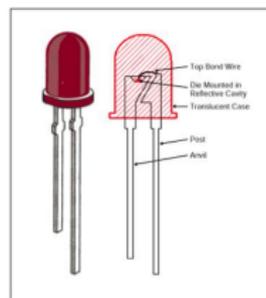
2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

Light Emitting Diode



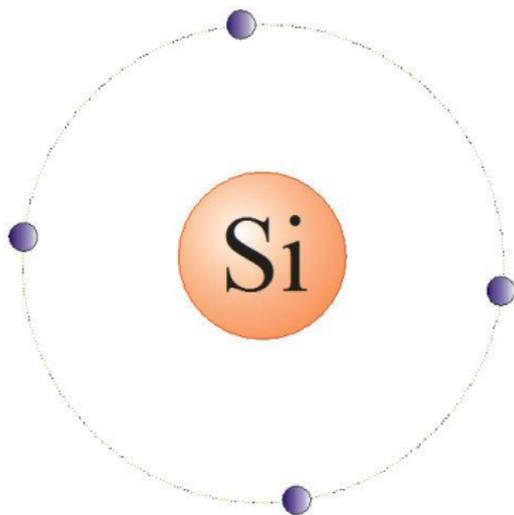
- O LED é um diodo que emite luz
 - ▶ Diodos, em geral, emitem luz mas somente alguns na região do comprimento de onda do visível
 - ▶ Geometria favorável à percepção da luz produzida



O que é um diodo

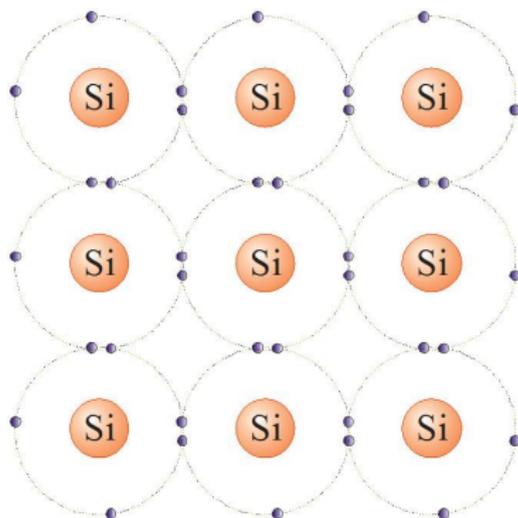
- Elemento resistivo que, idealmente,
 - ▶ conduz corrente perfeitamente em um sentido ($R \rightarrow 0$)
 - ▶ não conduz corrente no sentido oposto ($R \rightarrow \infty$)
 - ▶ o diodo real é próximo disto
- Diodos, em geral são feitos de materiais semicondutores tetravalentes (silício, germânio, etc.) dopados com elementos tri- ou penta-valentes em uma junção *pn*

- 4 elétrons de valência



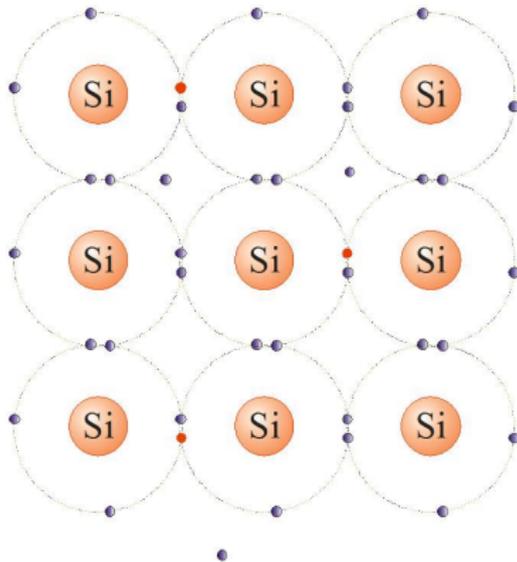
Cristais de semicondutores tetra-valentes

- 4 elétrons de valência
- Ligações covalentes com outros átomos para formar monocristais



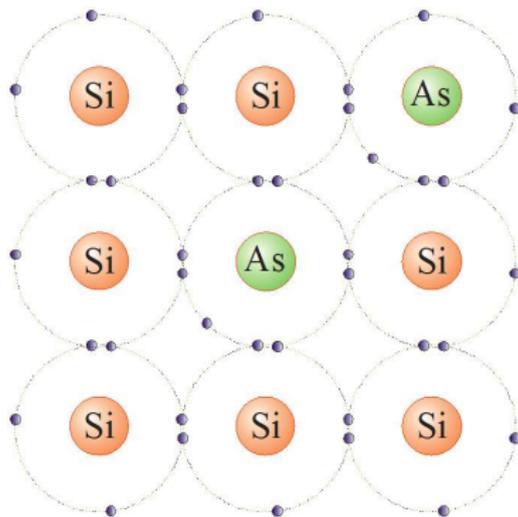
Cristais de semicondutores tetra-valentes

- 4 elétrons de valência
- Ligações covalentes com outros átomos para formar monocristais
- Em temperaturas mais altas, alguns elétrons podem escapar da ligação
 - ▶ Cargas negativas livres
 - ▶ Buracos, como se fossem cargas positivas
 - ▶ Pequena corrente se aplicarmos uma tensão ao cristal



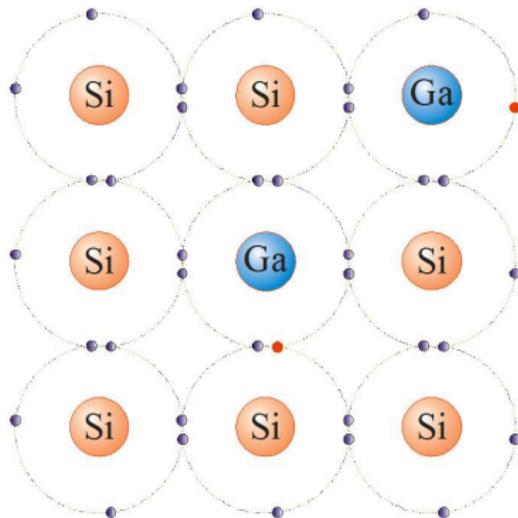
Dopando o cristal (n e p)

- Elementos penta-valentes, por exemplo o Arsênio
 - ▶ Sobra de elétrons no cristal
 - ▶ Cristal tipo n



Dopando o cristal (n e p)

- Elementos penta-valentes, por exemplo o Arsênio
 - ▶ Sobra de elétrons no cristal
 - ▶ Cristal tipo n
- Elementos tri-valentes, por exemplo o Gálio
 - ▶ Falta de elétrons, excesso de buracos
 - ▶ Cristal tipo p



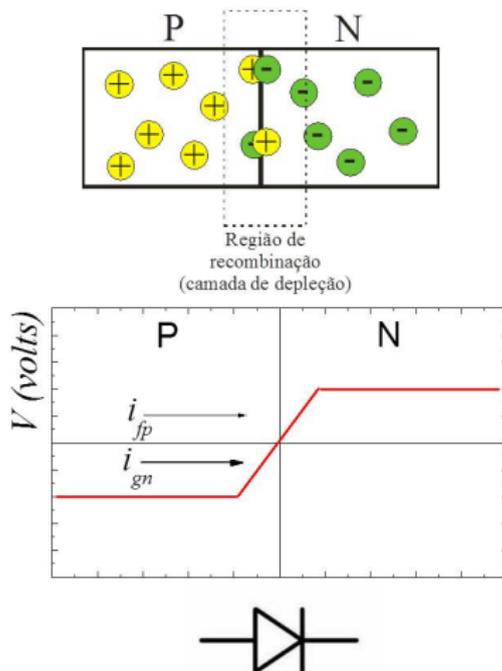
O diodo é uma junção pn

- Junção pn

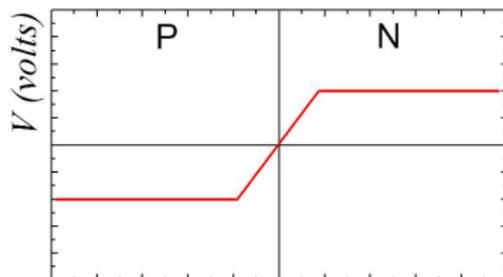
- ▶ Na região da junção ocorre recombinação de cargas, tornando a junção “livre” de portadores

- A diferença de cargas cria uma diferença de potencial na junção

- ▶ Correntes devido aos dopantes (i_{fp}) e devido às lacunas abertas por agitação térmica (i_{gn}) têm que vencer a barreira de potencial

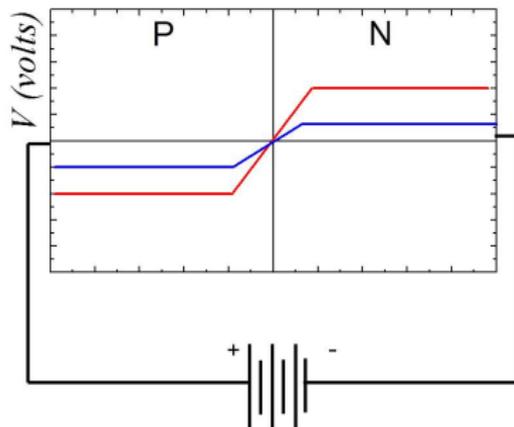


Aplicando tensões no diodo



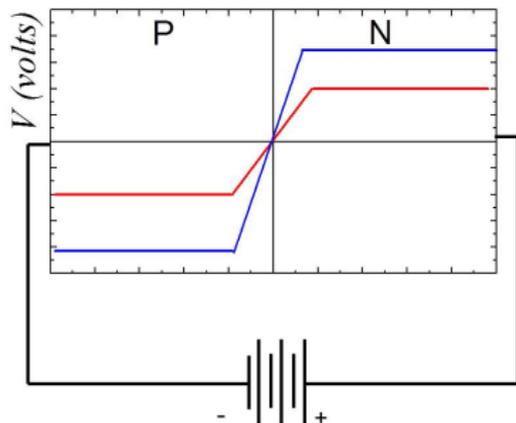
- Tensão direta

- ▶ Diminui a barreira de potencial
- ▶ Favorece a condução de corrente



Aplicando tensões no diodo

- Tensão direta
 - ▶ Diminui a barreira de potencial
 - ▶ Favorece a condução de corrente
- Tensão reversa
 - ▶ Aumenta a barreira de potencial
 - ▶ Dificulta a condução

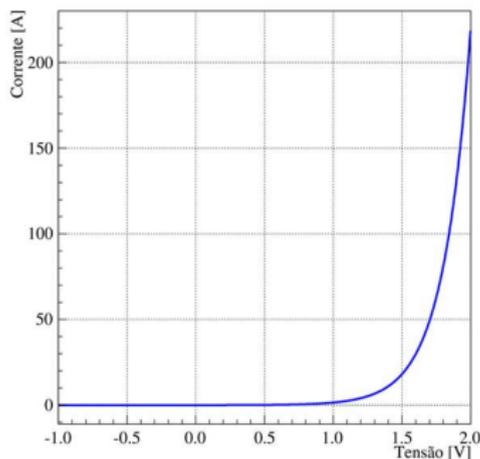
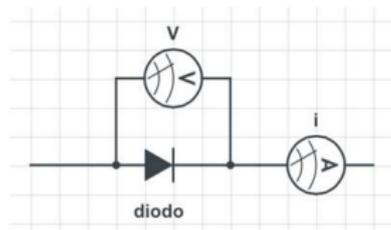


Curva característica

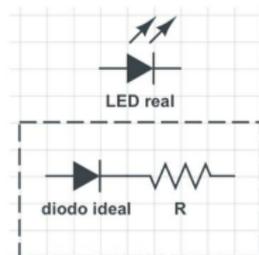
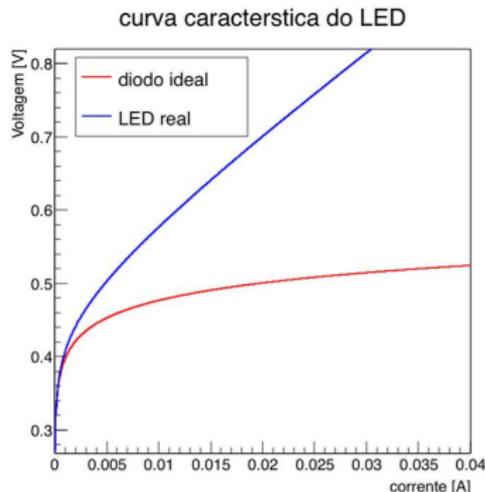
- Depende da temperatura do diodo

$$i = i_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right]$$

- ▶ i_0 é característico do diodo
- ▶ n é o fator de idealidade do diodo
- ▶ e = carga do elétron
- ▶ k = constante de Boltzmann
- ▶ T = temperatura



- O LED real se assemelha mais a um diodo em série com um resistor (R_{int})
 - ▶ Esta resistência interna vem do processo de fabricação do diodo e das características dos seus materiais



1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

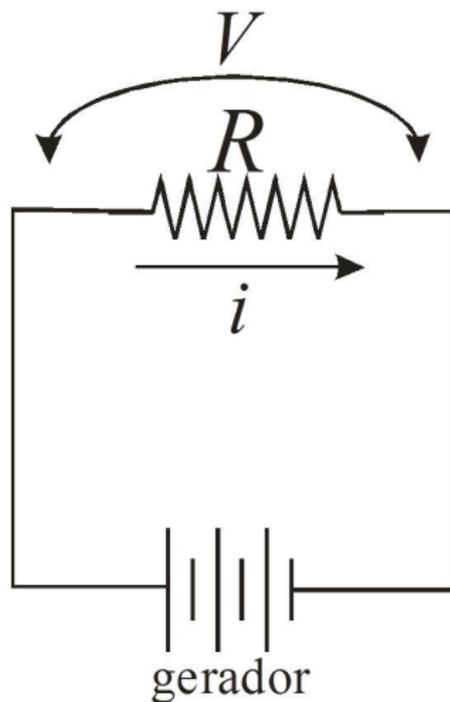
- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

- Familiarizar-se com equipamentos do laboratório
 - ▶ Como realizar medidas elétricas
 - ★ Fontes, multímetros, etc.
- Medir as curvas características de alguns componentes simples
 - ▶ Resistor comercial
 - ▶ LED

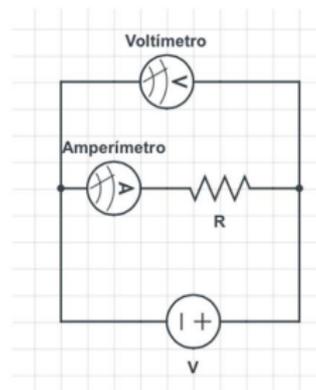
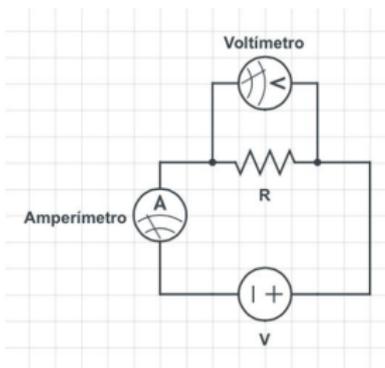
- Verificar no roteiro do experimento no site
- OS GRUPOS somente poderão usar o laboratório após apresentar esta atividade resolvida

- Medir a curva característica de um resistor comercial ($R = 10k\Omega$)
 - ▶ Medir para tensões positivas e negativas
- Medir a curva característica do LED
 - ▶ Meça na polarização direta
 - ★ Não ultrapasse de 3,5 V para não queimar o LED
 - ▶ Tente reverter a polarização e descreva o que você observa em termos de corrente e luz
 - ▶ Determine i_0 , n e R_{int}
 - ▶ Use um resistor de $R = 100 \Omega$ para medir a corrente com um voltímetro

- Utilizando um circuito elétrico simples
 - ▶ Mede-se a tensão elétrica sobre o resistor
 - ▶ Mede-se a corrente que flui sobre o mesmo
 - ▶ Faz-se o gráfico apropriado



- Utiliza-se um voltímetro para medir a tensão no resistor
- E um amperímetro para medir a corrente no resistor
- Duas opções de circuito elétrico
 - ▶ Qual é melhor?
 - ▶ Lembrem-se do experimento feito em Fís. Exp. II

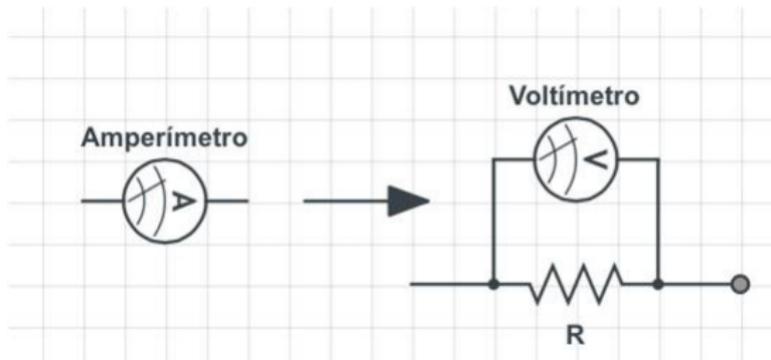


Outro detalhe experimental

- Amperímetros são instrumentos sensíveis
 - ▶ Evite usar amperímetros
 - ▶ O que fazer?
 - ★ Substitua um amperímetro por um voltímetro e um resistor em paralelo. Meça a voltagem no resistor e use a relação

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

para calcular a corrente. Utilize $R = 100 \Omega$ para este fim.

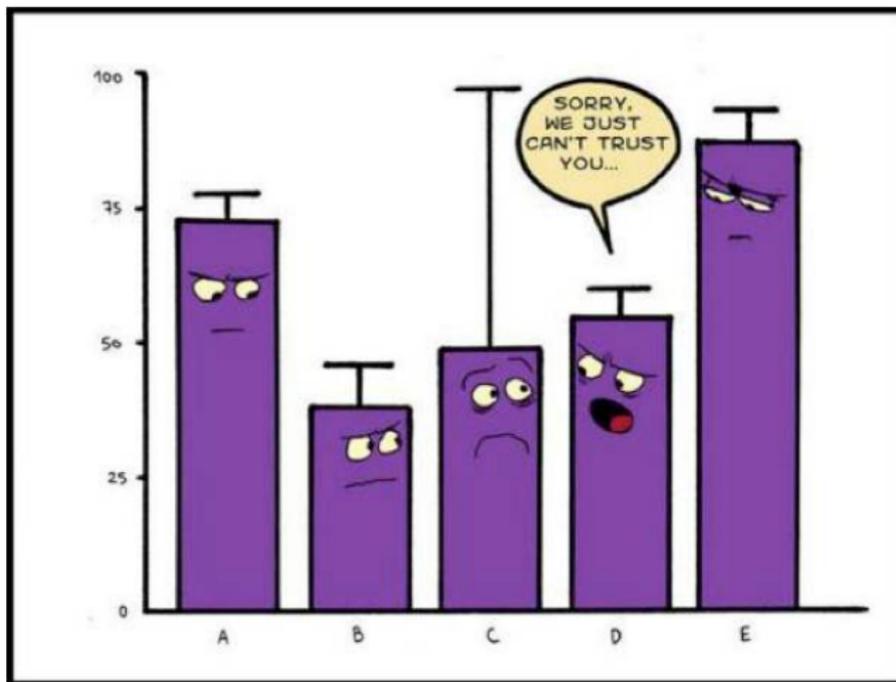


1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo



Revido alguns conceitos sobre incertezas

1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

O método científico

- A verificação e falsificação - Einstein: “No amount of experimentation can ever prove me right; a single experiment can prove me wrong.”

http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_method

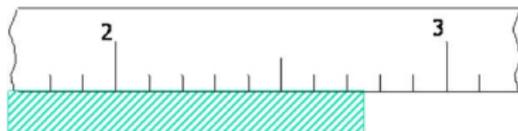
<http://www.unicamp.br/~chibeni/textosdidaticos/metodocientifico.pdf>



- Uma medida é sempre uma comparação com um padrão
- Sujeita a imperfeições e limitações
- Algarismos significativos
 - ▶ Todos que tenho certeza + primeiro duvidoso (estimado)

O método científico

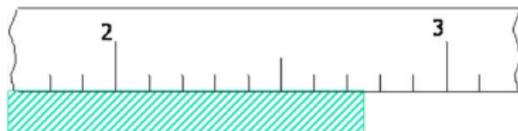
- Uma medida é sempre uma comparação com um padrão
- Sujeita a imperfeições e limitações
- Algarismos significativos
 - ▶ Todos que tenho certeza + primeiro duvidoso (estimado)



$$L = 2,74$$

O método científico

- Uma medida é sempre uma comparação com um padrão
- Sujeita a imperfeições e limitações
- Algarismos significativos
 - ▶ Todos que tenho certeza + primeiro duvidoso (estimado)

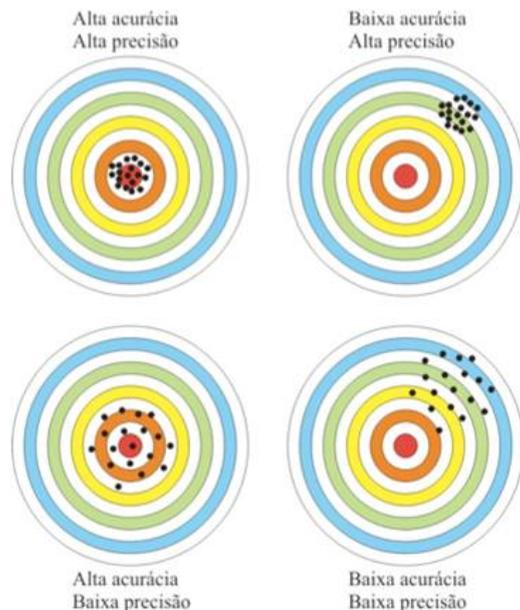


$$L = 2,74$$

- 2 e 7 tenho “certeza”
- 4 é uma estimativa → duvidoso

Acurácia e precisão

- **Precisão:** Relacionada à flutuação entre uma medida e outra
- **Acurácia:** Quão próximo você está do valor verdadeiro



- **Erro = valor verdadeiro - valor medido**
 - ▶ Toda medida experimental apresenta um erro
 - ▶ O valor do erro não pode ser conhecido
 - ▶ Vamos ver nesse semestre que existem dois tipos de erro, um relacionado à precisão e outro, à acurácia
- **Incerteza = melhor estimativa do valor do erro**

Representando uma medida

- Faz-se a medida e avalia-se a incerteza
- **Escreve-se a incerteza com, no máximo, 2 algarismos significativos**
- A grandeza acompanha a precisão da incerteza
- Exemplo:
 - ▶ Obtive estes valores na calculadora

$$\text{Tempo médio} = 2,8764536952 \text{ s}$$

$$\text{Incerteza} = 0,0456485323 \text{ s}$$

- ▶ Escrevo o resultado como:

Representando uma medida

- Faz-se a medida e avalia-se a incerteza
- **Escreve-se a incerteza com, no máximo, 2 algarismos significativos**
- A grandeza acompanha a precisão da incerteza
- Exemplo:
 - ▶ Obtive estes valores na calculadora

$$\text{Tempo médio} = 2,8764536952 \text{ s}$$

$$\text{Incerteza} = 0,0456485323 \text{ s}$$

- ▶ Escrevo o resultado como:

$$\text{Tempo médio} = (2,876 \pm 0,046) \text{ s}$$

ou

$$\text{Tempo médio} = (2,88 \pm 0,05) \text{ s}$$

1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

- Repetição de um experimento como ferramenta de avaliação da sua precisão
- Quanto mais eu repito, mais preciso se torna o valor médio
- Lei dos grandes números: se n tende ao infinito, o valor médio tende ao valor verdadeiro
 - ▶ Não havendo problemas de acurácia

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

se $n \rightarrow \infty$, $\bar{y} \rightarrow \tilde{y}$

- Avaliação da flutuação dos dados em torno da média da amostra (por não conhecermos o valor verdadeiro)
- Não reflete problemas de acurácia
- O desvio padrão é o correspondente à incerteza estatística de uma única medida realizada
- Cada medida, além da incerteza instrumental, possui uma incerteza estatística dada pelo desvio padrão

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y})^2} \sim \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Desvio padrão da média

- De um conjunto de medidas, obtemos o seu valor médio
- Agora suponha que possamos repetir esse conjunto de medidas k vezes e, em cada caso, obtém-se um valor médio
- Incerteza estatística (precisão) do **valor médio** de uma amostra

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \tilde{y})^2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

1 Experimento

- Experimento I
- Conceitos importantes
- Curvas características
- Medidas elétricas
- O diodo LED
- Atividades da semana I

2 Incertezas

- Representação de uma medida
- Estatística
- Exemplo

Revendo a análise de queda livre do Pelletron

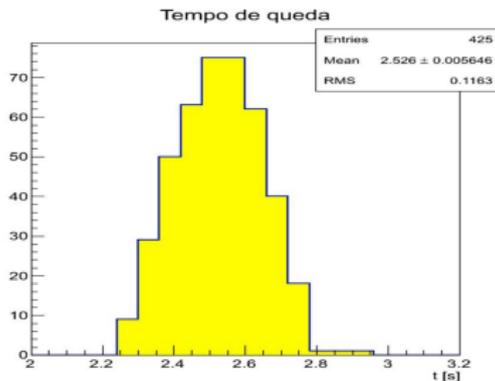
- Medida de tempo de queda de balões de água
- Quase quinhentas medidas
- Análise estatística
- A aceleração obtida é compatível com a gravidade?

$$g_{IAG} = 9.7864 \text{ m/s}^2$$

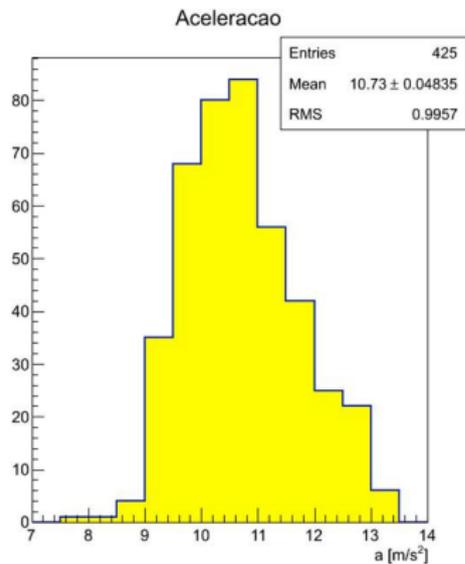
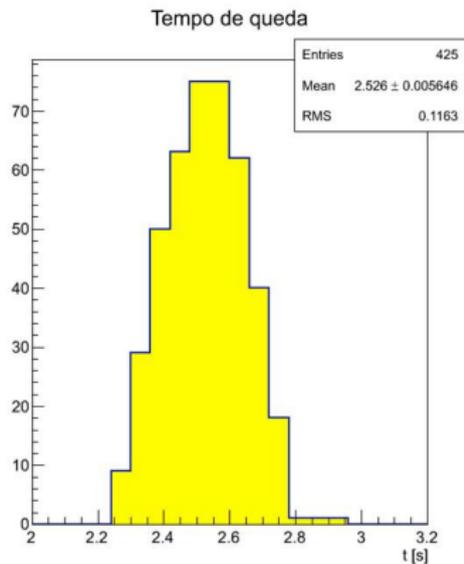


Medidas realizadas

Medida	Tempo (s)	Aceleração (m/s^2)
1	2,46	11,2
2	2,61	9,98
...
~500	2,73	9,12



Histogramas



Desvio padrão das medidas

- O desvio padrão é uma estimativa de quanto cada medida flutua em torno do valor médio da amostra
- Estimativa da incerteza de cada medida

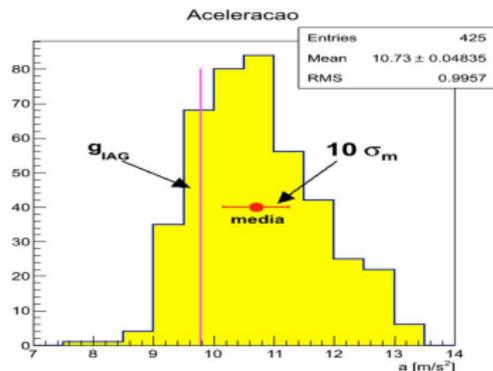
$$\sigma_{tempo} = 0,12 \text{ s}$$

$$\sigma_{acelera} = 1,00 \text{ m/s}^2$$

Medida	Tempo (s)	Aceleração (m/s ²)
1	2,46	11,2
2	2,61	9,98
...
~500	2,73	9,12

Acurácia e precisão da medida

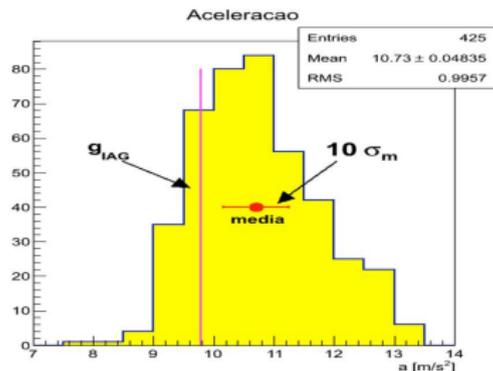
- Os valores de aceleração são precisos e acurados?
- Precisão:**
 - Desvio padrão: $\sigma_{acel} = 1 \text{ m/s}^2$
 - $\sim 10 \%$ do valor de g
 - $g_{IAG} = 9,7864 \text{ m/s}^2$
 - $g_{medio} = 10,73 \pm 0,05 \text{ m/s}^2$



Acurácia e precisão da medida

- Os valores de aceleração são precisos e acurados?
- Precisão:**
 - Desvio padrão: $\sigma_{acel} = 1 \text{ m/s}^2$
 - $\sim 10 \%$ do valor de g
 - $g_{IAG} = 9,7864 \text{ m/s}^2$
 - $g_{medio} = 10,73 \pm 0,05 \text{ m/s}^2$
- Acurácia:**

$$\frac{g_{medio} - g_{IAG}}{\sigma_m} = 19$$



- Como investigar a diferença entre o valor médio e o valor do IAG?
- **Hipóteses teóricas**
 - ▶ Desprezamos a resistência do ar
 - ★ Se fosse importante iria diminuir a aceleração e não aumentar

- Como investigar a diferença entre o valor médio e o valor do IAG?

- **Hipóteses teóricas**

- ▶ Desprezamos a resistência do ar
 - ★ Se fosse importante iria diminuir a aceleração e não aumentar
- ▶ Velocidade inicial diferente de zero
 - ★ Equação horária

$$y = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

- ★ Para a aceleração ser igual ao valor do IAG, teríamos que ter

$$v_0 = 1,1 \text{ m/s}$$

- ★ Valor muito elevado se comparado ao método utilizado para lançar as bolas

- Como investigar a diferença entre o valor médio e o valor do IAG?

- **Hipóteses teóricas**

- ▶ Desprezamos a resistência do ar
 - ★ Se fosse importante iria diminuir a aceleração e não aumentar
- ▶ Velocidade inicial diferente de zero
 - ★ Equação horária

$$y = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

- ★ Para a aceleração ser igual ao valor do IAG, teríamos que ter

$$v_0 = 1,1 \text{ m/s}$$

- ★ Valor muito elevado se comparado ao método utilizado para lançar as bolas
- ▶ A revisão das hipóteses teóricas não parece resolver a discrepância

- Como investigar a diferença entre o valor médio e o valor do IAG?
- **Rever o procedimento experimental**
 - ▶ O disparo do cronômetro foi auditivo
 - ★ Som tem velocidade de ~ 340 m/s
 - ★ Torre tem altura de 34 metros
 - ★ Ouvimos o som 0,1 segundo depois que a bola começa a cair

- Como investigar a diferença entre o valor médio e o valor do IAG?
- **Rever o procedimento experimental**
 - ▶ O disparo do cronômetro foi auditivo
 - ★ Som tem velocidade de ~ 340 m/s
 - ★ Torre tem altura de 34 metros
 - ★ Ouvimos o som 0,1 segundo depois que a bola começa a cair
 - ★ Ou seja, o tempo medido é sistematicamente menor que o tempo de queda por aproximadamente 0,1 segundo
 - ★ O que acontece se somarmos 0,1 segundo em todos os tempos de queda?

Tentando corrigir problemas de acurácia

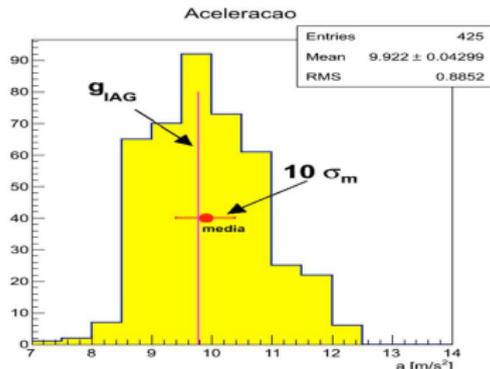
- Acrescentando 0,1 segundo em todos os tempos

- **Precisão:**

- ▶ Desvio padrão: $\sigma_{acel} = 0,9$ m/s²
- ▶ $\sim 10\%$ do valor de g
- ▶ $g_{IAG} = 9,7864$ m/s²
- ▶ $g_{medio} = 9,92 \pm 0,04$ m/s²

- **Acurácia:**

$$\frac{g_{medio} - g_{IAG}}{\sigma_m} = 3$$



- A repetição exaustiva do experimento permitiu realizar uma análise estatística que evidenciava um problema no procedimento adotado para analisar os dados
- Isso só foi possível porque essa repetição permitiu avaliar as incertezas envolvidas, principalmente a incerteza na aceleração medida
- Em muitas situações não podemos repetir o experimento à exaustão
 - ▶ custa caro, leva muito tempo, etc.
- Como proceder se fizemos apenas uma medida de tempo?
- Qual a incerteza no tempo e aceleração?

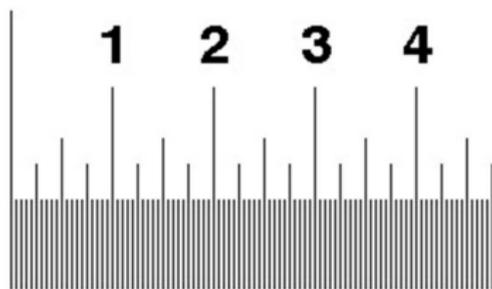
E se não for possível repetir?

- Nas medidas diretas, tente estimar qual seria a flutuação obtida caso você repetisse o experimento



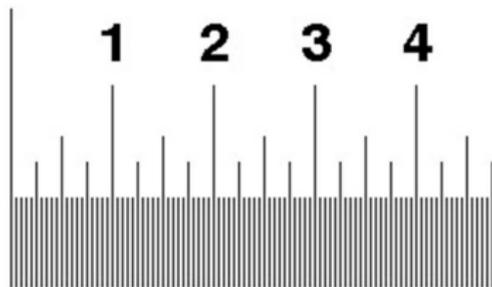
E se não for possível repetir?

- Nas medidas diretas, tente estimar qual seria a flutuação obtida caso você repetisse o experimento
- Em instrumentos com escalas simples desenhadas, como réguas, em geral utiliza-se metade da menor divisão



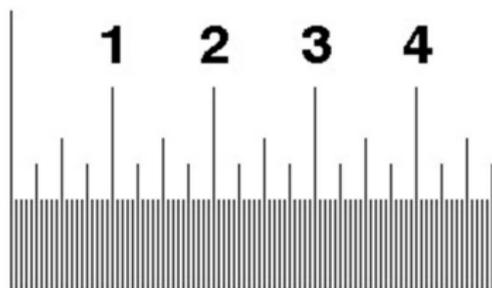
E se não for possível repetir?

- Nas medidas diretas, tente estimar qual seria a flutuação obtida caso você repetisse o experimento
- Em instrumentos com escalas simples desenhadas, como réguas, em geral utiliza-se metade da menor divisão
- Em instrumentos digitais essa informação está disponível no manual do instrumento



E se não for possível repetir?

- Nas medidas diretas, tente estimar qual seria a flutuação obtida caso você repetisse o experimento
- Em instrumentos com escalas simples desenhadas, como réguas, em geral utiliza-se metade da menor divisão
- Em instrumentos digitais essa informação está disponível no manual do instrumento
- Avalie a precisão humana
 - ▶ Por exemplo, o tempo de reação para disparar e parar um cronômetro



E se não for possível repetir?

- Nas medidas diretas, tente estimar qual seria a flutuação obtida caso você repetisse o experimento
- Em instrumentos com escalas simples desenhadas, como réguas, em geral utiliza-se metade da menor divisão
- Em instrumentos digitais essa informação está disponível no manual do instrumento
- Avalie a precisão humana
 - ▶ Por exemplo, o tempo de reação para disparar e parar um cronômetro
- E grandezas derivadas?
 - ▶ Propagação de incertezas

