



# Física Experimental III

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

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

## Aula 3

Prof. Alexandre Suaide

Ramal: 7072

Ed. Oscar Sala (Pelletron), sala 246

## 3 assuntos a serem discutidos

- Atividades da semana passada
  - Alguns conceitos teóricos
  - Análise dos dados
- Propagação de incertezas pelo método de Monte Carlo
- Experiências da semana
  - Diodo
  - Pilha comum

# Atividades da semana passada

- Alguns fundamentos teóricos
  - Transferência de potência para o meio
  - Temperatura de cor
  - O problema do corpo negro
    - Lei de Stephan-Boltzmann
- Análise dos dados



# Transferência de energia (calor) para o meio

- Ao transferir potência para uma lâmpada (ou resistor) esta potência tem que ser dissipada. Como?
- 3 métodos
  - Condução térmica
  - Convecção
  - Irradiação

# Troca de calor com o meio

- **Condução térmica (chuveiro elétrico)**
  - O calor é trocado por contato direto entre dois corpos
- **Convecção (panela de água)**
  - Troca de calor através do movimento do fluido aquecido
- **Irradiação (lâmpada)**
  - Emissão de radiação eletromagnética
  - Qualquer corpo aquecido emite e absorve radiação

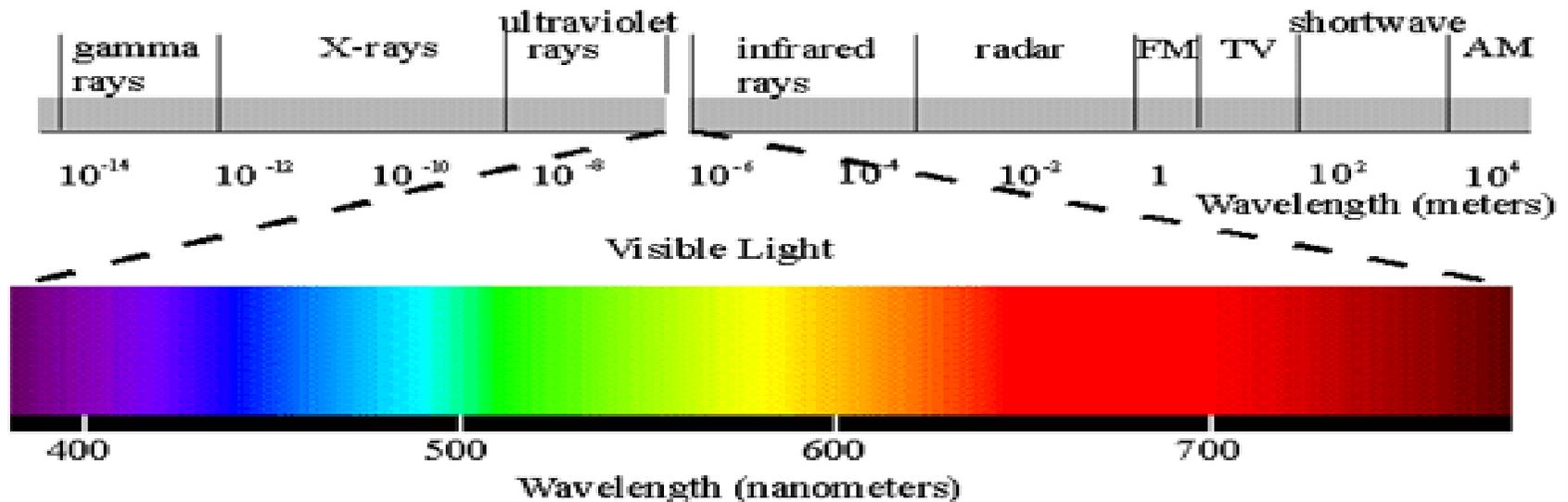


# Troca de calor em uma lâmpada comum

- Lâmpada composta de um filamento aquecido isolada por um gás inerte com baixa pressão
  - A baixa pressão e o tipo de gás minimizam as trocas de calor por condução e convecção
  - Principal mecanismo de troca de calor é a irradiação
- Como investigar estas hipóteses?
  - Medindo potência em função da temperatura da lâmpada
  - O que nós esperamos desta curva?

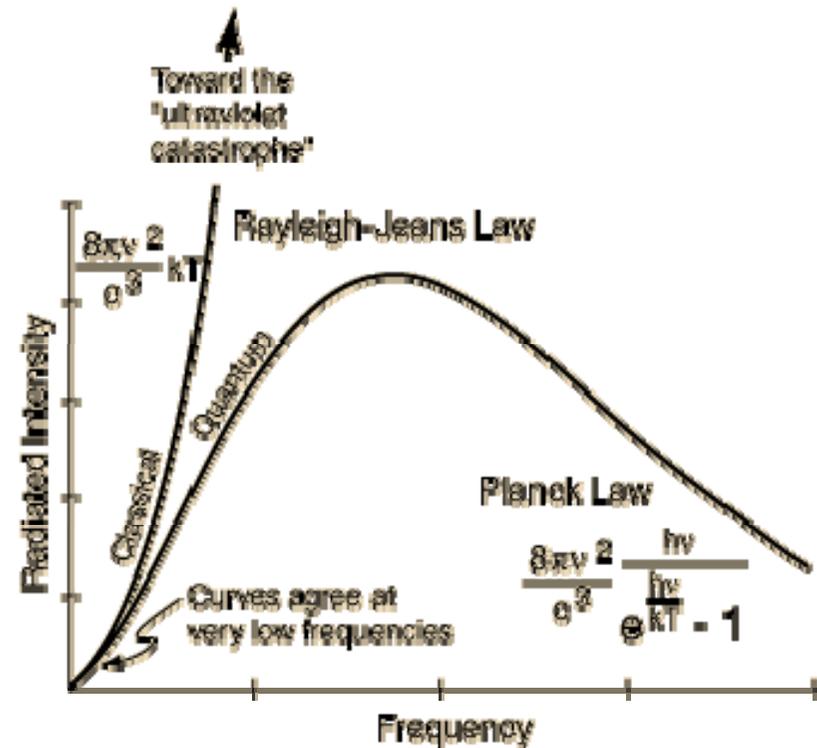
# O que é irradiação térmica?

- Qualquer corpo emite radiação eletromagnética
  - Agitação das moléculas (cargas) gera radiação EM.
  - Os comprimentos de onda desta radiação dependem da temperatura do corpo
    - Luz visível corresponde a uma pequena faixa de comprimentos de onda



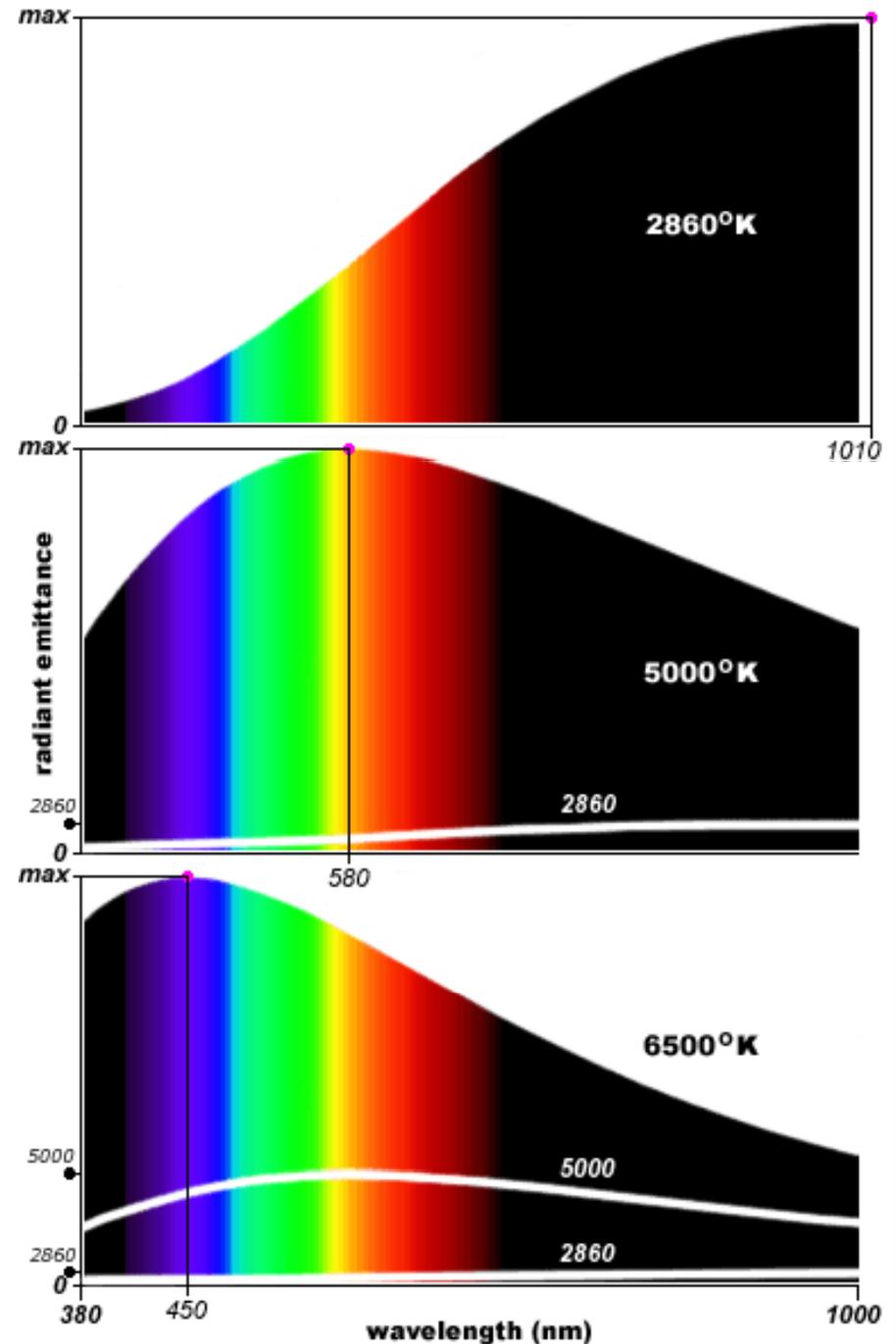
# Irradiação eletromagnética: O corpo negro

- Final do séc. XIX
  - Revolução industrial, metalurgia
  - Estudar como corpos aquecidos emitiam radiação como forma de aprimorar processos industriais
  - Vários modelos mas todos incompletos
- Planck desvenda o problema em 1901
  - Radiação de corpo negro
  - Iniciou a Mecânica Quântica
  - Vejam livros de Física Moderna



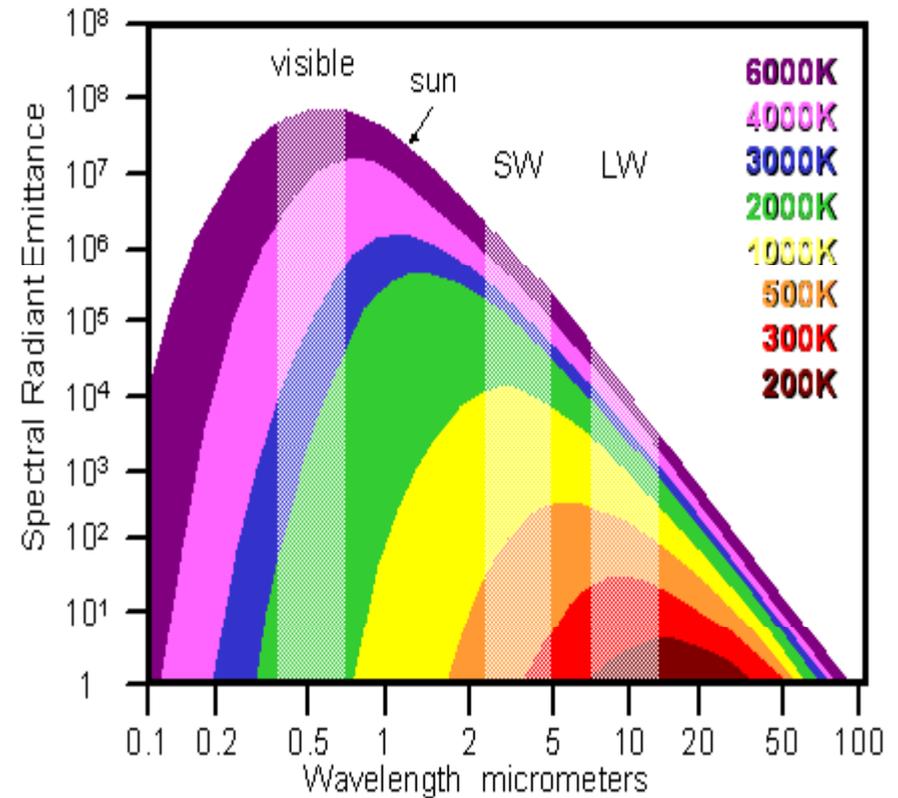
# Temperatura de cor

- Corpos mais frios emitem muito no infravermelho
- Corpos mais quentes emitem mais para o visível e ultra-violeta
- Dependendo da cor do corpo, podemos associar uma temperatura



# Lei de Stephan-Boltzmann

- Quanto maior a temperatura, maior a potência emitida
- Comprimento de onda máximo depende da temperatura
- Um corpo que dissipa potência por radiação EM o faz em uma proporção tal que:



$$P = \sigma T^4$$

$R_0 (\Omega)$	$SR_0 (\Omega)$
22,1	0,621

Tabela 1: Valores de  $R_0$  com ohmímetro.

- Medida de  $R_0$ 
  - Ohmímetro
  - Curva característica a baixa potência
    - Resíduos mostram que lâmpada não é ôhmica a partir de certo ponto
- Curva característica e  $P \times T$ 
  - Qual a idéia do ajuste linear na curva característica
  - $P$  proporcional a  $T^4$  sempre ou há outros processos em baixas temperaturas?
  - Escala log!!!!

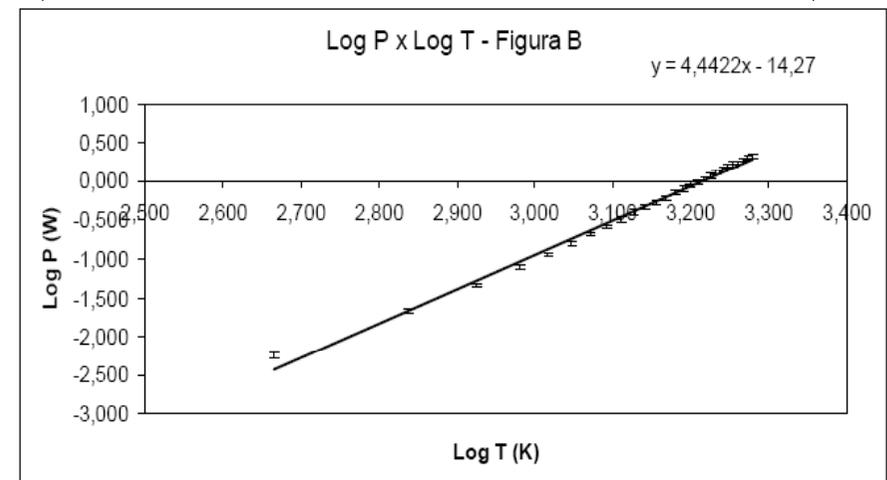
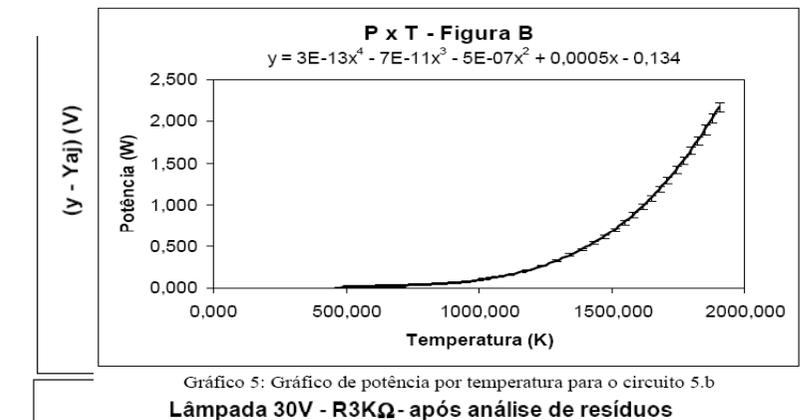
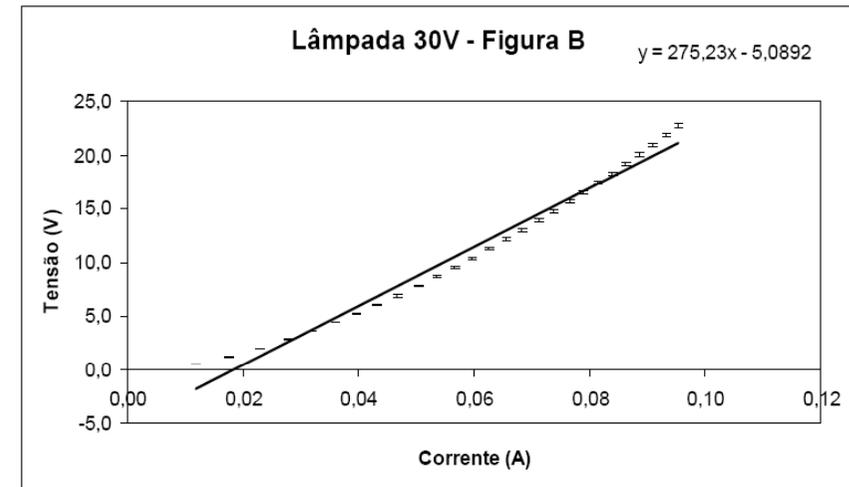


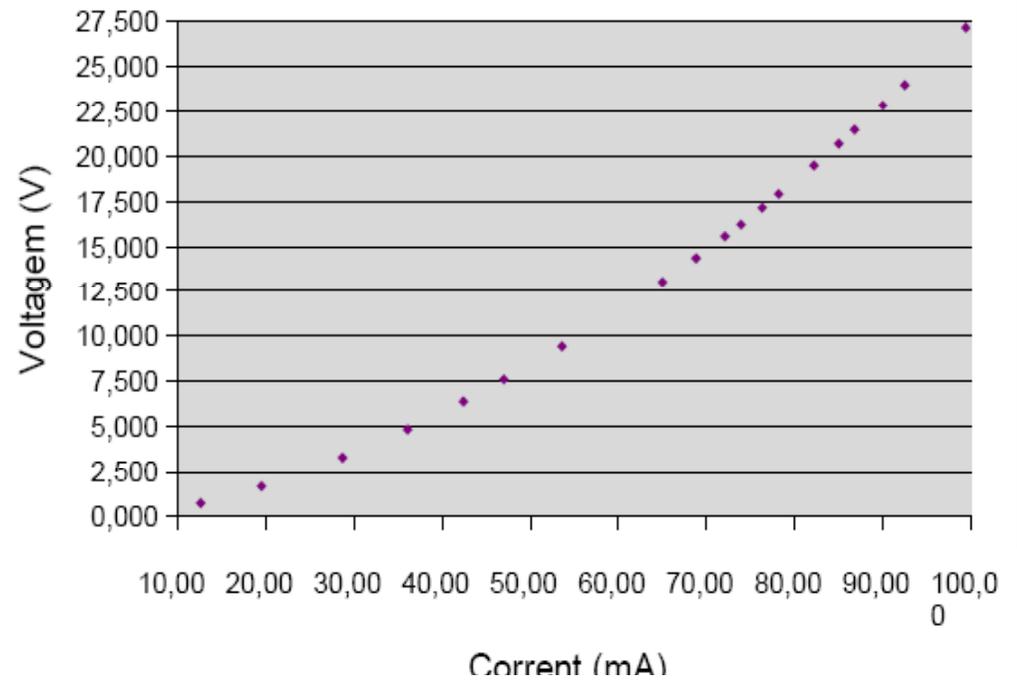
Gráfico 6: Gráfico log-log de potência por temperatura.

# A02

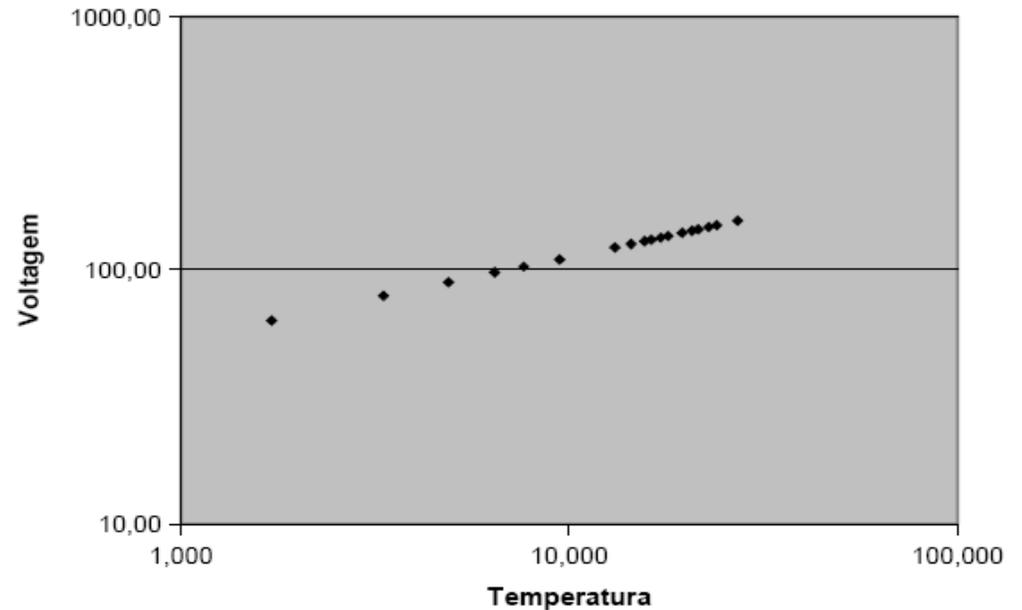
## Resistencia a temperatura a

- R0 foi medido com o Ohmímetro, circuito ou com os dois?
  - Incertezas, ajustes?
- Curva característica
  - Incertezas?
- Gráfico de P x T
  - Voltagem ou Potência?
  - Como calculou a temperatura?
  - Curva ajustada

### Curva Característica



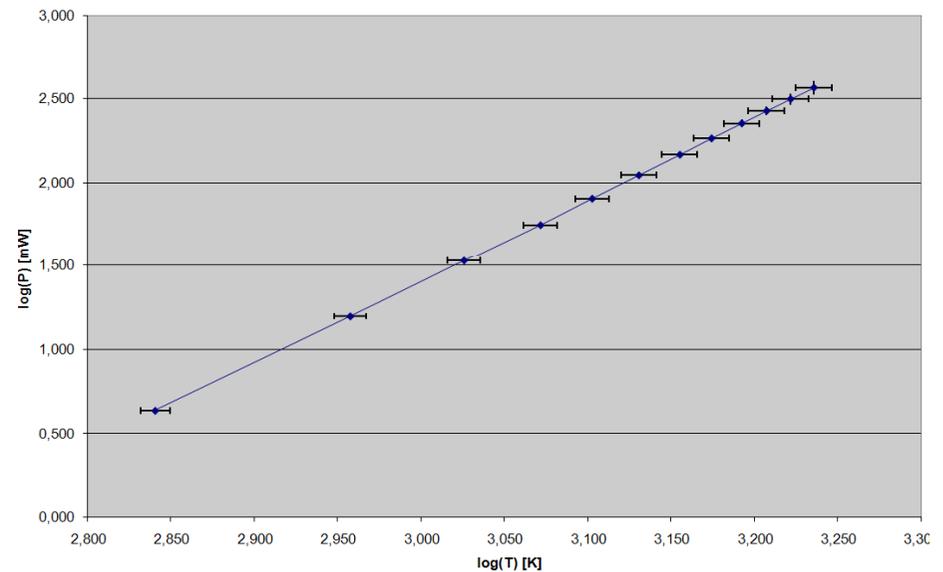
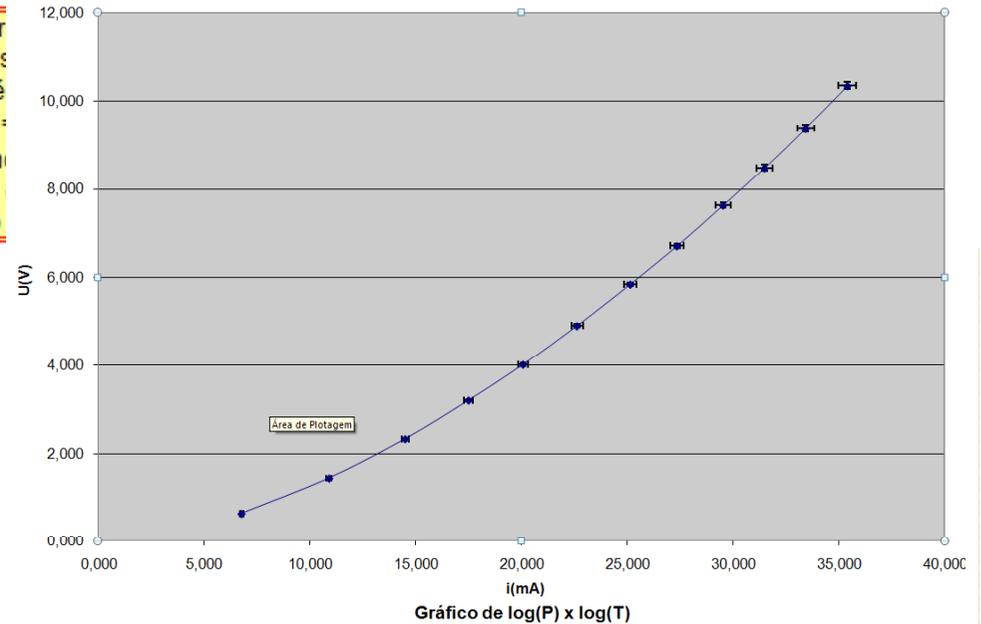
### Voltagem em Funcao da temperatura em logxlog



# A03

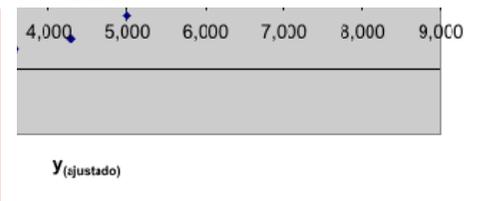
Chegamos à expr  
correspondem res  
 $U = Ri$ , onde  $R$  é  
experimento:  $U_{(i)}$   
ria à algo em torn  
ôhmico, uma vez  
para o parâmetro

- Medida de  $R_0$ 
  - Dados a baixas correntes não são compatíveis com Ohmímetro
  - Quem é  $V$  e  $i$  medido?
- Curva característica e  $P \times T$ 
  - A escala está adequada?
  - Qual o valor das temperaturas e potências?
    - Precisa conta



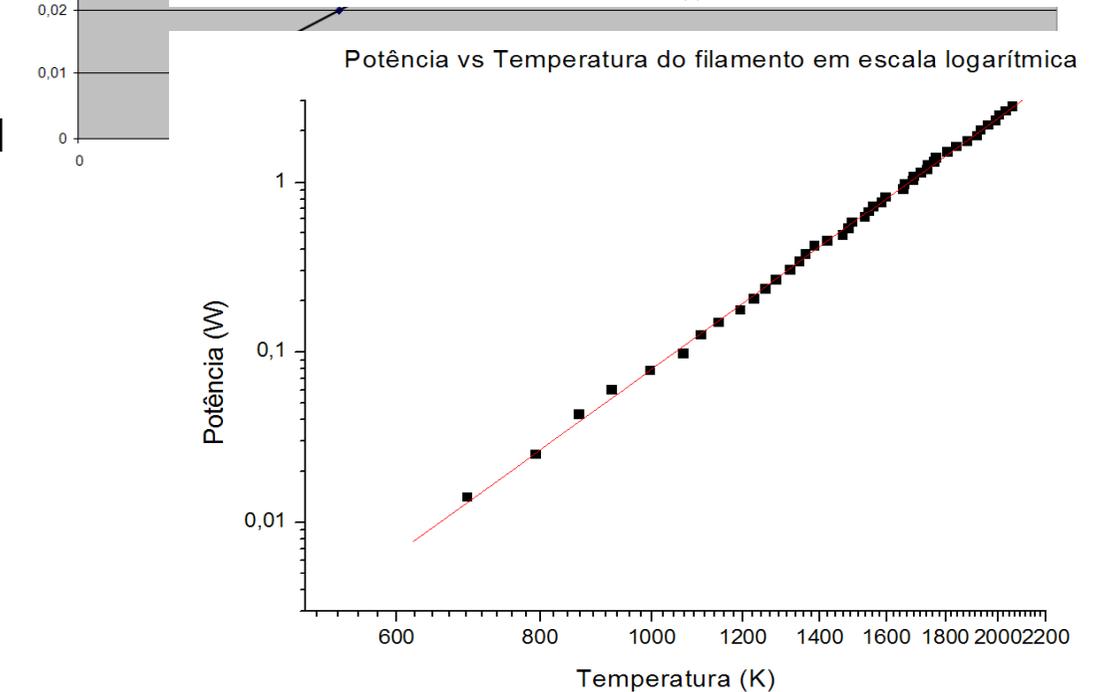
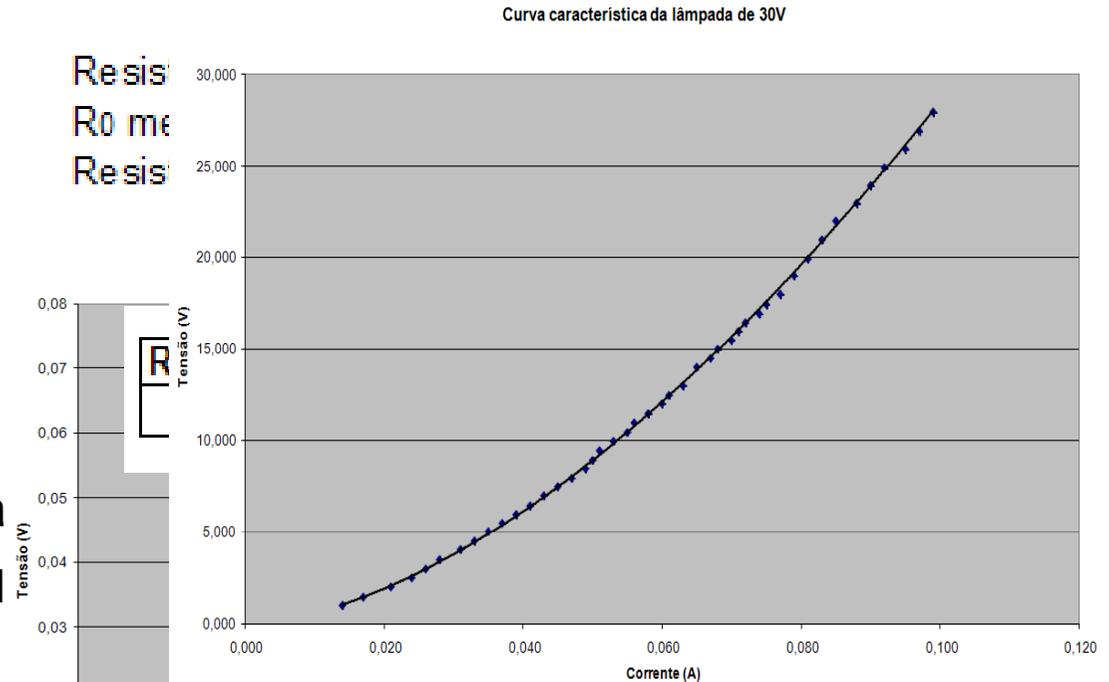
Chegamos à expressão  $y = ax + b$ , onde  $y$  é  $\log(P)$  e  $x$  é  $\log(T)$ , portanto podemos reescrever essa expressão da seguinte maneira:  $\log(P) = \log(T^a) + \log(k)$ , onde  $k = 10^b$ . Podemos novamente reescrever a expressão acima como:  $\log(P) = \log(kT^a)$ , de onde concluímos que:

$$P_{(T)} = (10^{-13,0,19}) \times T^{4,808}$$



# A04

- Medidas de  $R_0$ 
  - Ohmímetro
  - Baixas correntes
- Curva característica
  - Qual a função ajustada
- Potência vs. Temperatura
  - Qual a função ajustada os parâmetros encontrados?
  - Incertezas?



# A05

- Medindo  $R_0$ 
  - Ohmímetro
    - Incerteza?
  - Baixas correntes
    - Qual o valor ajustado?
- Curvas características  $P \times T$ 
  - Ajustes polinomiais
  - Como escolher o grau do polinômio e o que isto significa?

Resistência Lâmpada Ligada direto no Ohmímêtro

Gráfico 1

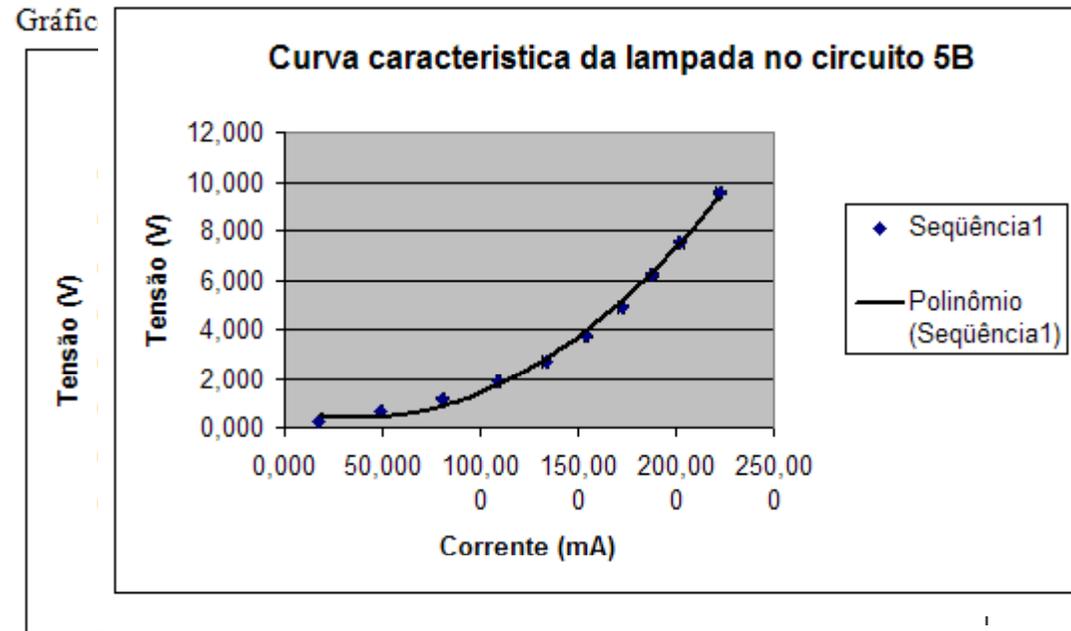
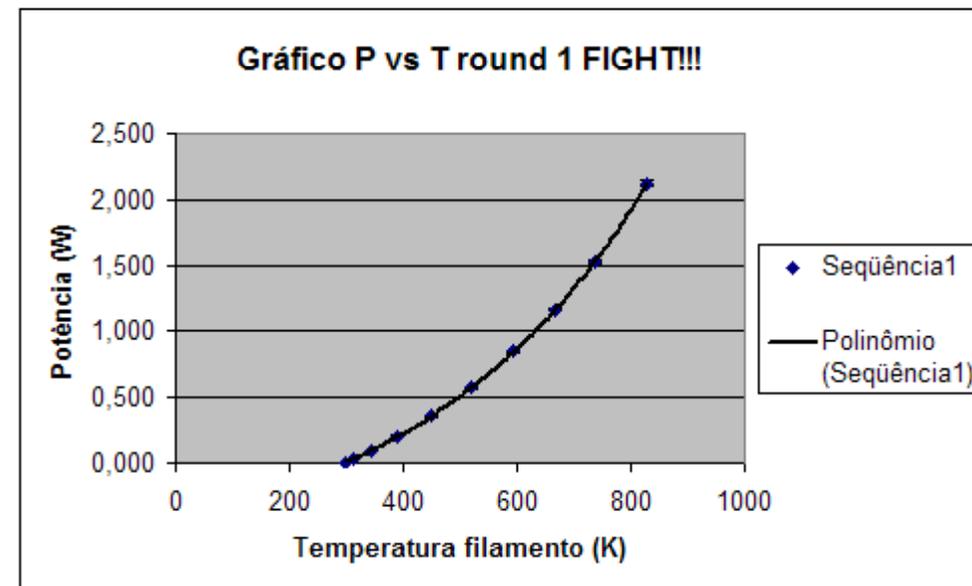


Gráfico 3



# A06

- Circuito 5.b
- Medida de  $R_0$ 
  - Baixas correntes
- Curva característica em correntes altas
  - Não ôhmico.
  - Ajuste por um polinômio de grau 2.
- Curva de  $P \times T$ 
  - Em altas temperaturas é compatível com SB.
  - Em baixas temperaturas. Outros processos?

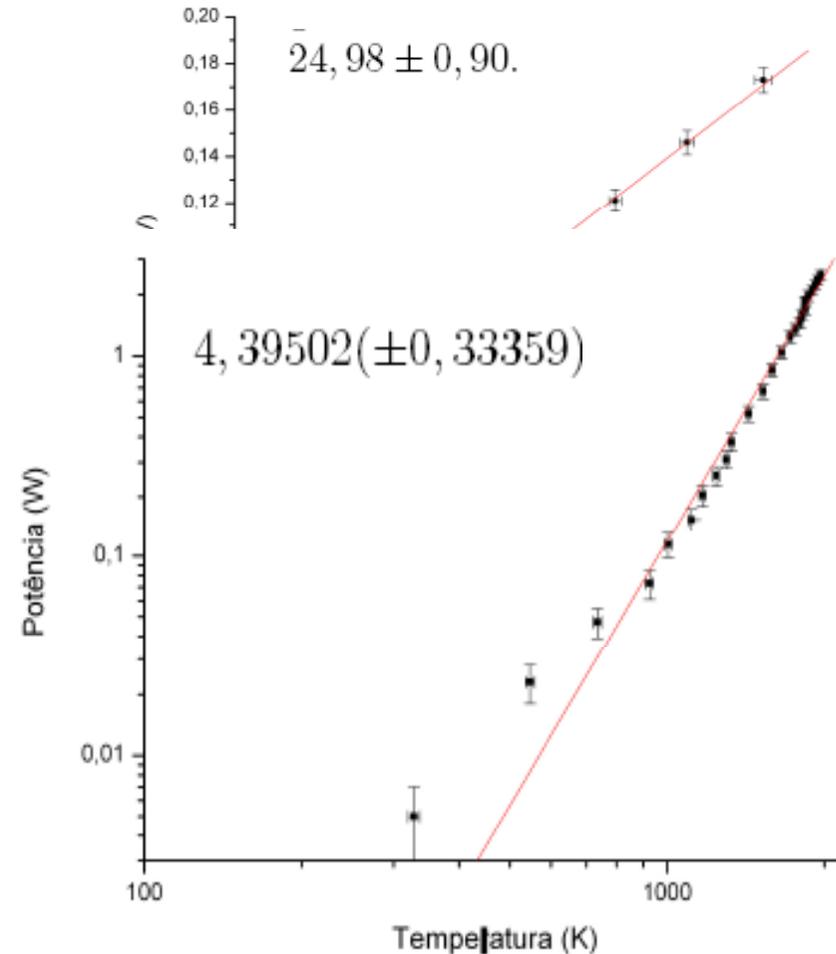


Figura 3: Gráfico de  $\log(P)$  por  $\log(T)$ .

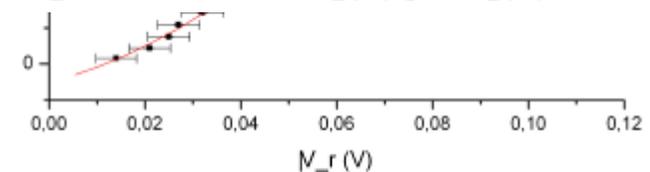
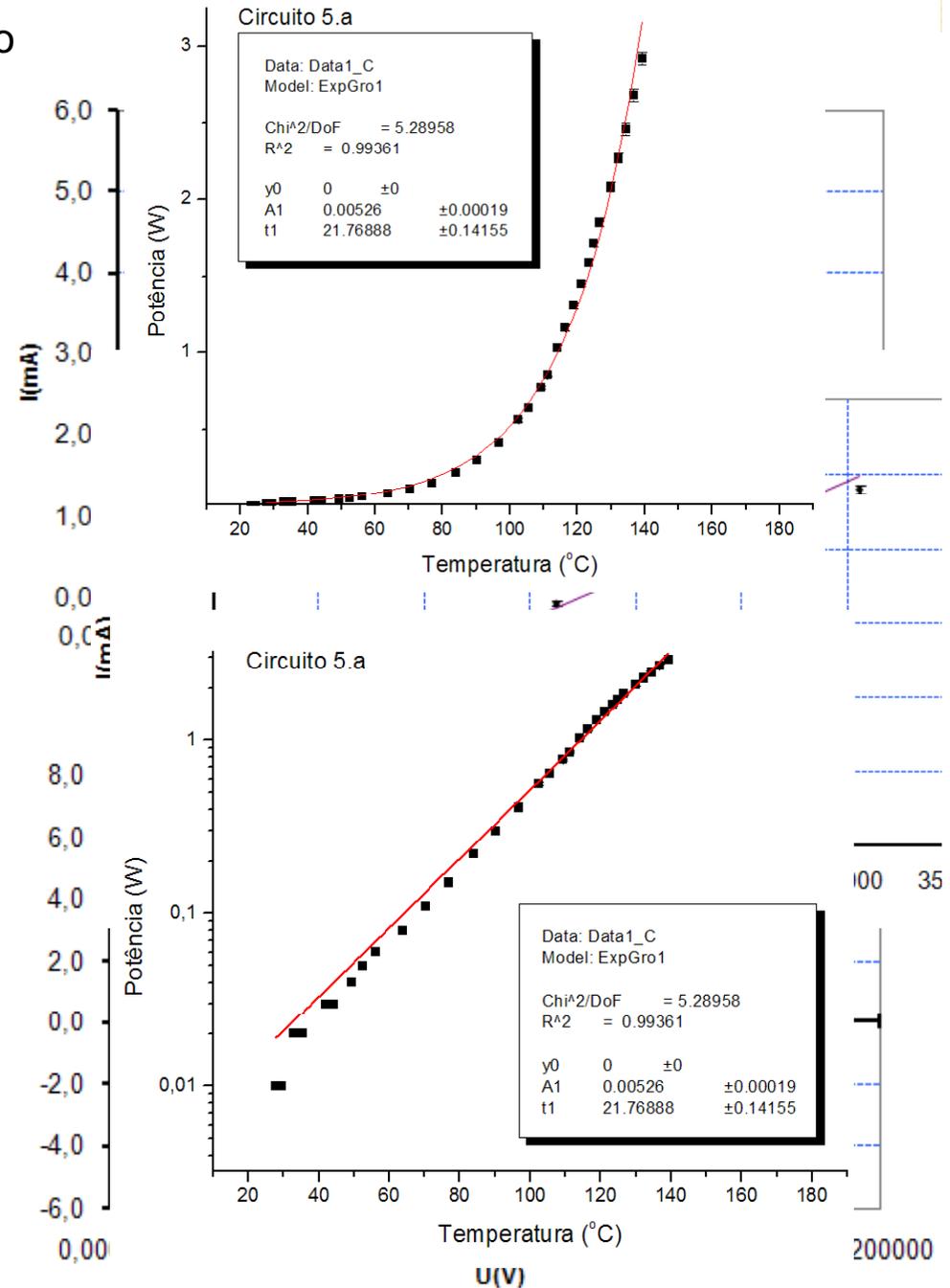


Figura 2: Curva característica do resistor.

# A07

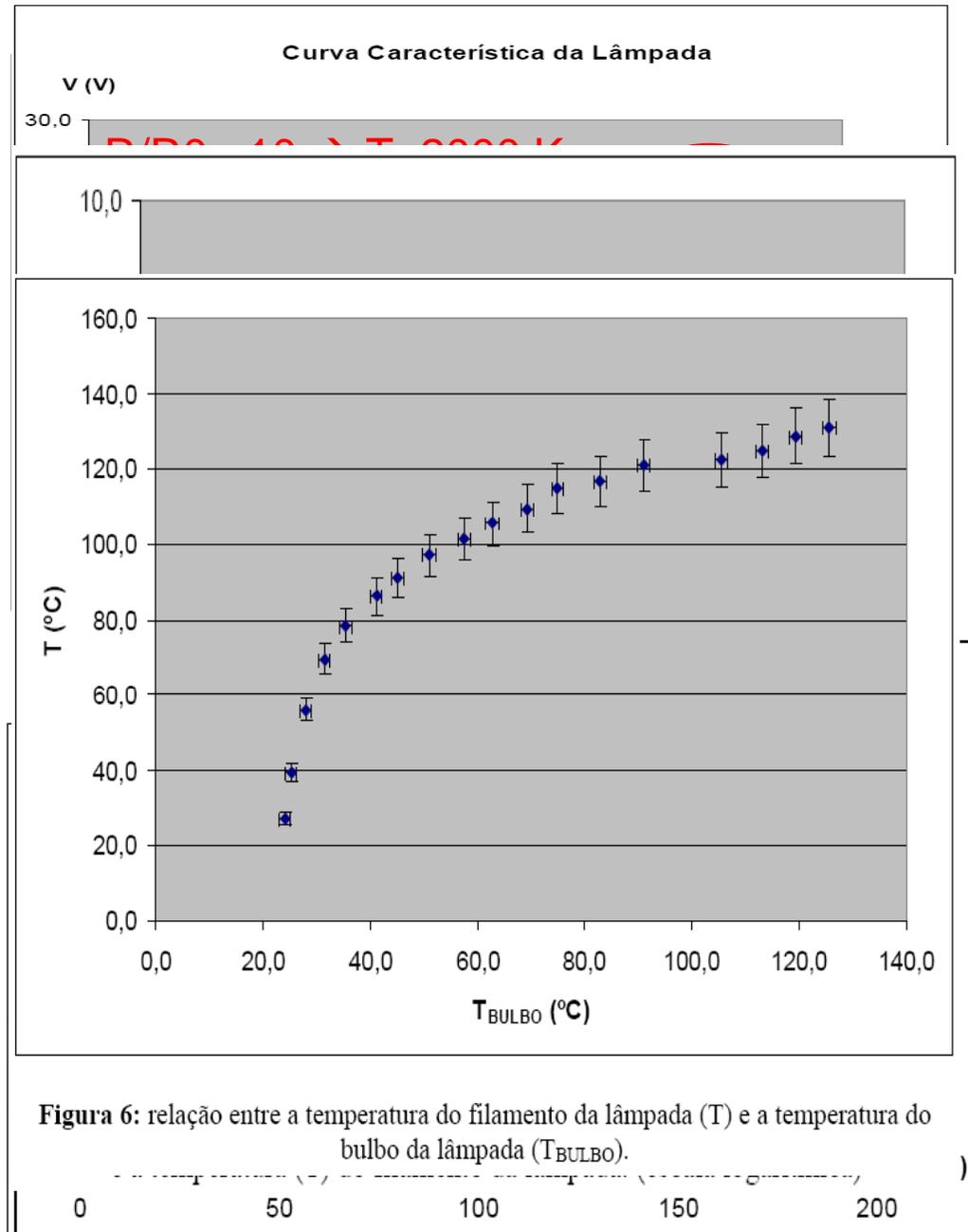
A relação funcional de P e T é do tipo  $P = P_0 + e^{(T/T_0)}$ , onde  $P_0$  e  $T_0$  são constantes (ver gráfico no origin)

- Medida de R0
  - Baixas correntes. Qual o valor de Rp?
  - Lâmpada é ôhmica somente no início.
  - Comparação com Ohmímetro?
- Curva característica
  - O que quer mostrar com ajuste de reta?
- P x T
  - Rever cálculo da temperatura



Resistência c/ Ohmímetro	
$R_0 (\Omega)$	$23,5 \pm 0,6$

- Medida de  $R_0$ 
  - Ohmímetro
  - Resistor de proteção
  - Análise de resíduos mostra que lâmpada estava na condição de ôhmica.
- Curva característica e P vs T
  - 150°C??? Checar cálculo de temperatura!
- S-B todo o tempo?
- Calibração do bulbo



**Figura 4:** relação entre a potência (P) fornecida à lâmpada e a temperatura (T) do filamento da lâmpada.

$(22,90 \pm 0,18)\Omega$

- Medida de R0
  - Com Ohmímetro
  - Medida também em baixas correntes
  - Nota-se desvio. O ajuste usou todos os pontos ou somente os primeiros?
    - Isto explica a discrepância no R0?

- Escolha do circuito
  - 5.a.  $R \sim 300 \Omega \gg R_A$ ?
  - Mas não é também  $\ll R_V$ ?

- Curva característica
  - Não linear, como esperado
  - $P \times T$  próximo de SB. Talvez porque usou todos os pontos

b) Através dos valores nominais da lâmpada e da lâmpada é muito maior que a resistência do amperímetro mais indicado. Assim, utilizando uma Fonte DC, u

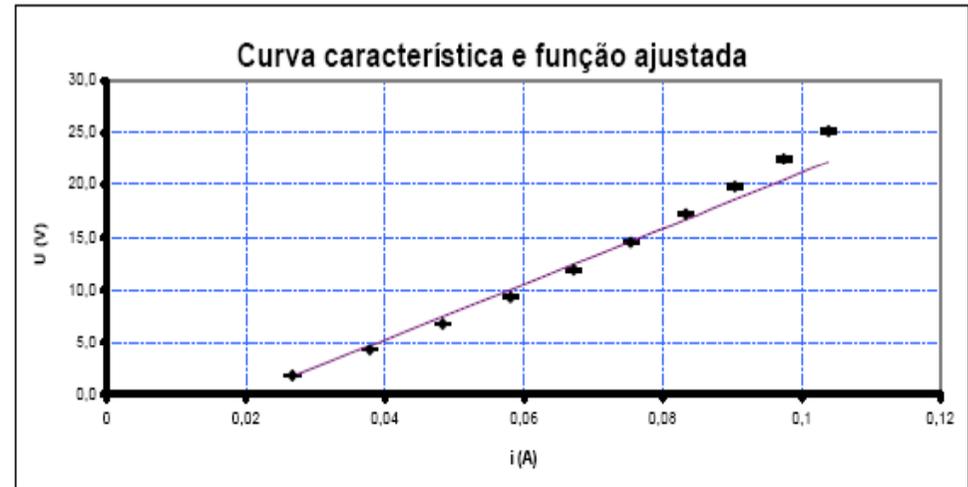
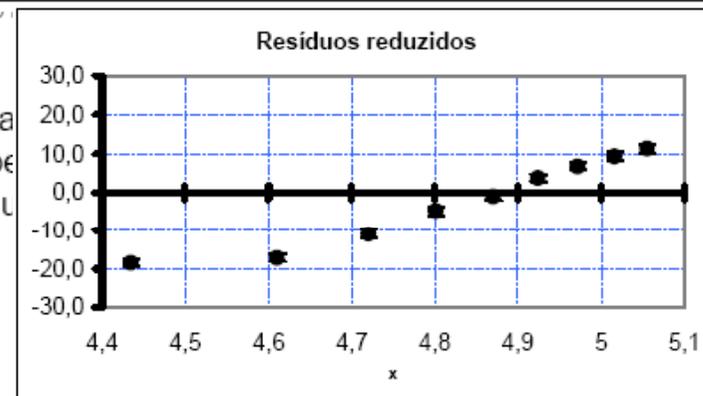
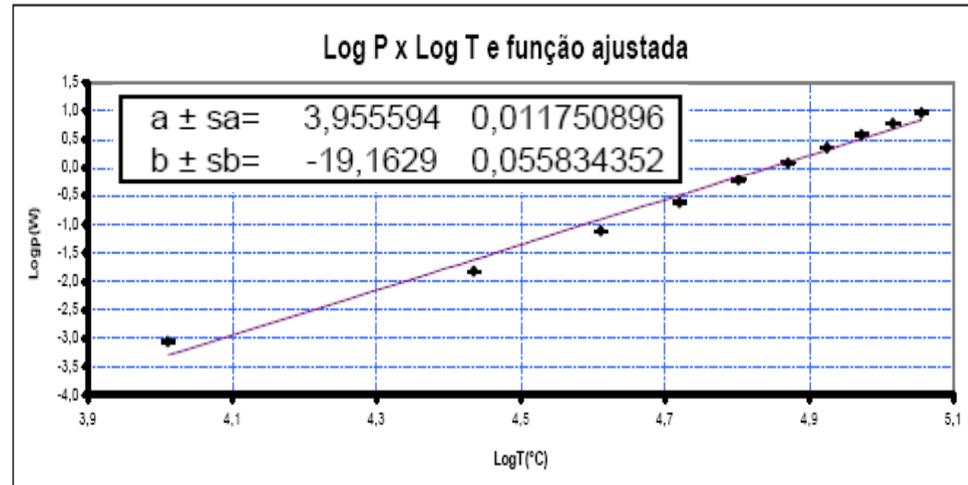


Gráfico 2 - Curva característica com a função ajustada da lâmpada de 30V



) ma

Resistência** (Ohms)	34,40±0,25
----------------------	------------

- Medida de R0
  - Ohmímetro + baixas correntes
  - Escolha dos pontos para o ajuste de acordo com análise
- Problema com arquivo corrompido

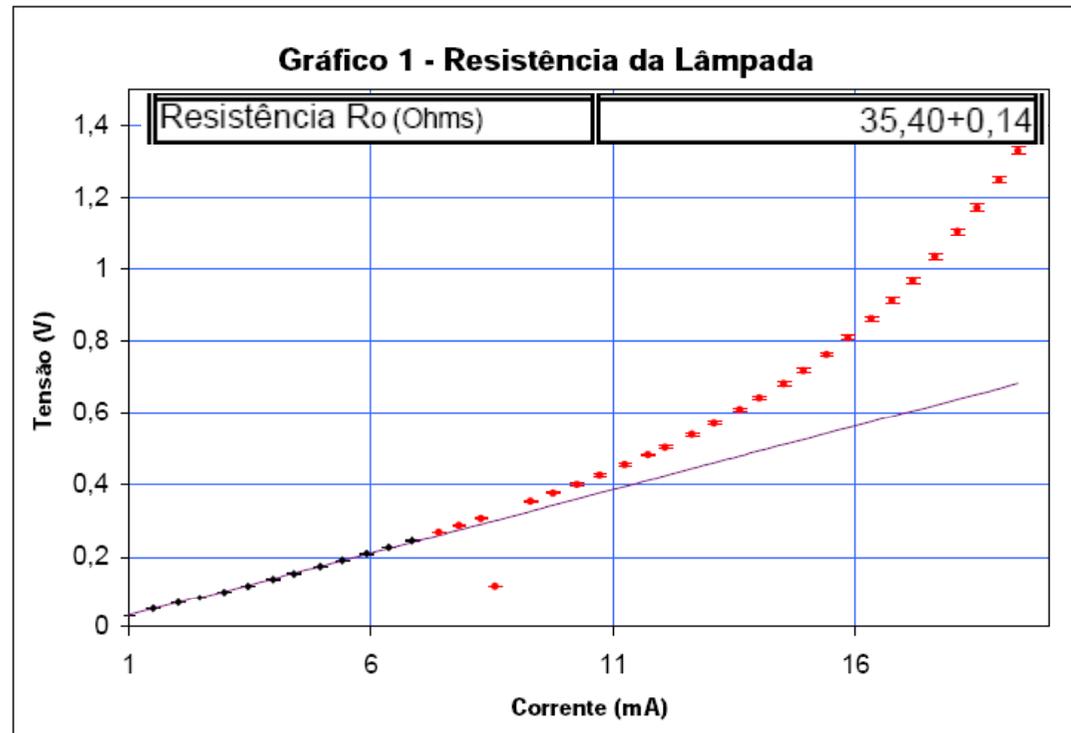


Gráfico 1 - Gráfico das valores medidos da tensão e corrente, sendo que os pontos em vermelho foram desprezados para o cálculo da resistência pois apresentam um desvio à reta, sendo que a hipótese adotada é que para tais medidas, o valor da temperatura da lâmpada já estivesse influenciando o valor da resistência. Um dos pontos vermelhos também se destaca por encontrar-se muito abaixo dos outros e acredita-se que tenha havido um erro por parte do medidor quando esse marcou o valor da tensão.

# AlI

- Que circuito usar.
  - Na dúvida, medir e comparar
  - Qual o critério de decisão?
- Medida de  $R_0$ 
  - Circuito 5.a com baixas correntes
  - Ohmímetro?
    - Pode ser compensado por análise de resíduos
- Gráfico de  $P \times T$ ;
  - Problemas?

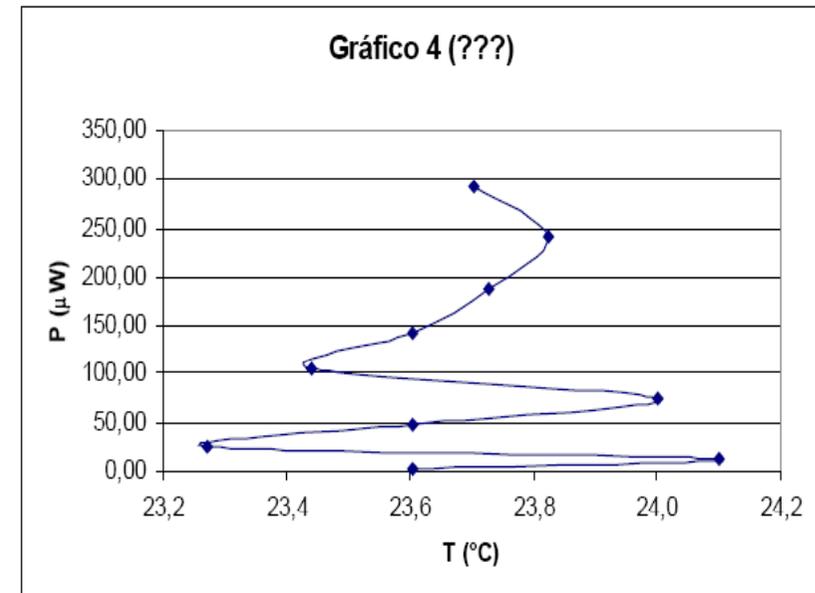
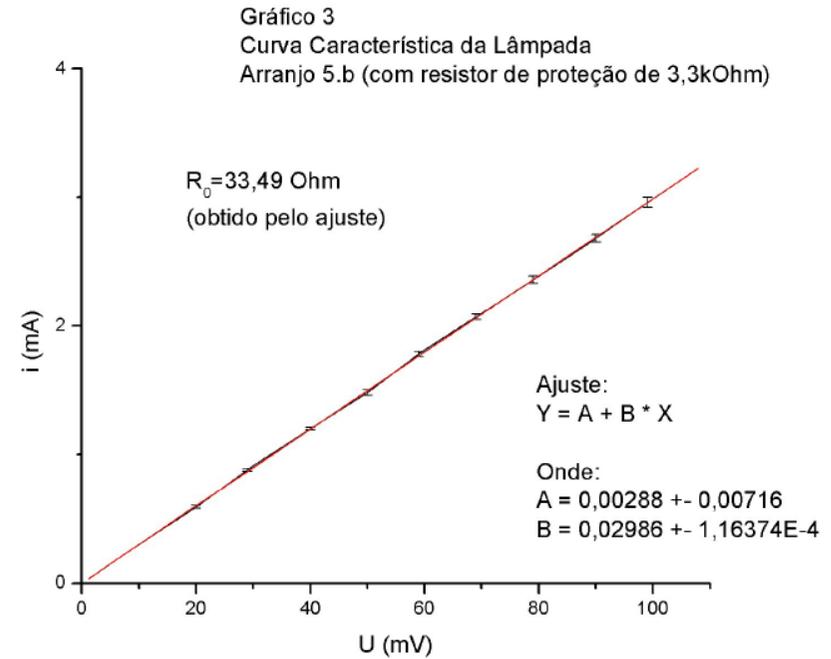
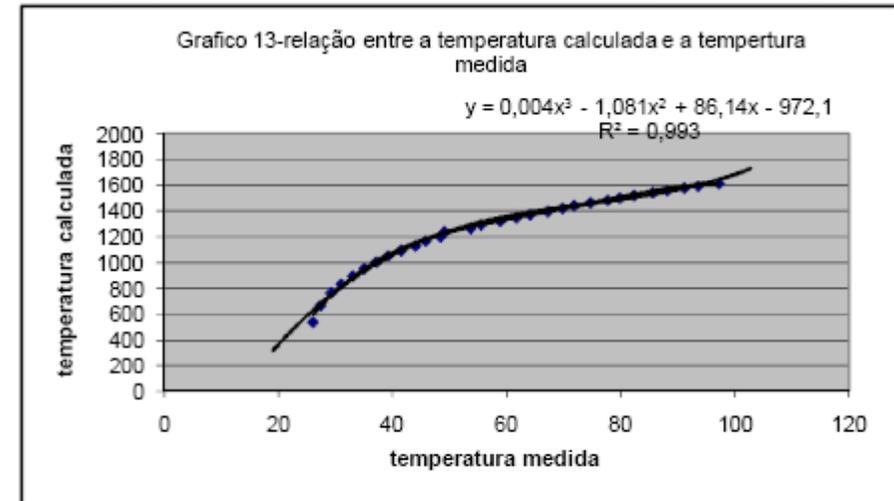
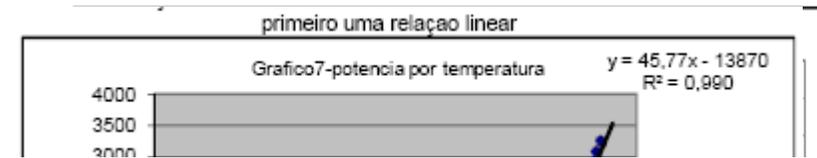


Gráfico 4: O aspecto estranho do gráfico  $P \times T$  nos faz crer que houve algum problema no tratamento dos dados, porém ainda não conseguimos identificá-lo.

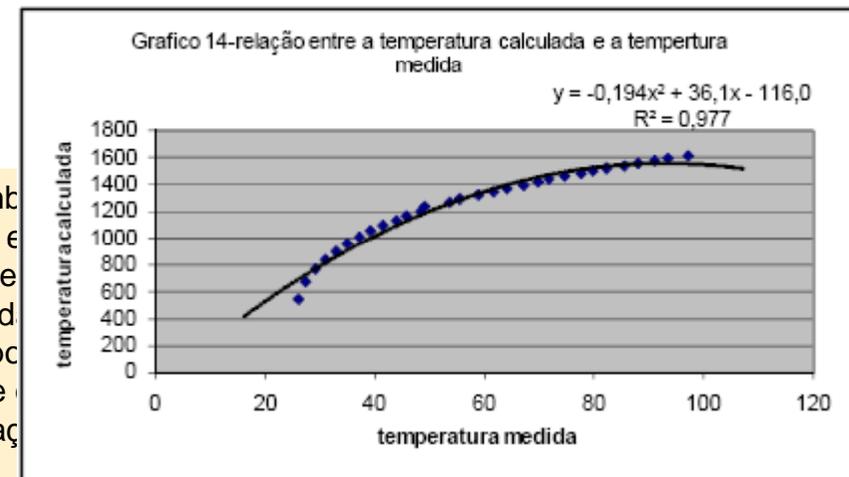
# A12

Tabela 2	resistencia obtida	S (resistencia obtida)
medição direta	34,3	0,74
com resistor	33,2	1,07

- Curva característica
  - Que circuito usou?
  - Checar!
- Medida de R0
  - Ohmímetro
    - 2 métodos (com e sem resistor em série)
  - Extrapolações
    - Algumas inconsistências
  - Comparações?
- P x T
  - Que valor de R0 foi usado?
  - Duas curvas diferentes?
  - Conclusões interessantes
- Tentativa de calibrar a temperatura do bulbo
  - É reproduzível?



propagação indica que não há relação

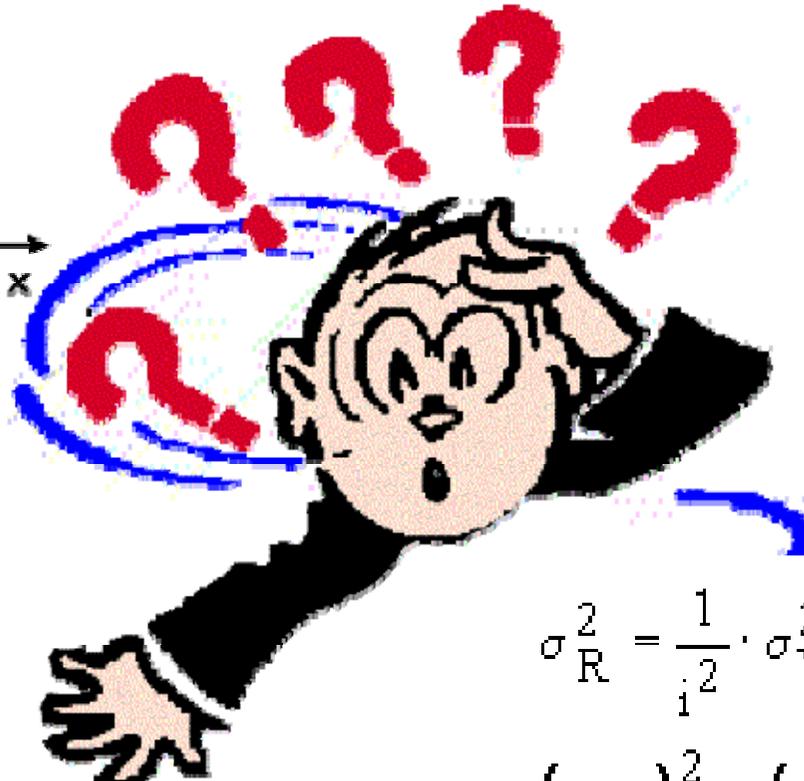
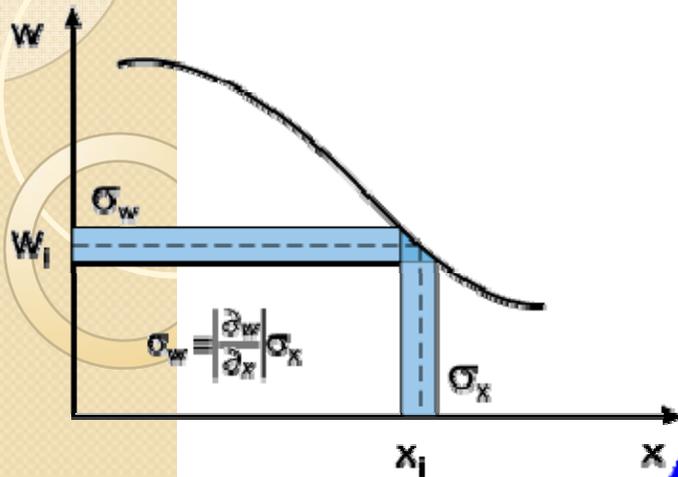


lemb  
 ser e  
 apre  
 mud  
 expc  
 que  
 relaç

lemb propagação indica que não há relação

8W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> a nossa constante deu bem menor

# Propagação de incertezas



$$u_c(y) = y \sqrt{\left(\frac{u_{x1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{x2}}{x_2}\right)^2 + \left(\frac{u_{x3}}{x_3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{u_{xN}}{x_N}\right)^2}$$

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{i^2} \cdot \sigma_V^2 + \frac{V^2}{i^4} \sigma_i^2 \quad (+R^2)$$

$$\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_i}{i}\right)^2$$

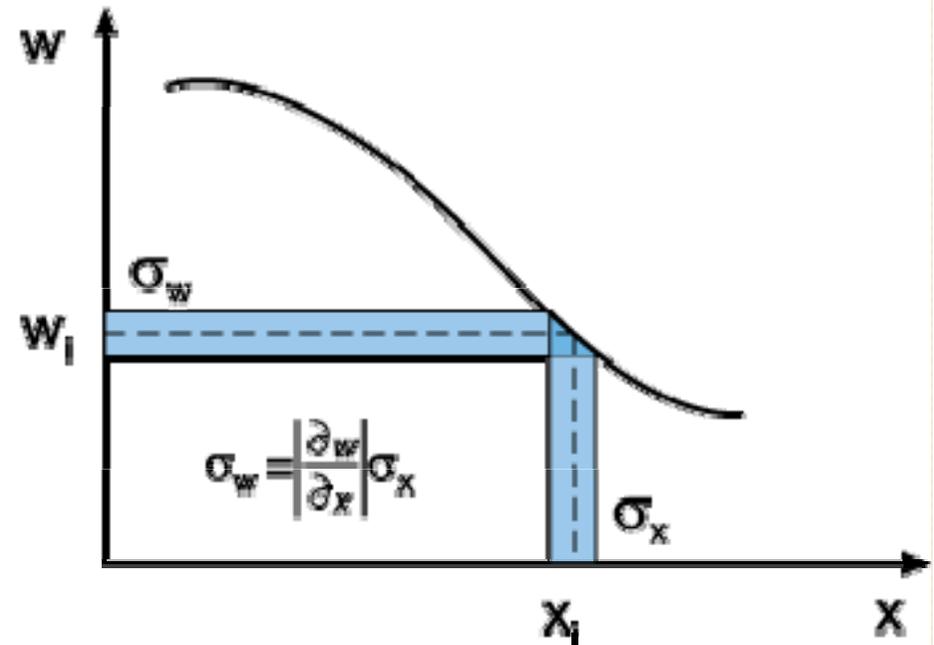
$$\sigma_R = R \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_i}{i}\right)^2}$$

# O que é propagação de incertezas?

- O que a fórmula geral de propagação de incertezas significa?

$$\sigma^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \sigma_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \sigma_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} \sigma_n \right)^2$$

- Significa quanto a variação de uma grandeza causa de variação em outra grandeza



# Propagar incertezas

- Se quero saber o quanto as incertezas de medidas afetam outras grandezas precisamos propagar as incertezas
- Em situações simples a avaliação é fácil

$$P = Vi$$

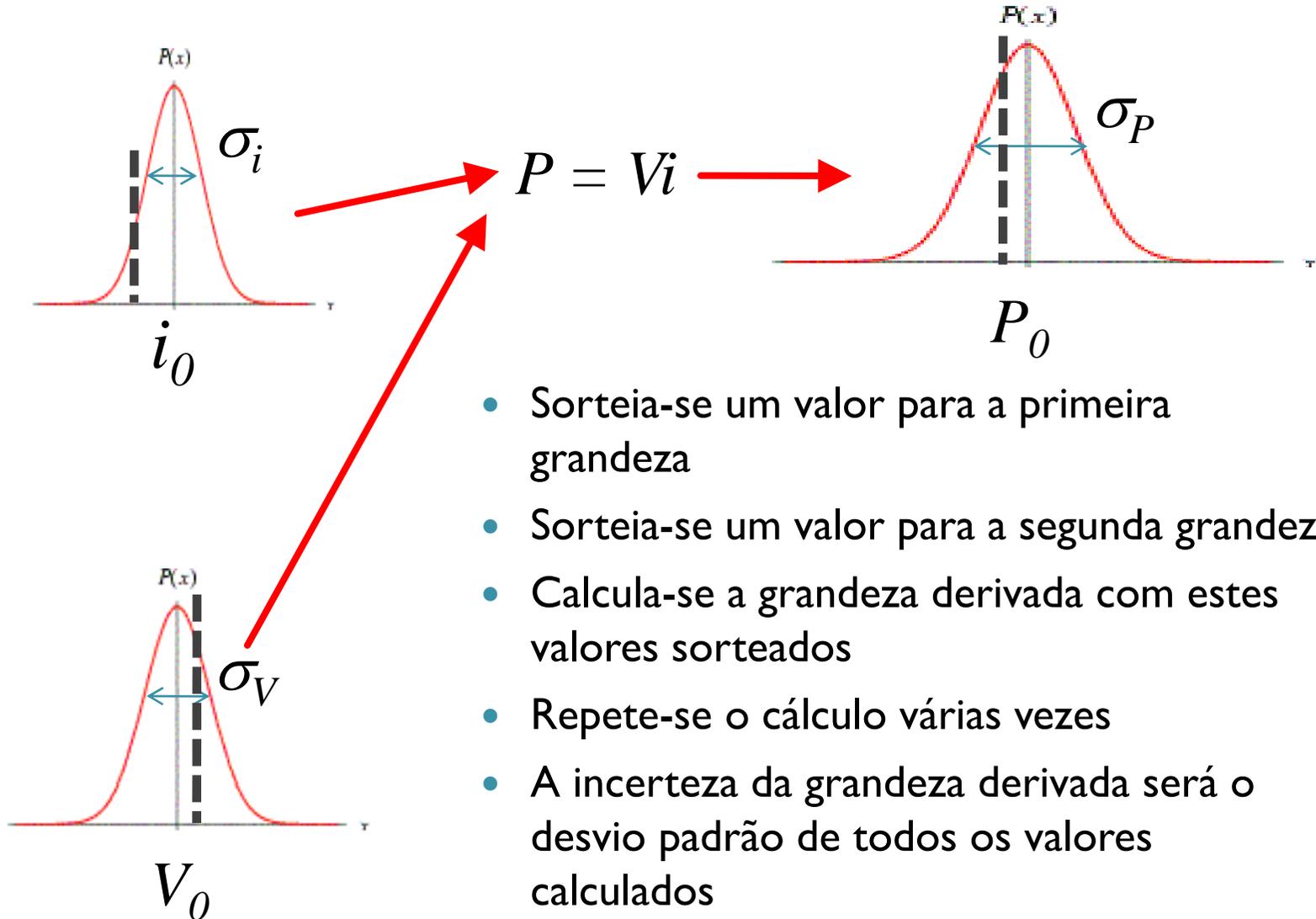
- Mas como fazer em situações mais complexas?

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R} \Rightarrow R_{eq} = \frac{R + R_V}{R_V R}$$

- Simulações de Monte Carlo

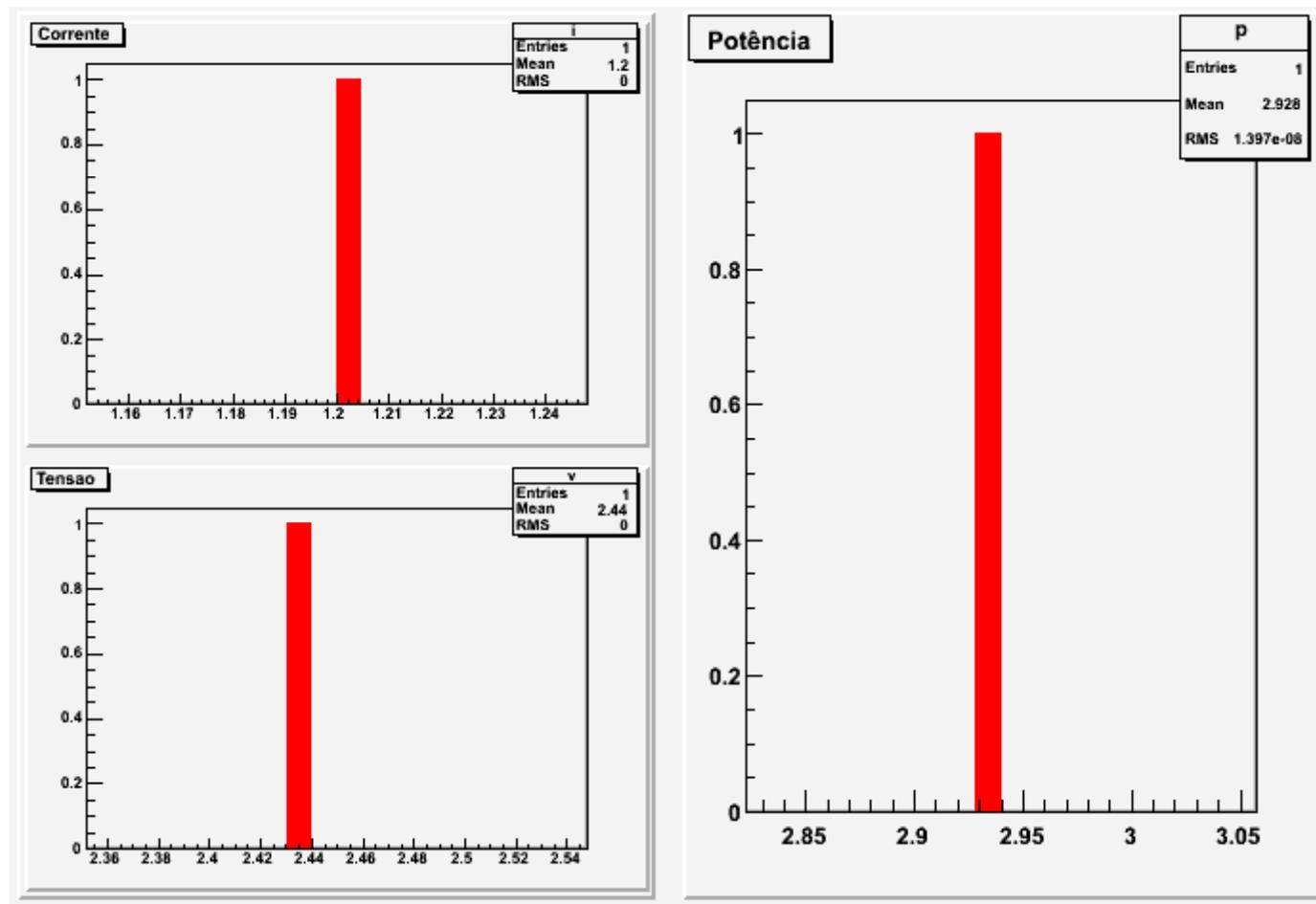
# Caso simples, $P = Vi$

- $i = i_0 \pm \sigma_i$ ;  $V = V_0 \pm \sigma_V$
- $P = P_0 \pm \sigma_P$  quem é  $\sigma_P$ ?



- Sorteia-se um valor para a primeira grandeza
- Sorteia-se um valor para a segunda grandeza
- Calcula-se a grandeza derivada com estes valores sorteados
- Repete-se o cálculo várias vezes
- A incerteza da grandeza derivada será o desvio padrão de todos os valores calculados

# Exemplo: $P = V i$



# Cálculo no excel

- Para sortear um número aleatório, com distribuição Gaussiana no excel, dado

$$X = X_0 \pm \sigma_X$$

No excel usa-se a expressão

$$= X_0 + \sigma_X * INV.NORMMP(ALEATÓRIO())$$

Ver planilha junto com as notas de aula



# Vantagens deste método

- O conceito é bastante intuitivo
- Fácil de implementar em planilhas eletrônicas (Excel, OO, etc)
- Não é necessário fazer as derivadas parciais para propagar as incertezas
- Independente da complexidade das contas, que podem tornar o cálculo de derivadas parciais muito complicados

# Atividades da semana

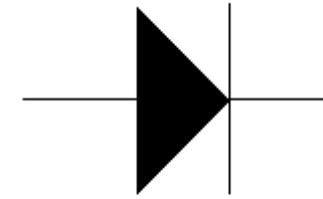




# Atividades para esta semana

- Estudar dois elementos elétricos simples
  - O diodo
    - Medir a curva característica do diodo e verificar o seu comportamento
  - A pilha
    - Estabelecer um modelo para uma pilha comum através de medidas de curvas características

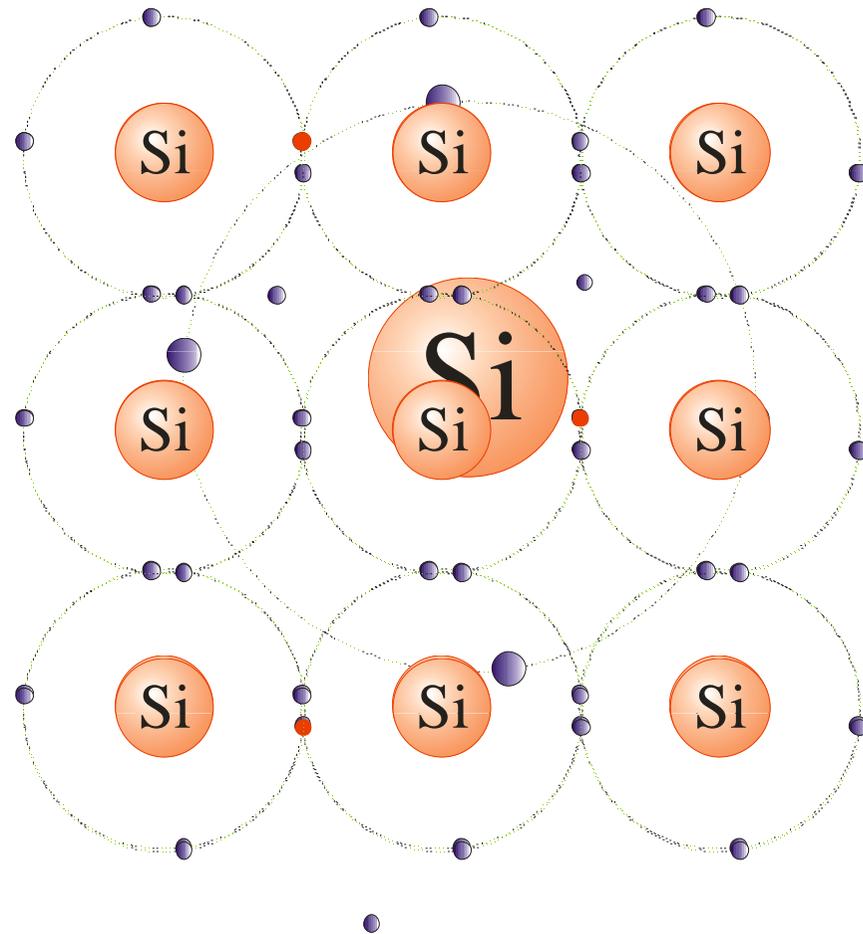
# O que é um diodo?



- 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 semi-condutores tetravalentes (silício, germânio, etc.) dopados com elementos tri- ou penta-valentes em uma junção PN
  - Uau!!!! O que isto quer dizer?

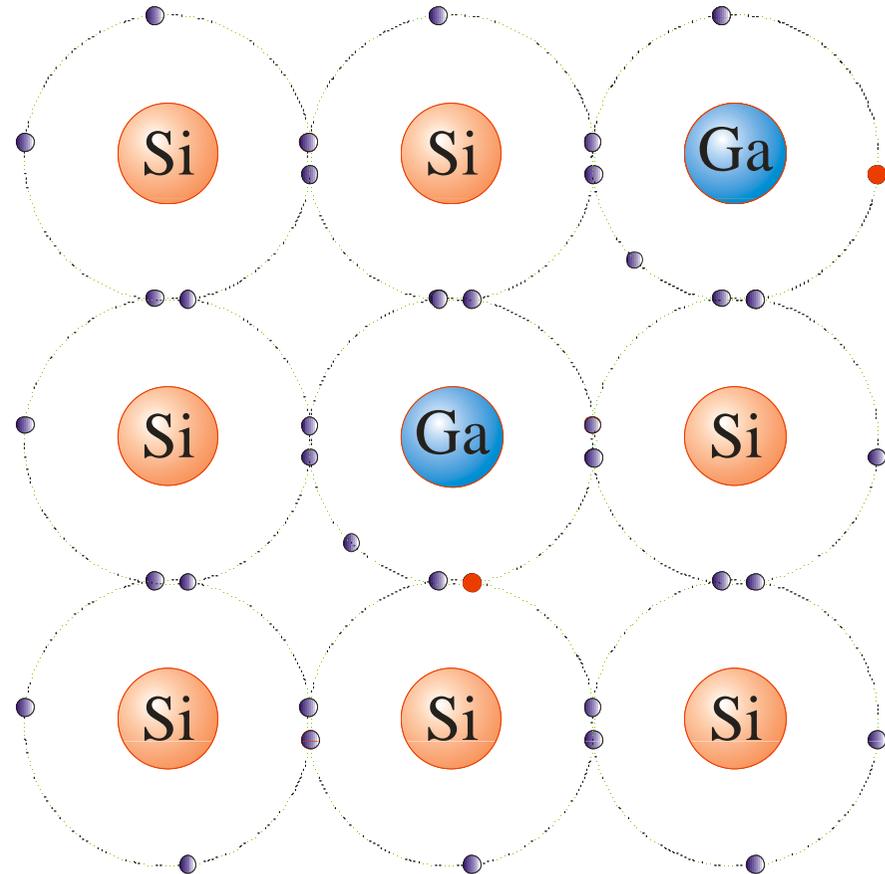
# Cristais de semi-condutores tetra-valentes

- 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



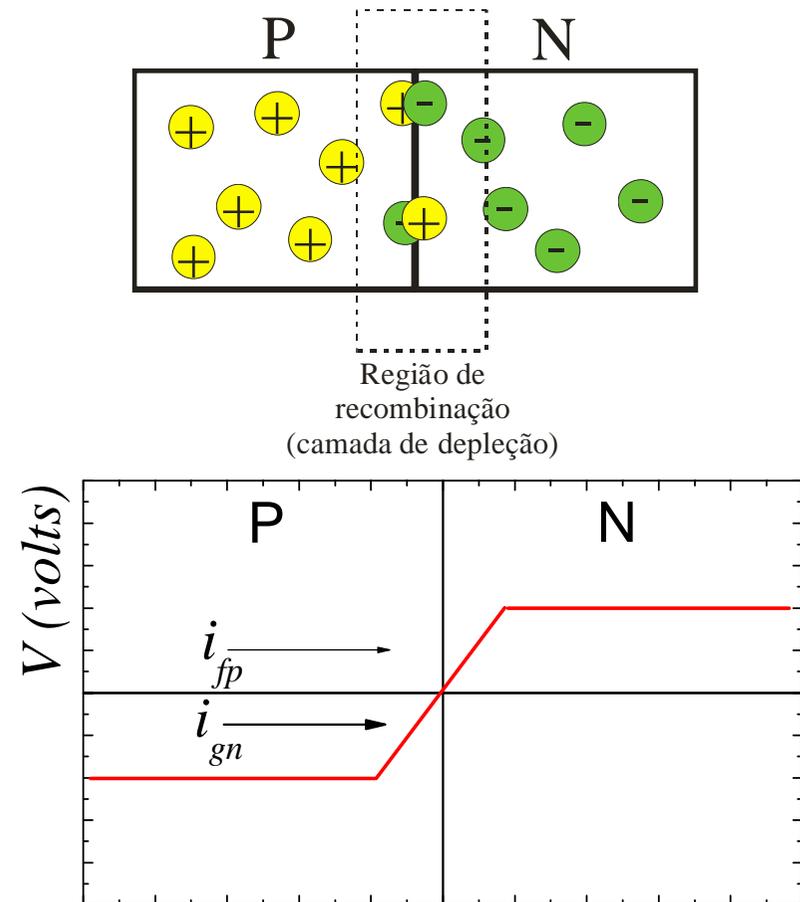
# Dopando o cristal (junções N e P)

- 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

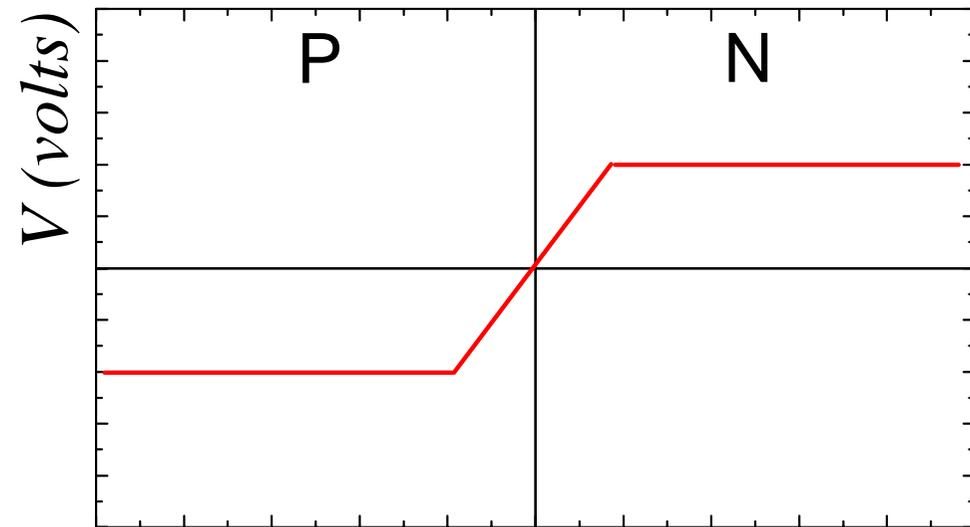


# O diodo é uma junção PN

- Junção PN
  - Na região de junção ocorre recombinação de cargas, tornando a junção “livre” de cargas livres
- 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 ( $i_{gn}$ )
    - Tem que vencer a barreira de potencial

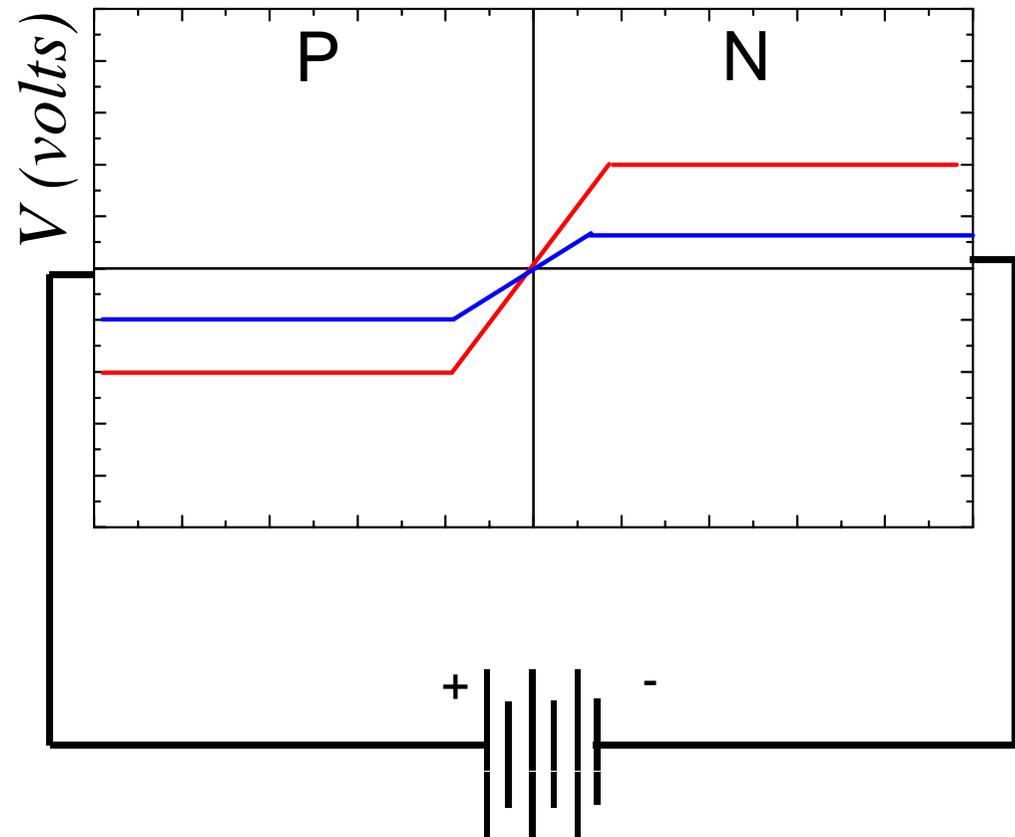


# Aplicando tensões em diodo



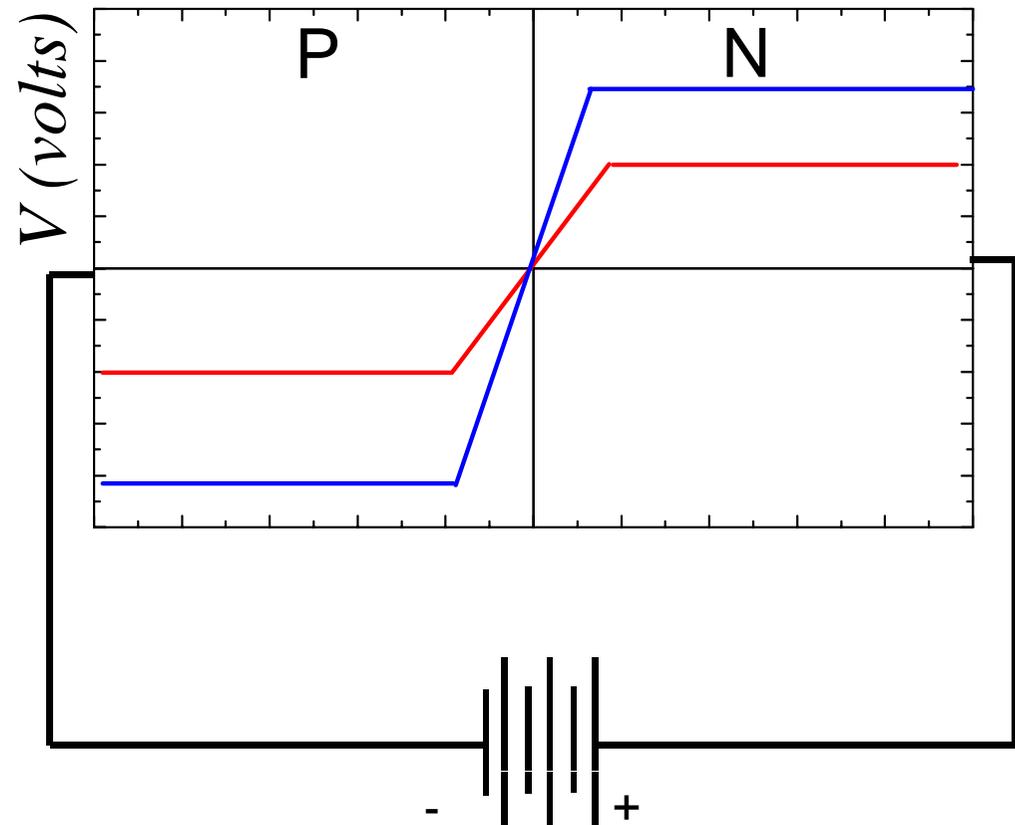
# Aplicando tensões em diodo

- Tensão direta
  - Diminui a barreira de potencial
  - Favorece a condução de corrente



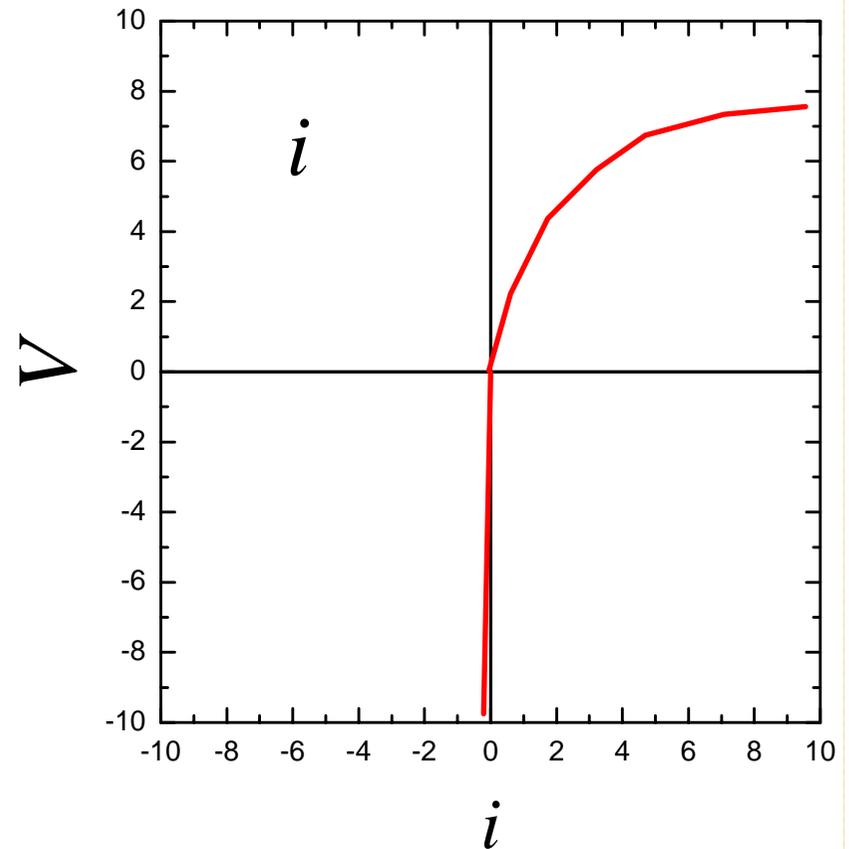
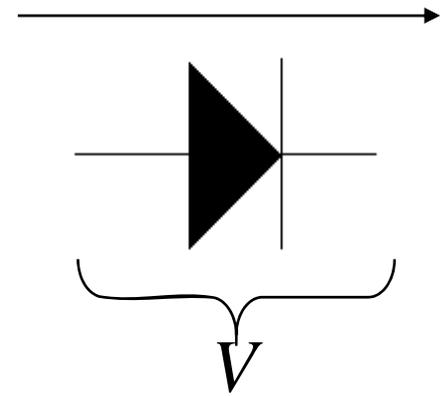
# Aplicando tensões em diodo

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



## Curva característica do diodo real

- Conduz bem para polarização direta e pouco para polarização reversa
- Transição mais suave na condição real na polarização direta



# Atividades para serem entregues sobre o diodo

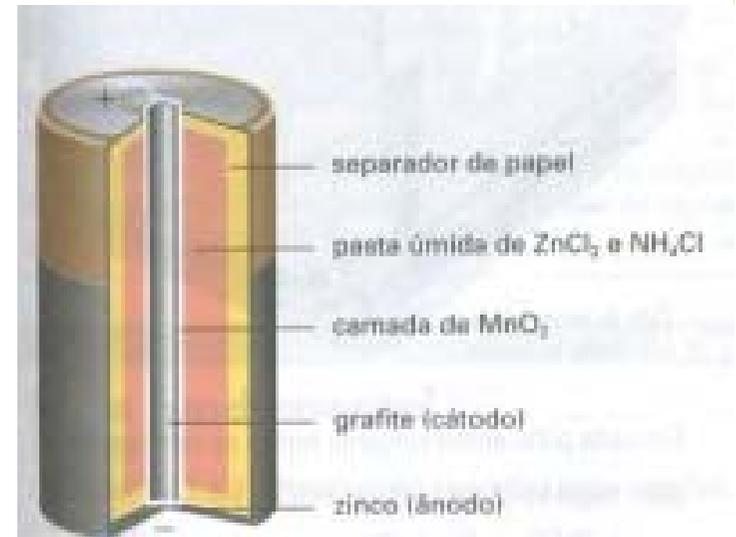
- Levantar a curva característica do diodo para polarização direta
  - Espera-se que  $R_{diodo}$  seja pequena. Qual circuito utilizar?
  - Quantos pontos medir? Definir bem a curva.
  - Procurar um modelo teórico para a curva característica do diodo e aplicá-lo aos dados
    - Dica: ver apostilas do ano passado.
- Fazer o gráfico de  $R_{diodo}$  vs  $i$ . O que aprendemos deste gráfico?

# Pilha comum

- Gerador que converte energia química em elétrica
  - Uso de reações químicas para gerar eletricidade data desde o Egito antigo
  - Alessandro Volta (1798)
    - Duas tiras de metais diferentes em solução levemente ácida → tensão elétrica
  - Pilha seca -> Georges Lelanché em 1866
  - A tensão elétrica depende dos elementos químicos que compõe a pilha

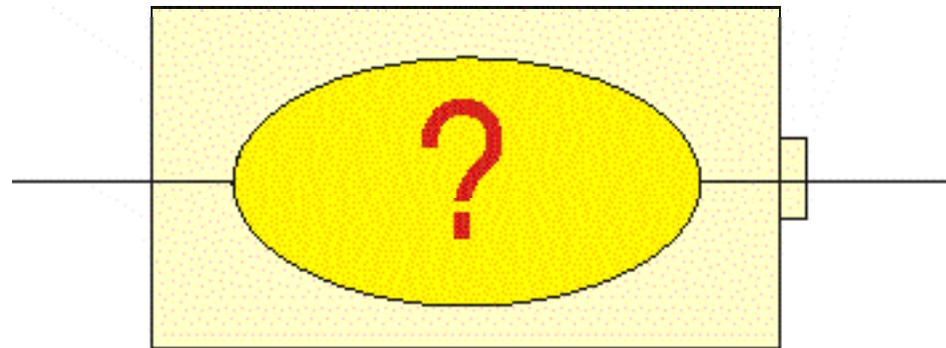
# Pilha comum

- Pilha comercial
  - A pilha moderna usa, em geral, Zinco e Cobre (ou carvão) como eletrodos. Contudo, o Zinco é o elemento principal para gerar a tensão entre os terminais
  - A tensão é sempre 1,5 V, independente do tamanho da pilha → características químicas dos eletrodos



# O que é uma pilha

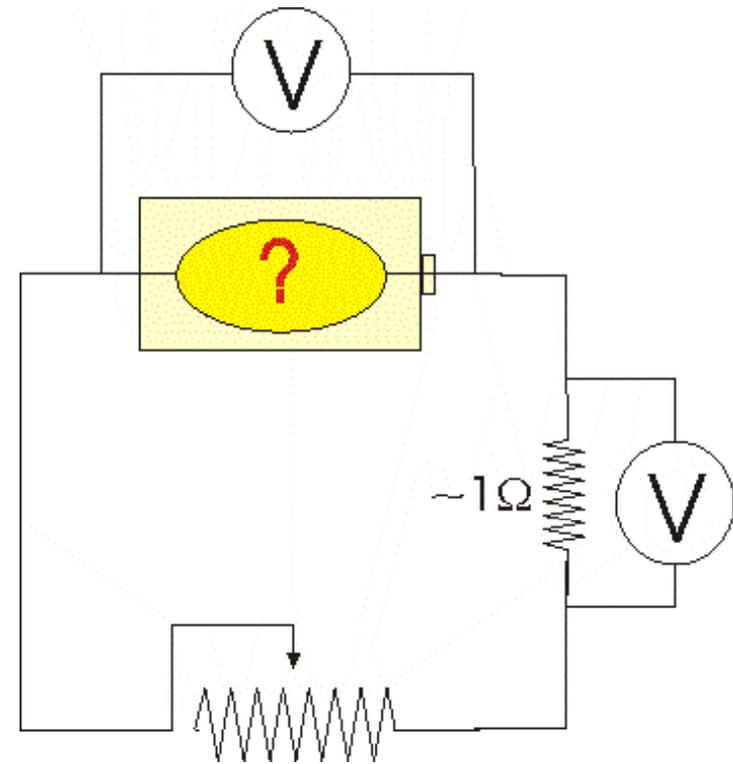
- Qual o modelo elétrico que a gente pode utilizar nos projetos de circuitos para uma pilha comum?



- Como testar?
  - Tomar dados e analisá-los. Um dos objetivos desta aula.

# Medindo curvas características de pilhas

- A pilha é um gerador no qual não podemos variar a tensão.
- Como fazer uma medida de tensão em função da corrente?
  - Resistor variável
- A resistência interna do amperímetro ( $\sim 10\Omega$ ) pode limitar a corrente gerada
  - Substituir por um resistor ( $1-1,5\Omega$ ) + Voltímetro





# Atividades para serem entregues sobre a pilha

- Medir a curva característica da pilha desde correntes baixas até a maior corrente possível de se medir com o arranjo experimental utilizado
- Estabelecer um modelo para pilha e verificar se os dados podem ser descritos por este modelo. Obter os parâmetros relevantes.
  - Dica: ver apostila do ano passado
- Fazer a curva de potência fornecida pela pilha como função da corrente fornecida. Quando a potência fornecida é máxima? Isto corresponde à situação de maior corrente?