



Física Experimental III

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

LabFlex: 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

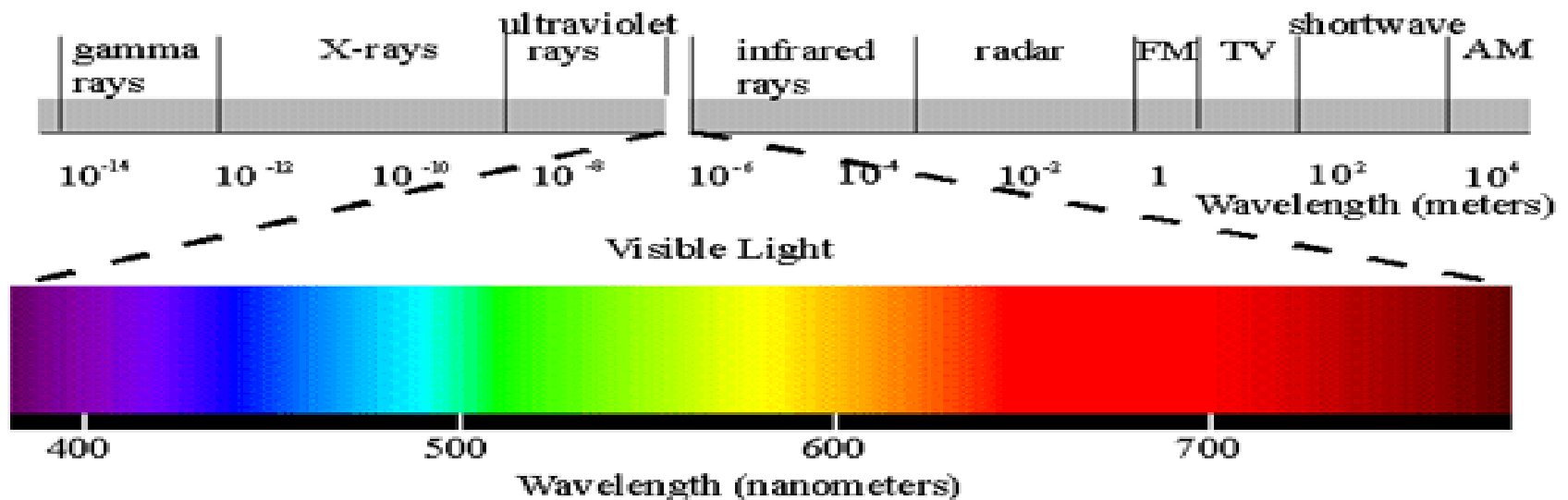


Troca de calor em uma lâmpada comum

- 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?

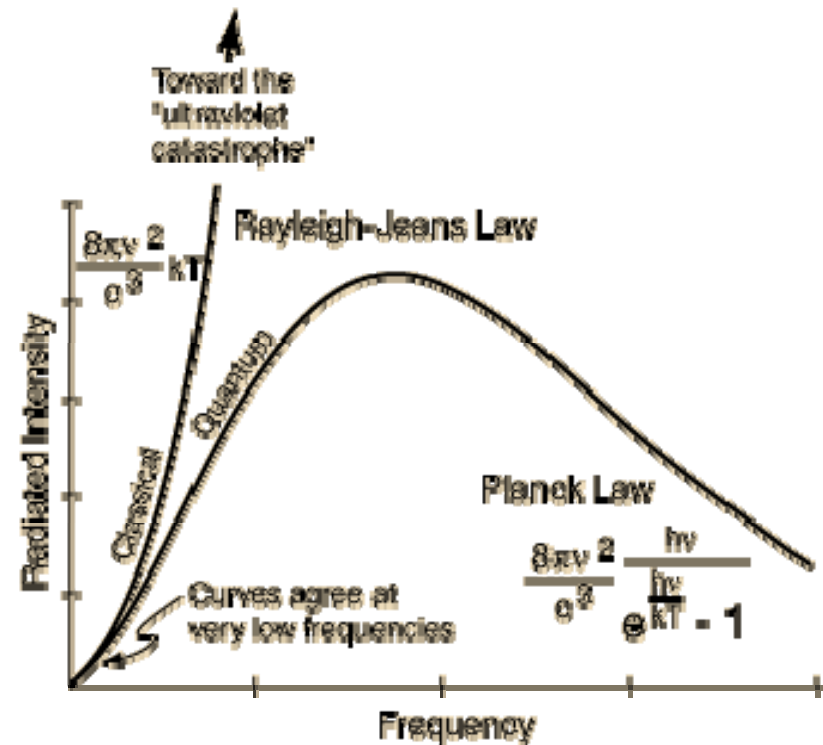
O que é irradiação térmica?

- 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



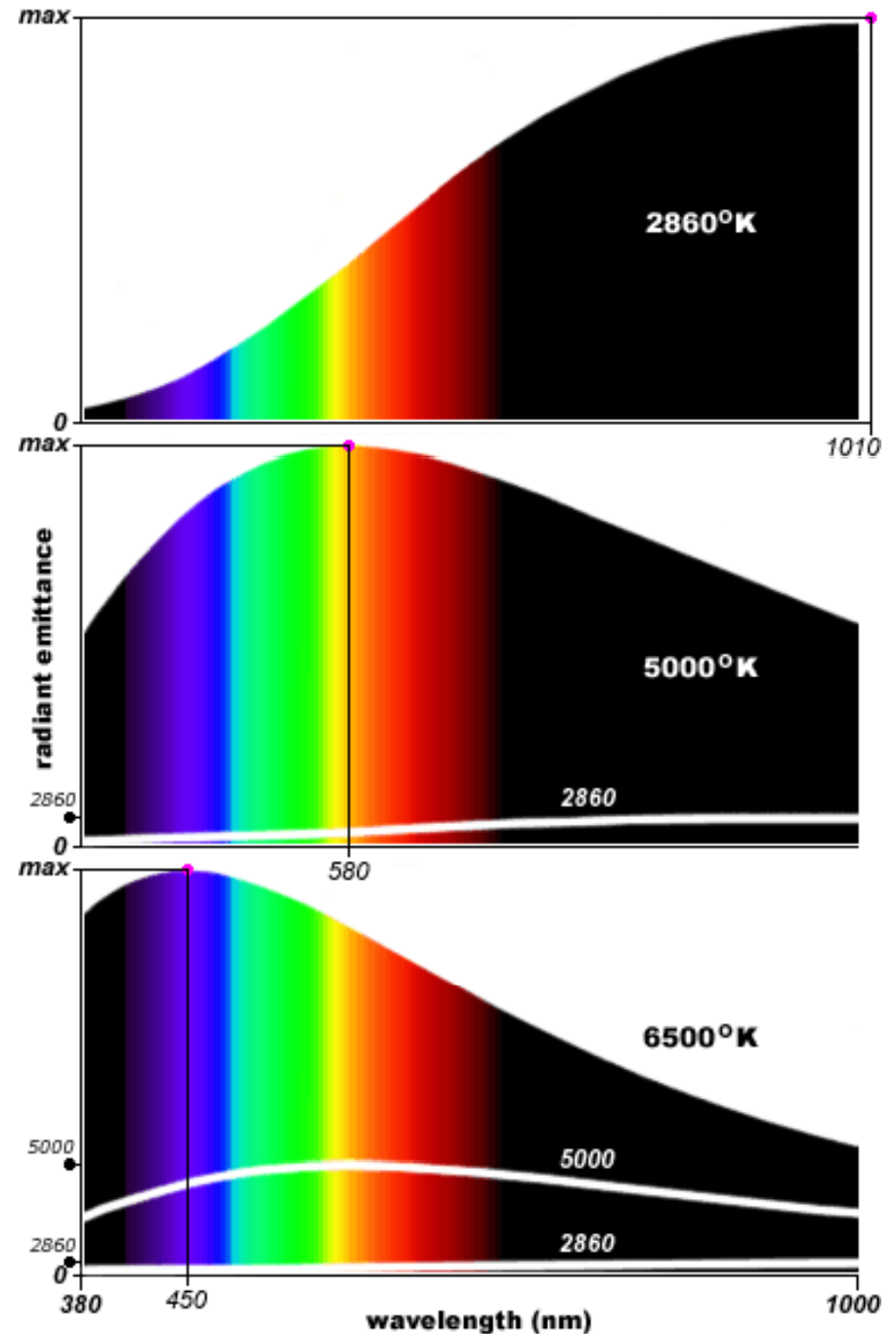
Irradiação eletromagnética: O corpo negro

- 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



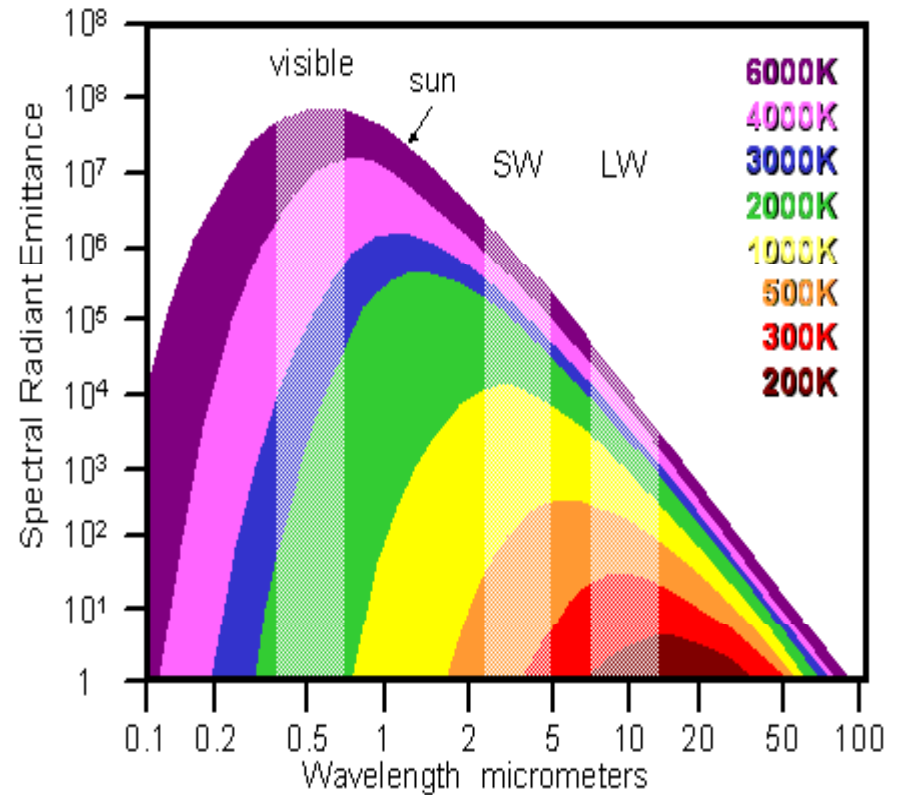
Temperatura de cor

- 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:



$$P = \sigma T^4$$

A01

$R_0 (\Omega)$	$SR_0 (\Omega)$
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!!!!

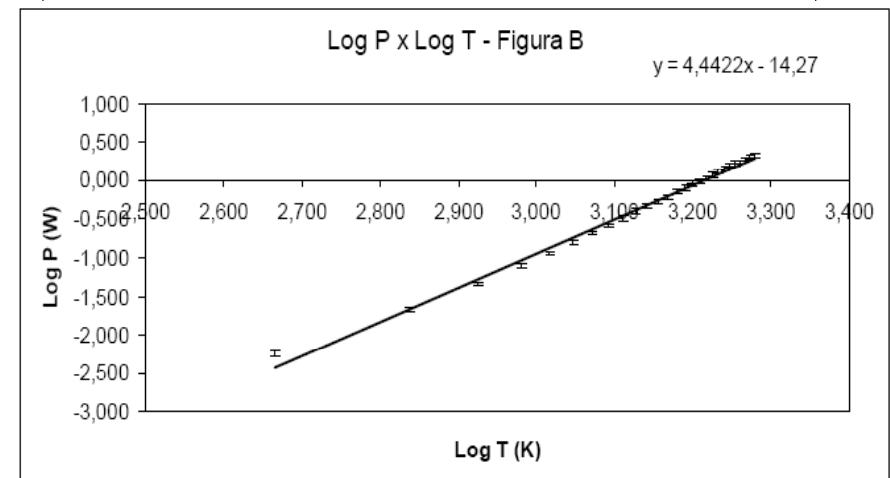
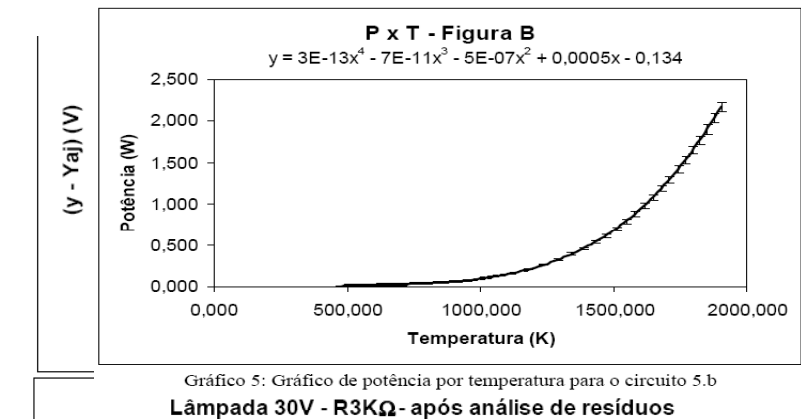
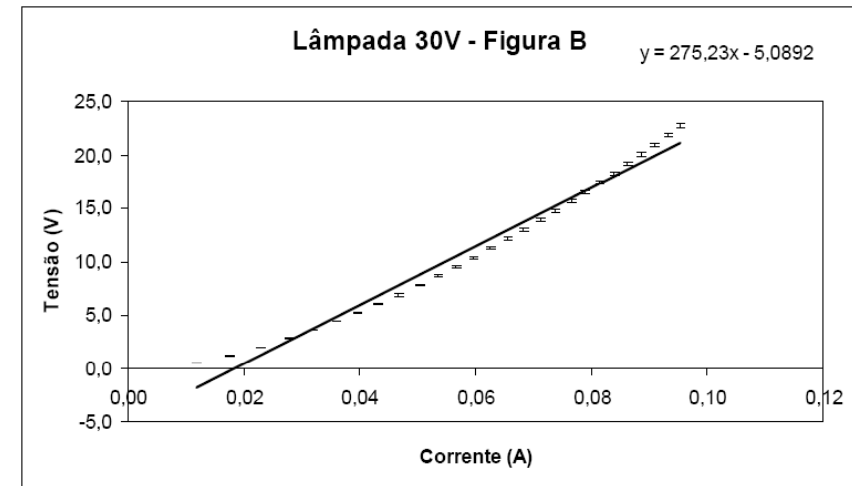


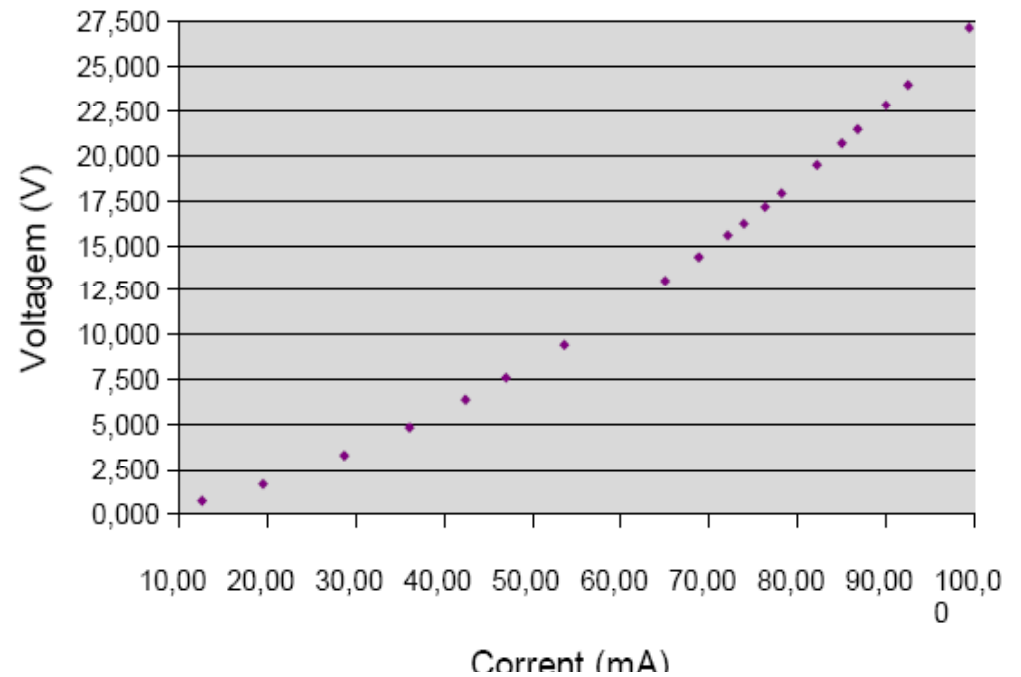
Gráfico 6: Gráfico log-log de potência por temperatura.

A02

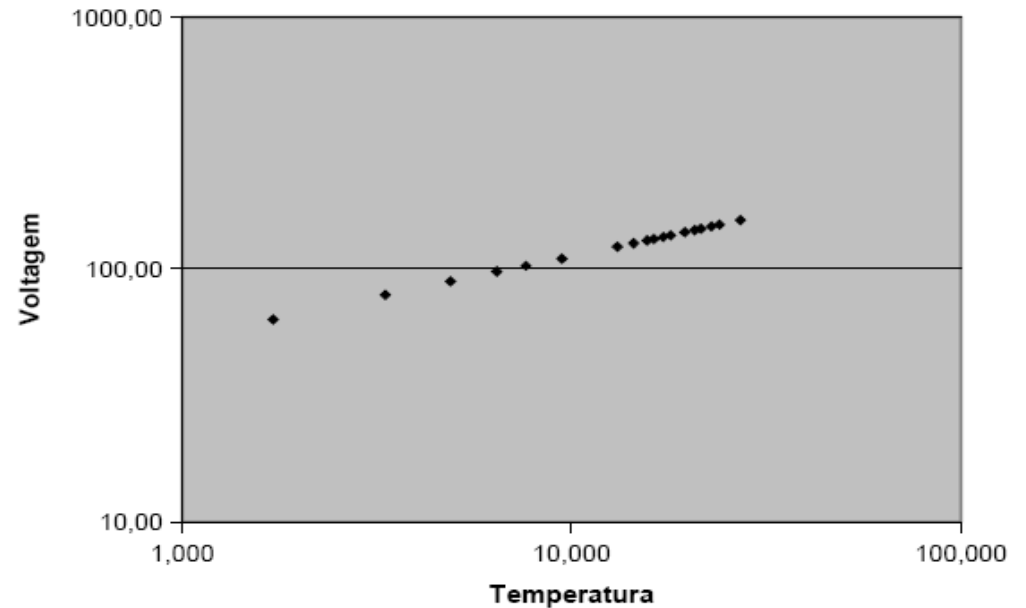
Resistencia a temperatura a

- 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



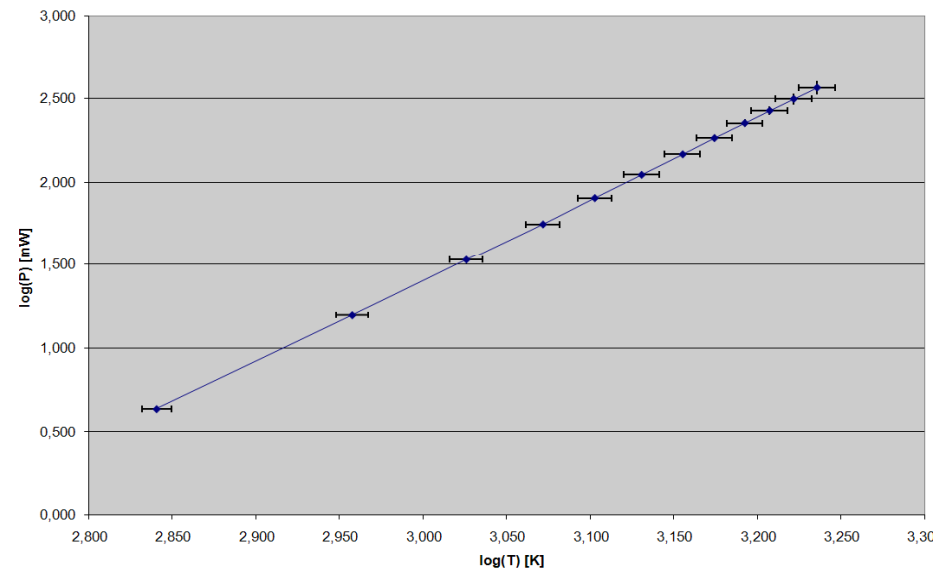
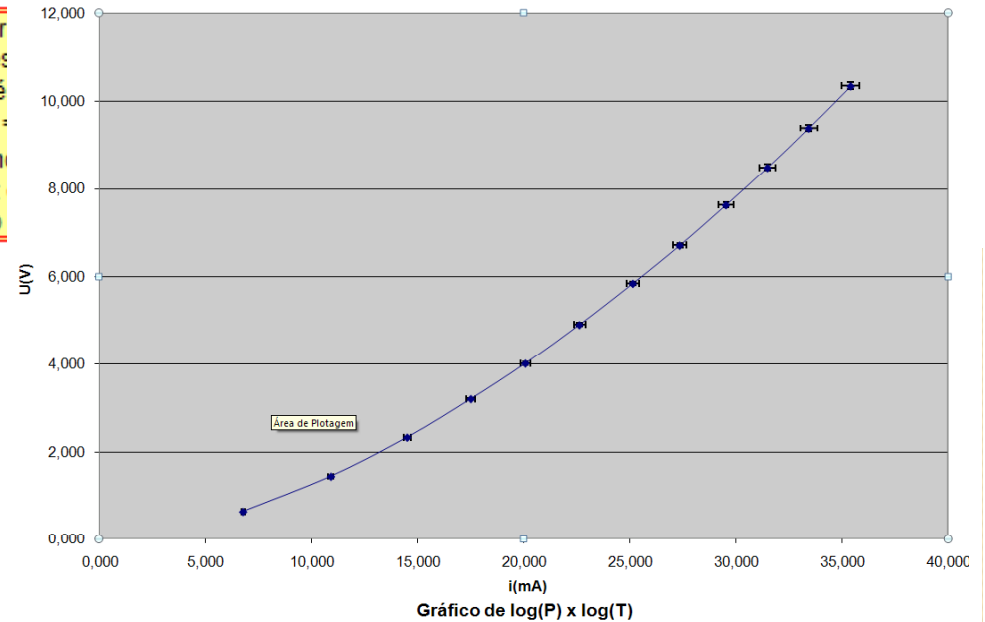
Voltagem em Funcao da temperatura em logxlog



A03

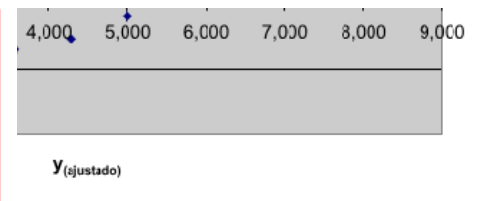
Chegamos à expr
correspondem res
 $U = Ri$, onde R é
experimento: $U_{(i)}$
ria à algo em torn
ôhmico, uma vez
para o parâmetro

- 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



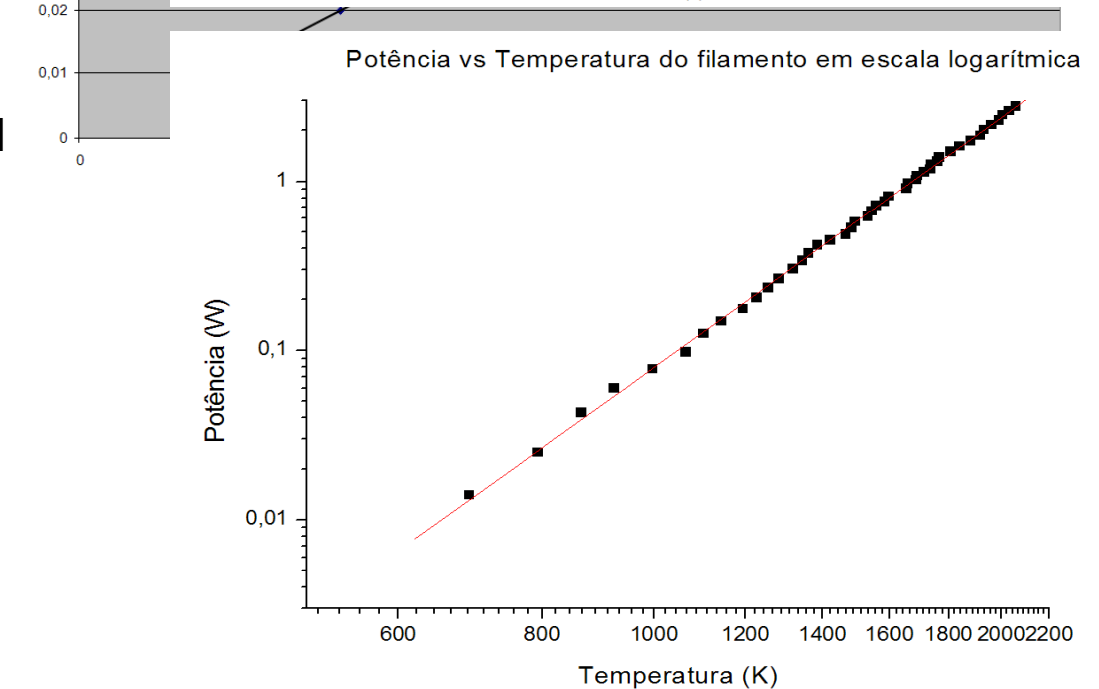
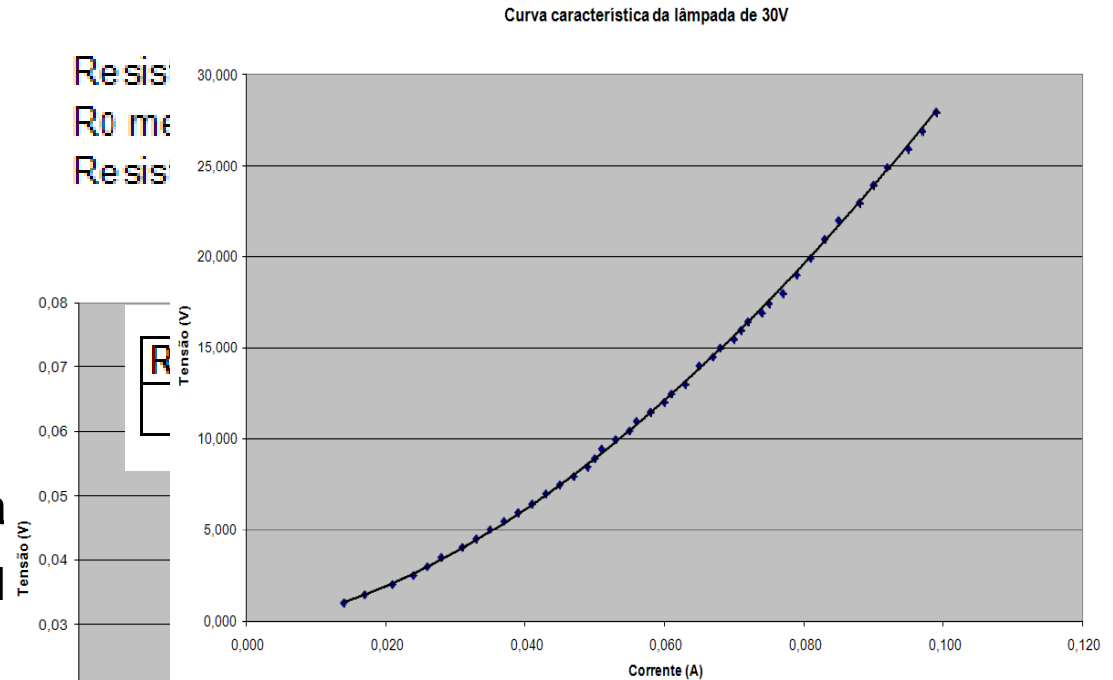
Chegamos à expressão $y = ax + b$, onde y é $\log(P)$ e x é $\log(T)$, portanto podemos reescrever essa expressão da seguinte maneira: $\log(P) = \log(T^a) + \log(k)$, onde $k = 10^b$. Podemos novamente reescrever a expressão acima como: $\log(P) = \log(kT^a)$, de onde concluímos que:

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



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

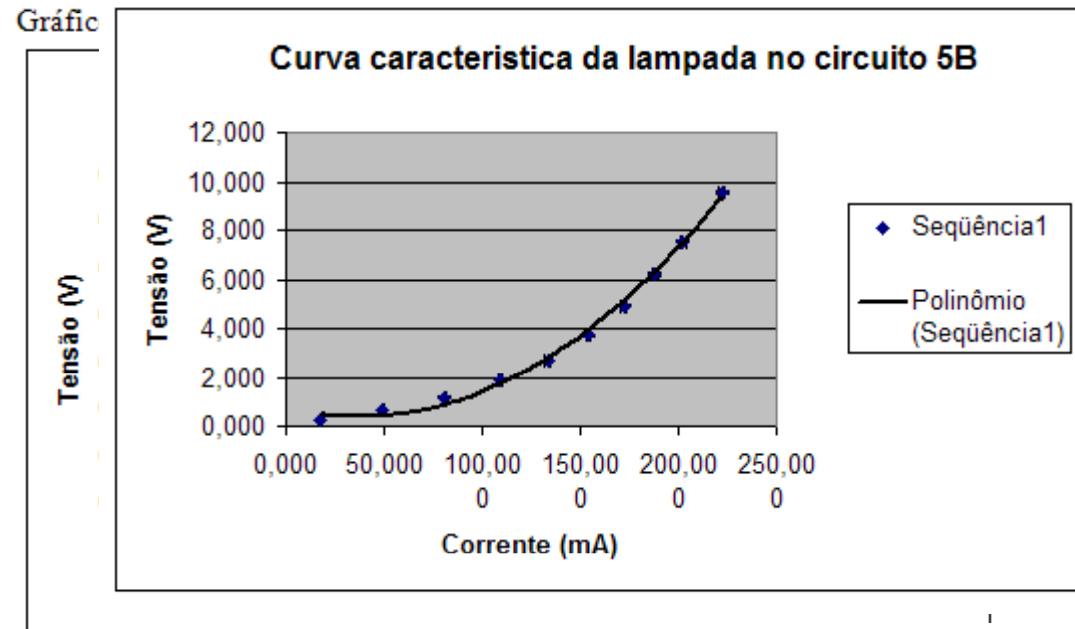
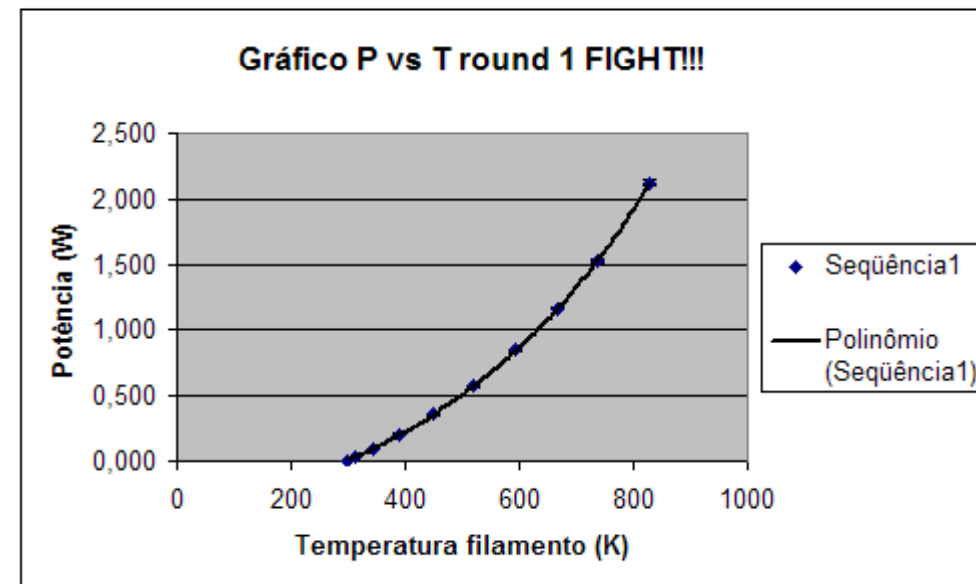


Gráfico 3



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?

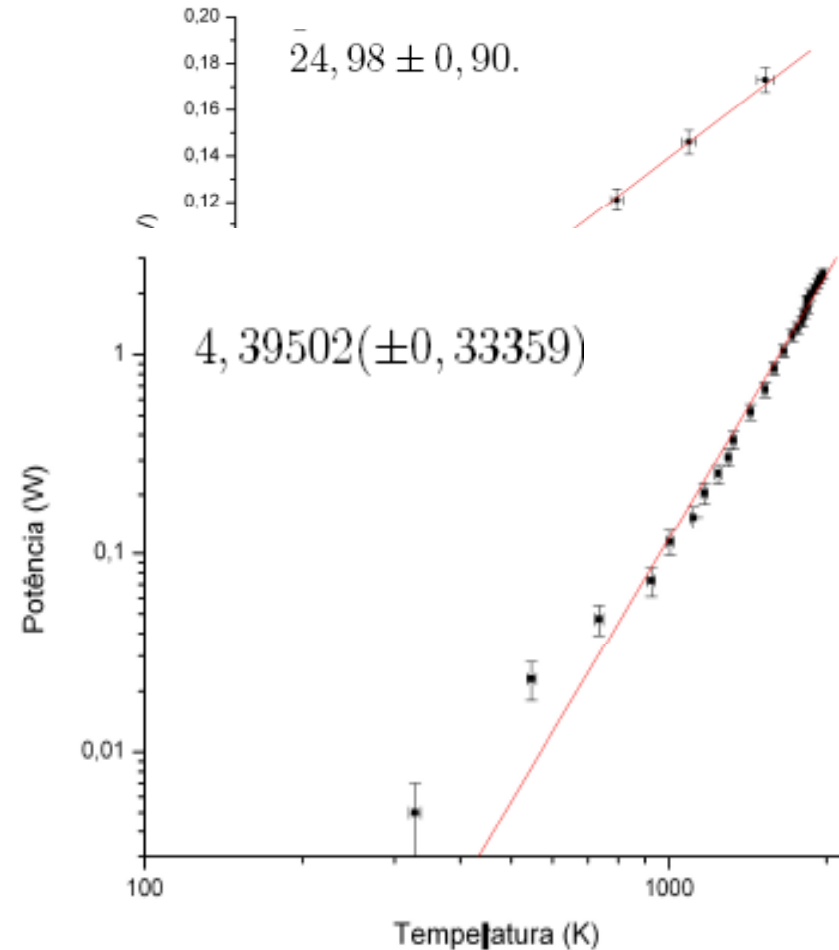


Figura 3: Gráfico de $\log(P)$ por $\log(T)$.

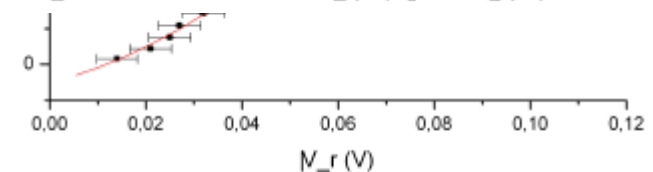
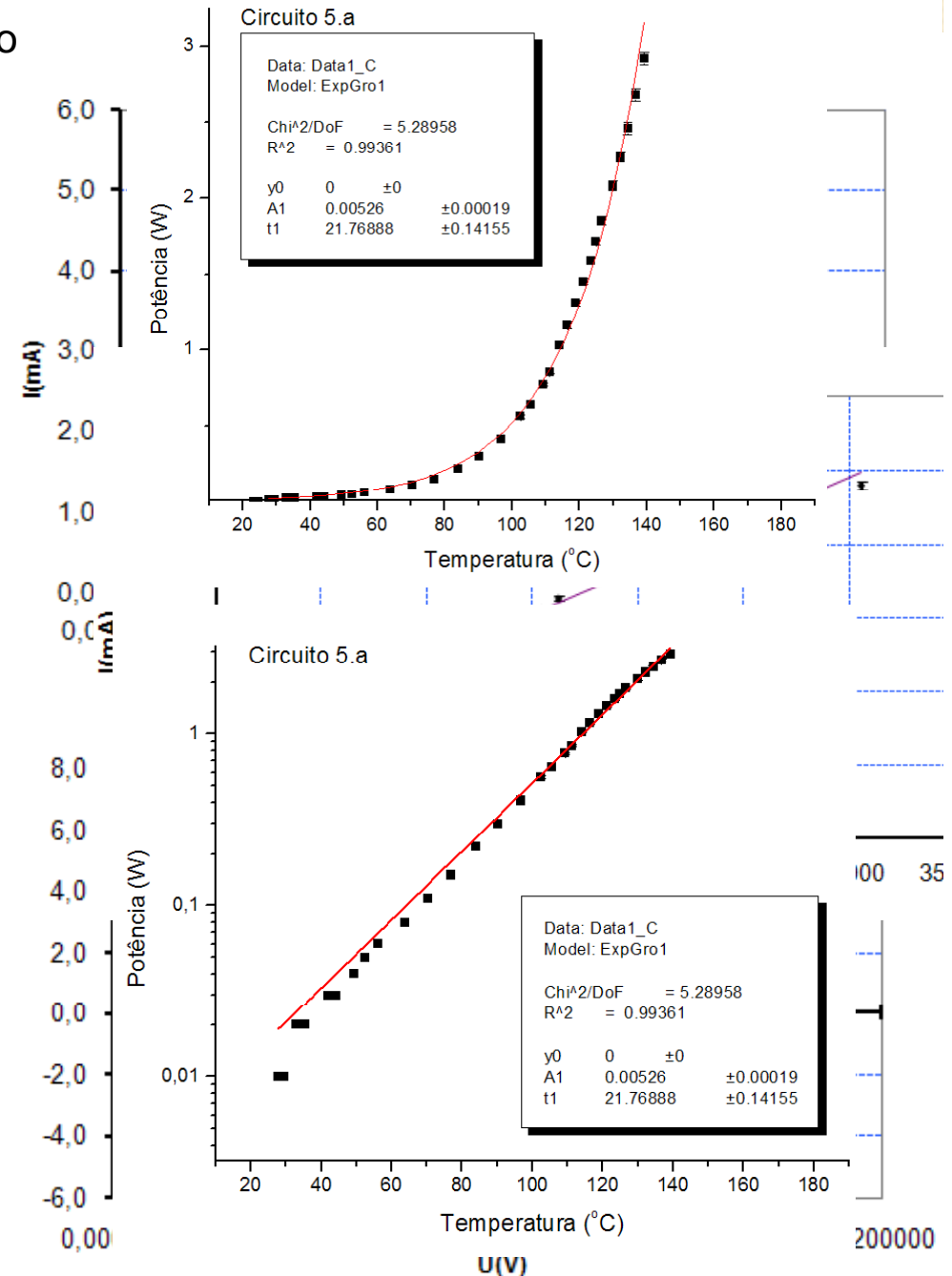


Figura 2: Curva característica do resistor.

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

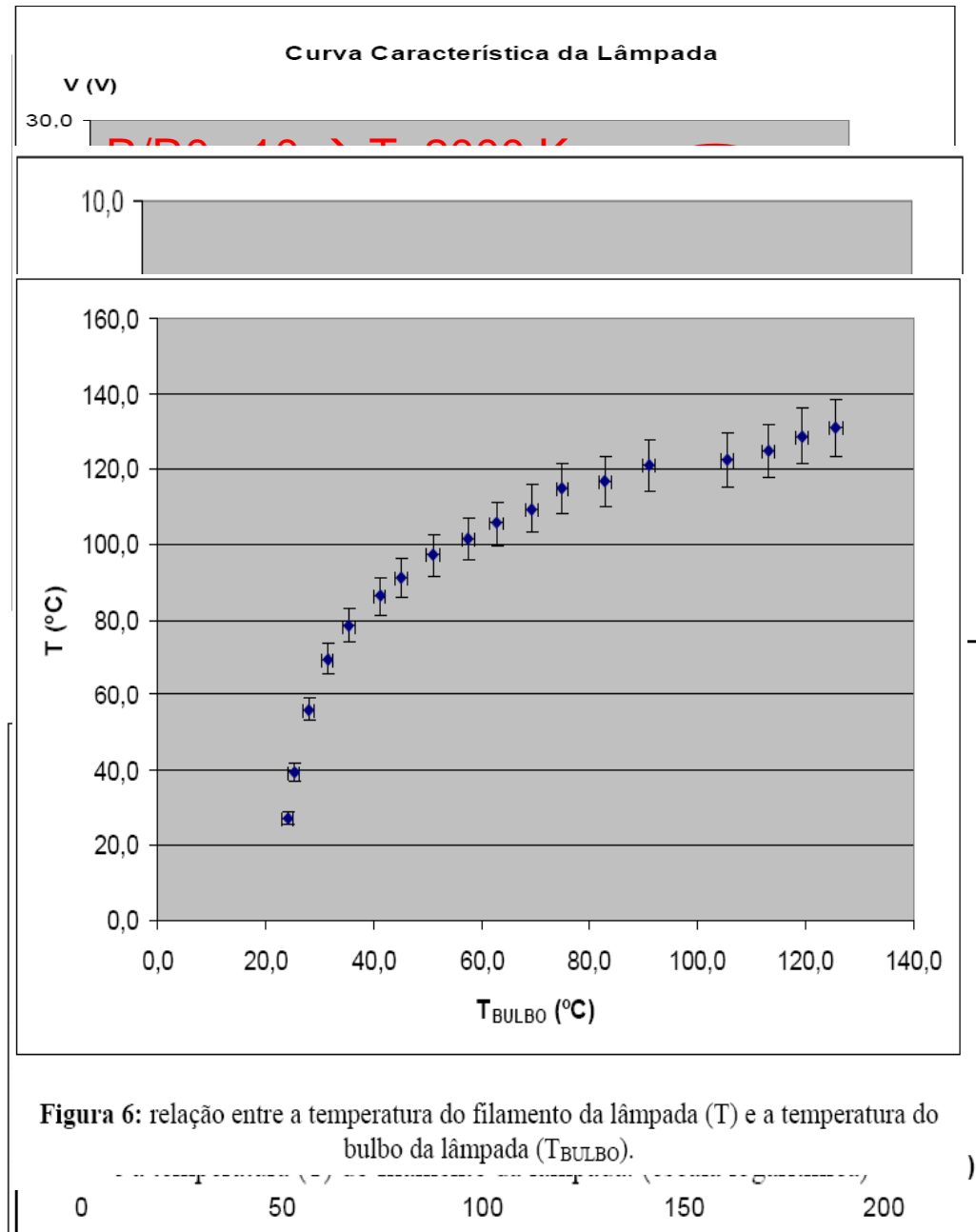


Figura 4: relação entre a potência (P) fornecida à lâmpada e a temperatura (T) do filamento da lâmpada.

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

- 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

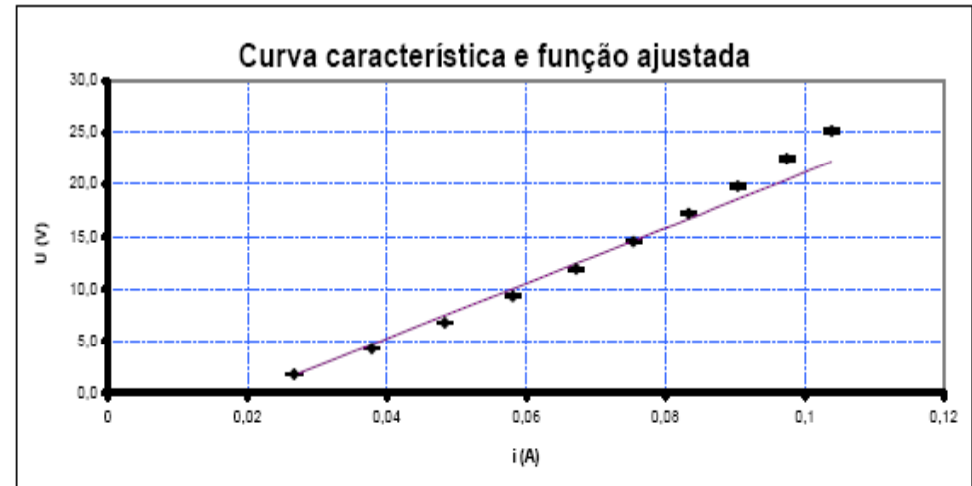
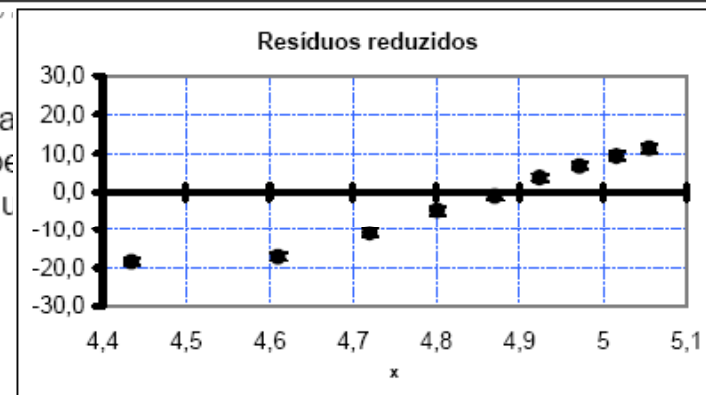
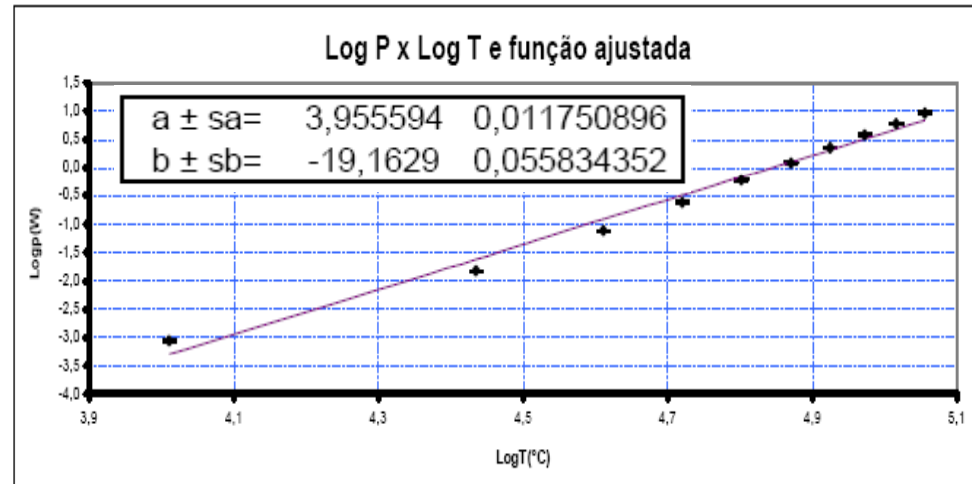


Gráfico 2 - Curva característica com a função ajustada da lâmpada de 30V



) ma

Resistência** (Ohms)	$34,40 \pm 0,25$
----------------------	------------------

- Medida de R_0
 - Ohmímetro + baixas correntes
 - Escolha dos pontos para o ajuste de acordo com análise
- Problema com arquivo corrompido

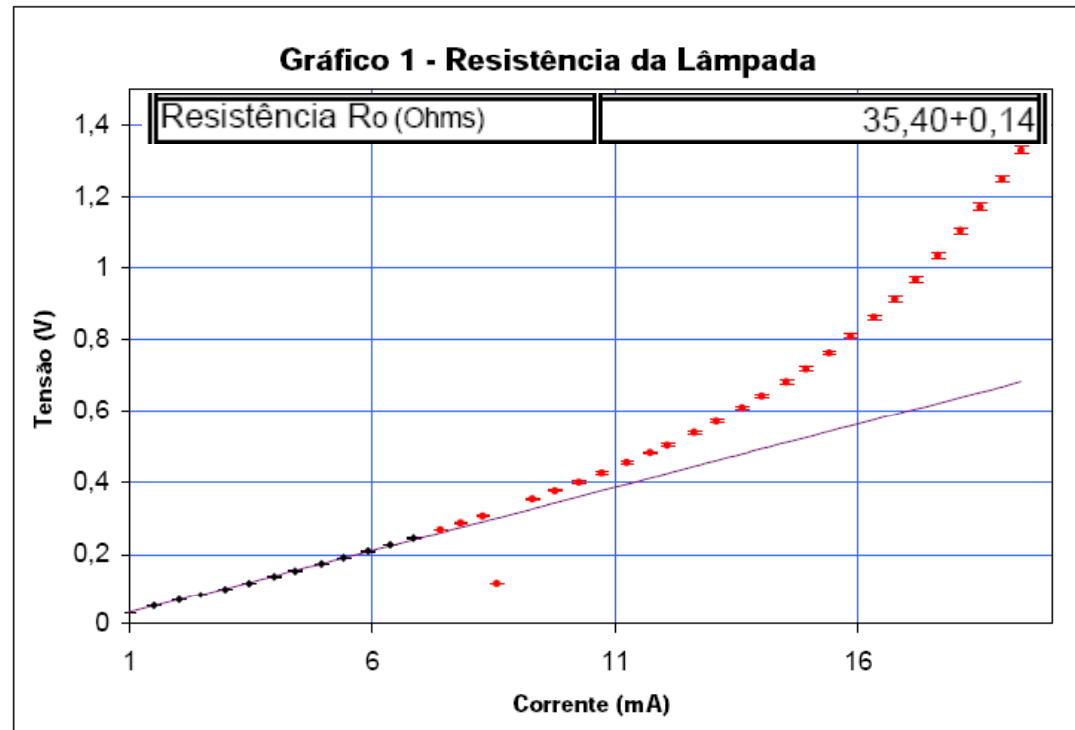


Gráfico 1 - Gráfico das valores medidos da tensão e corrente, sendo que os pontos em vermelho foram desprezados para o cálculo da resistência pois apresentam um desvio à reta, sendo que a hipótese adotada é que para tais medidas, o valor da temperatura da lâmpada já estivesse influenciando o valor da 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?

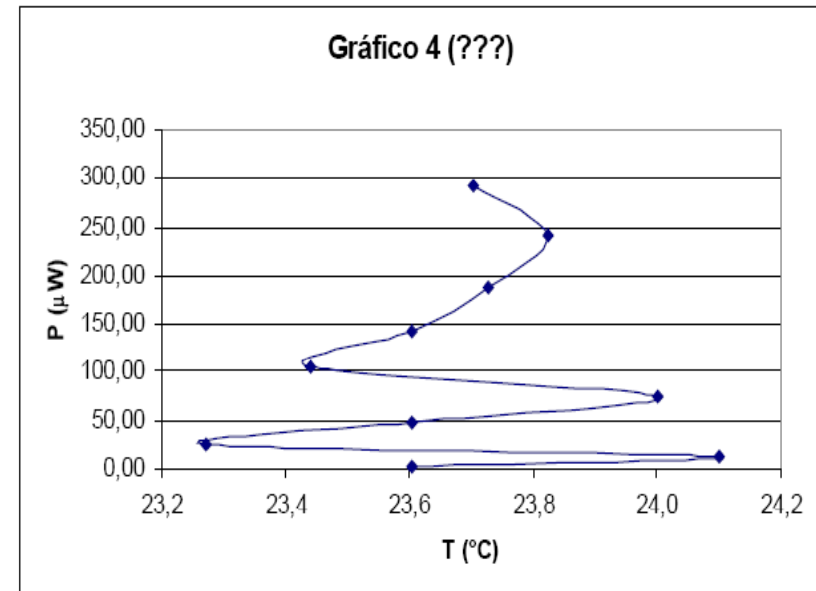
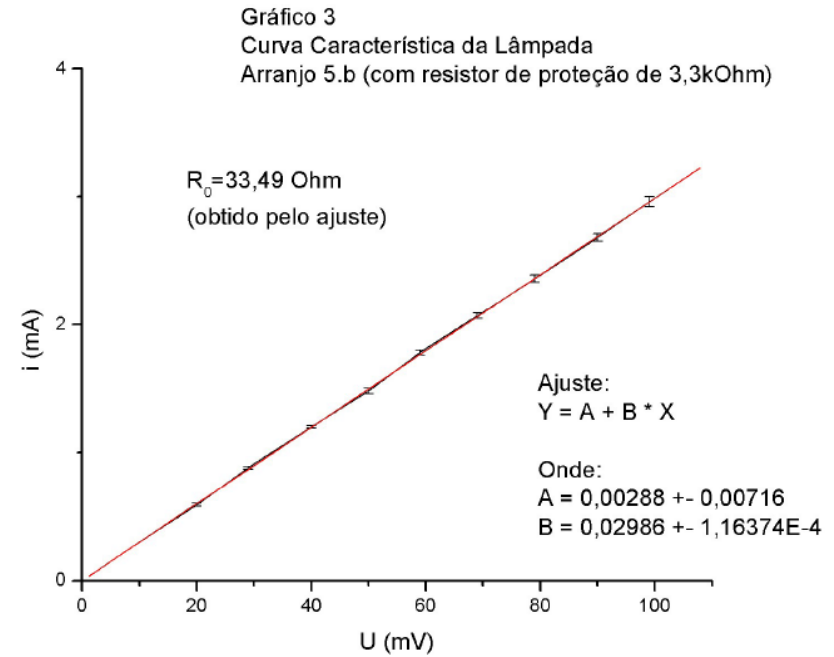
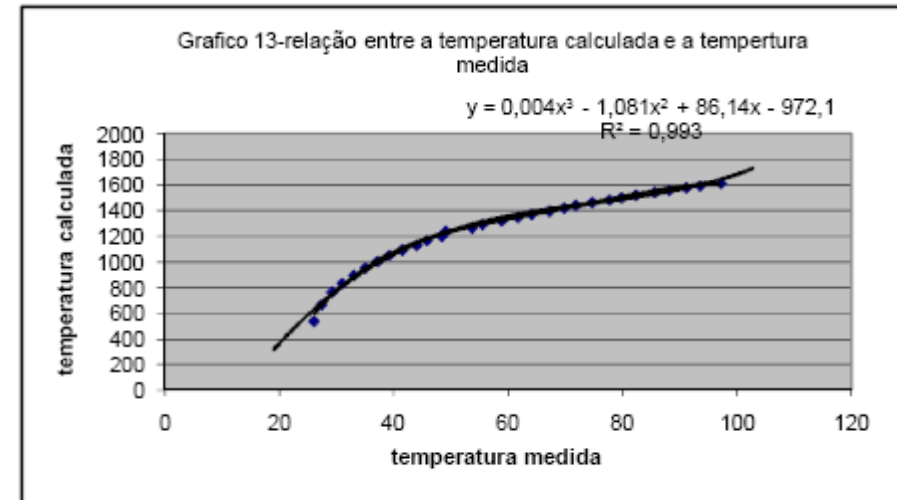
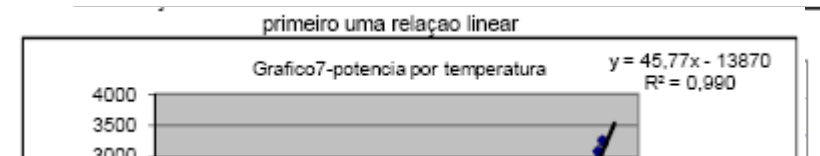


Gráfico 4: O aspecto estranho do gráfico $P \times T$ nos faz crer que houve algum problema no tratamento dos dados, porém ainda não conseguimos identificá-lo.

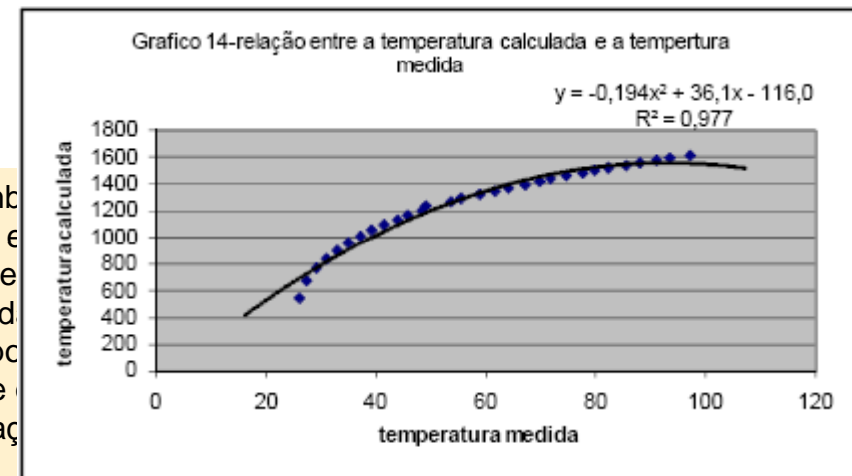
A12

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 R_0
 - Ohmímetro
 - 2 métodos (com e sem resistor em série)
 - Extrapolações
 - Algumas inconsistências
 - Comparações?
- $P \times T$
 - Que valor de R_0 foi usado?
 - Duas curvas diferentes?
 - Conclusões interessantes
- Tentativa de calibrar a temperatura do bulbo
 - É reproduzível?



propagação indica que não há relação

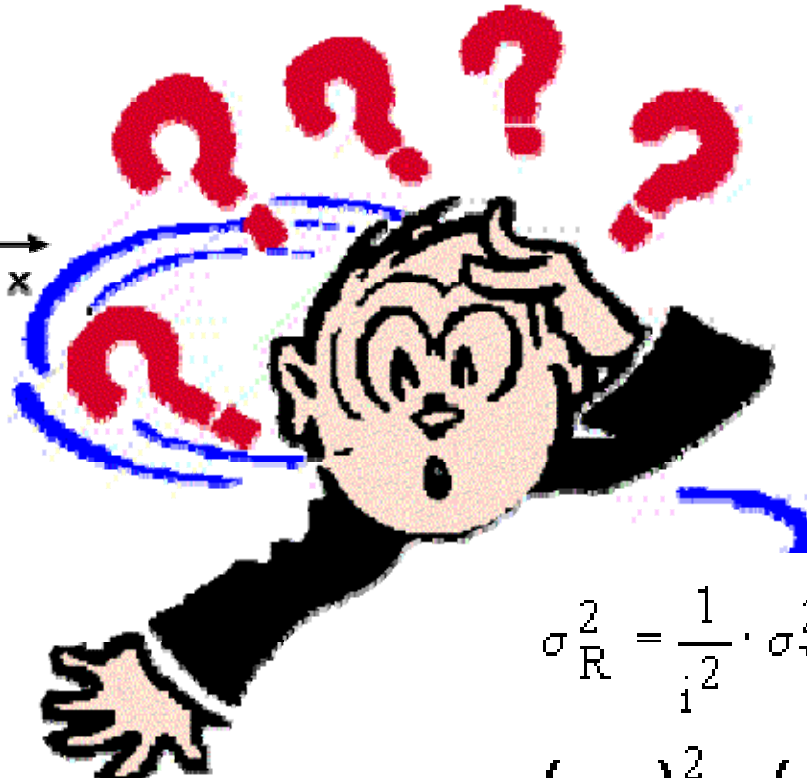
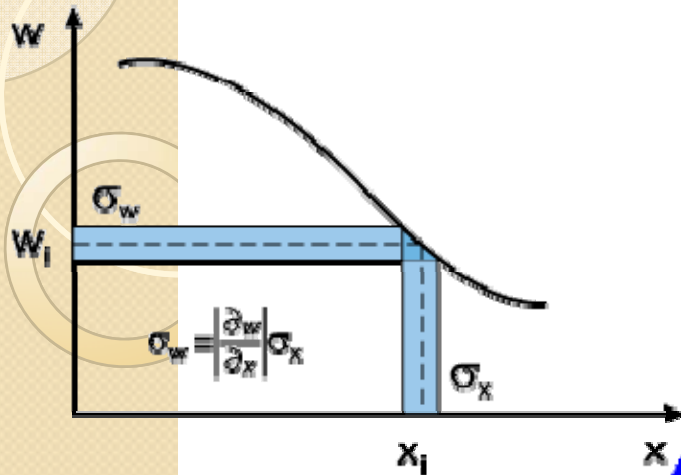


lemb
ser e
apre
mud
expc
que
relaç

lemb propagação indica que não há relação

$8W/m^2K^4$ a nossa constante deu bem menor

Propagação de incertezas



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

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

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

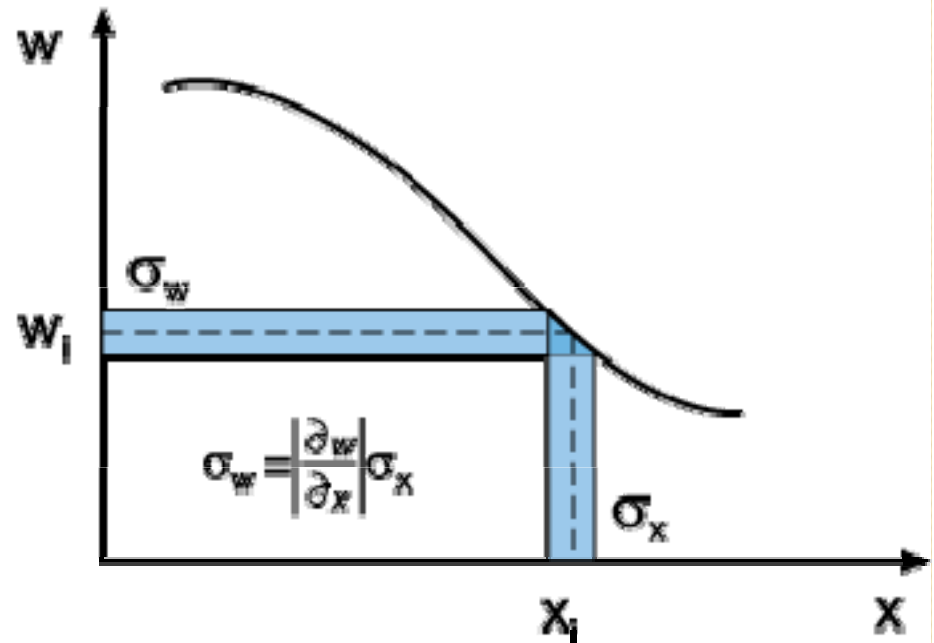
$$\sigma_R = R \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_i}{i}\right)^2}$$

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

$$P = Vi$$

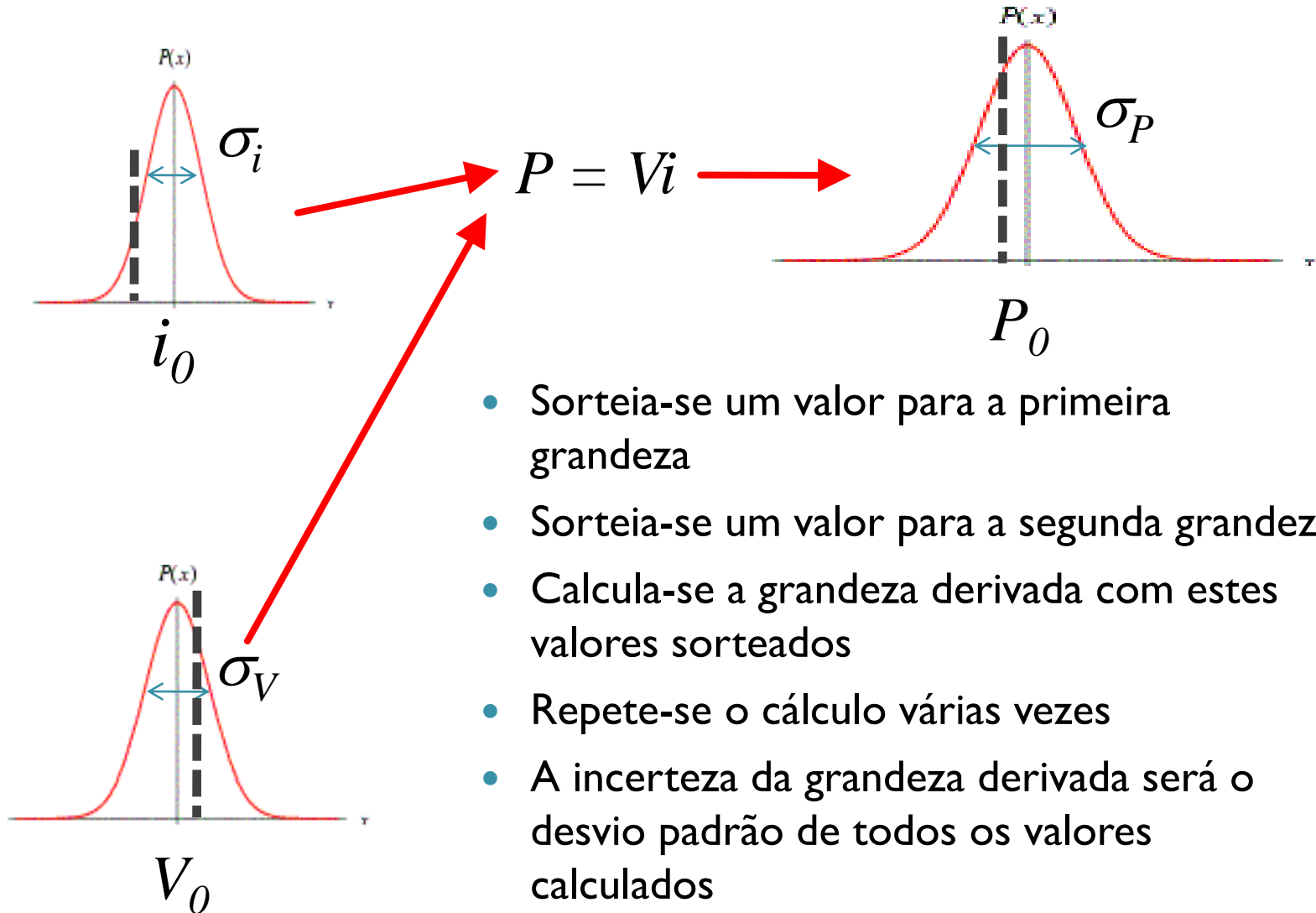
- Mas como fazer em situações mais complexas?

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

- Simulações de Monte Carlo

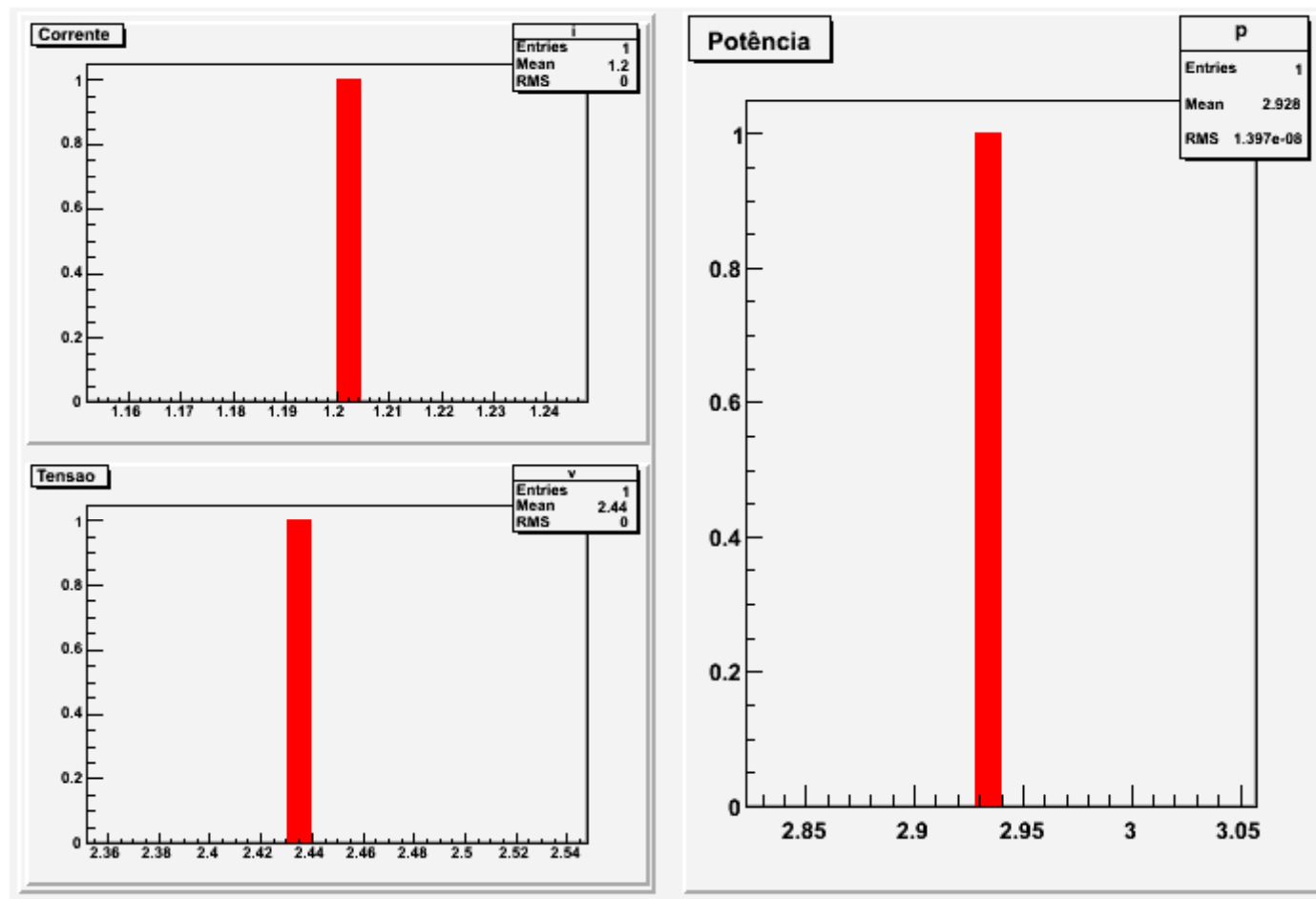
Caso simples, $P = Vi$

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

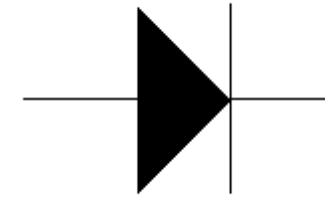
- O conceito é bastante intuitivo
- Fácil de implementar em planilhas eletrônicas (Excel, OO, etc)
- Não é necessário fazer as derivadas parciais para propagar as incertezas
- Independente da complexidade das contas, que podem tornar o cálculo de derivadas parciais muito complicados



Atividades 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

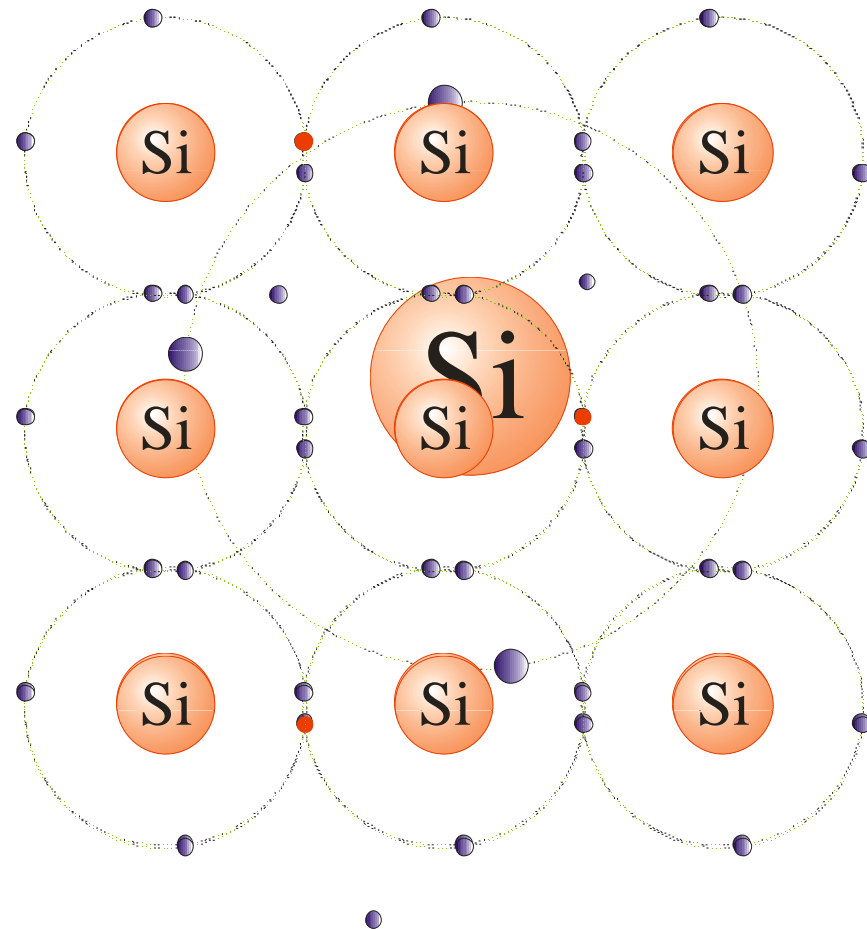
O que é um diodo?



- 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?

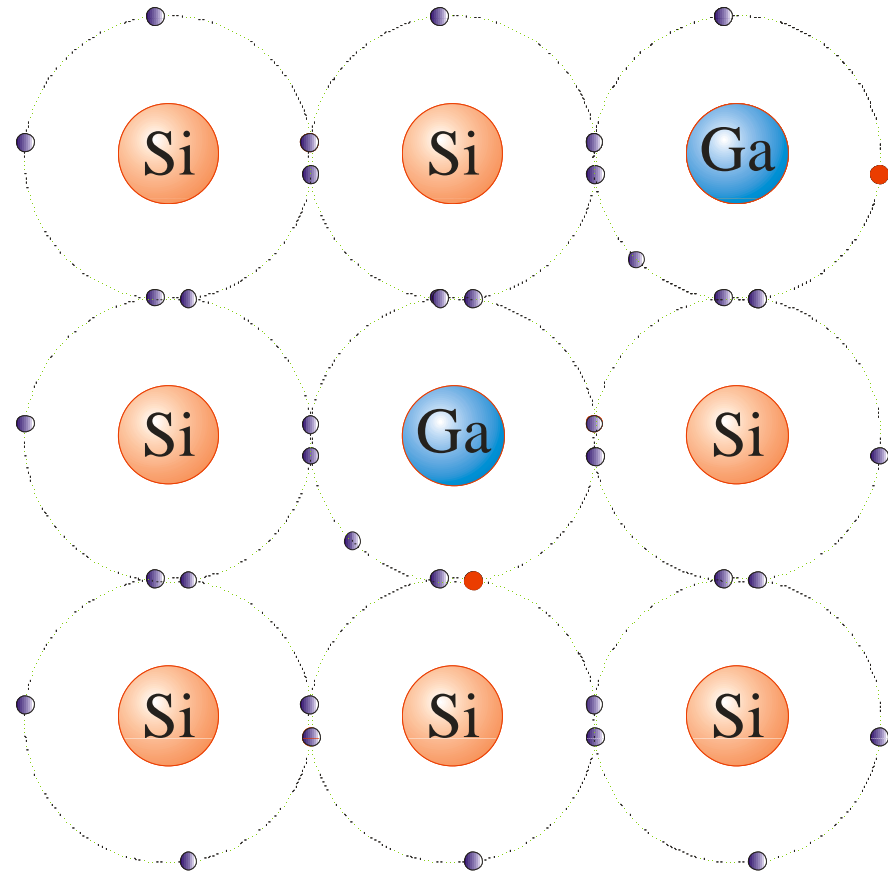
Cristais de semi-condutores tetra-valentes

- 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



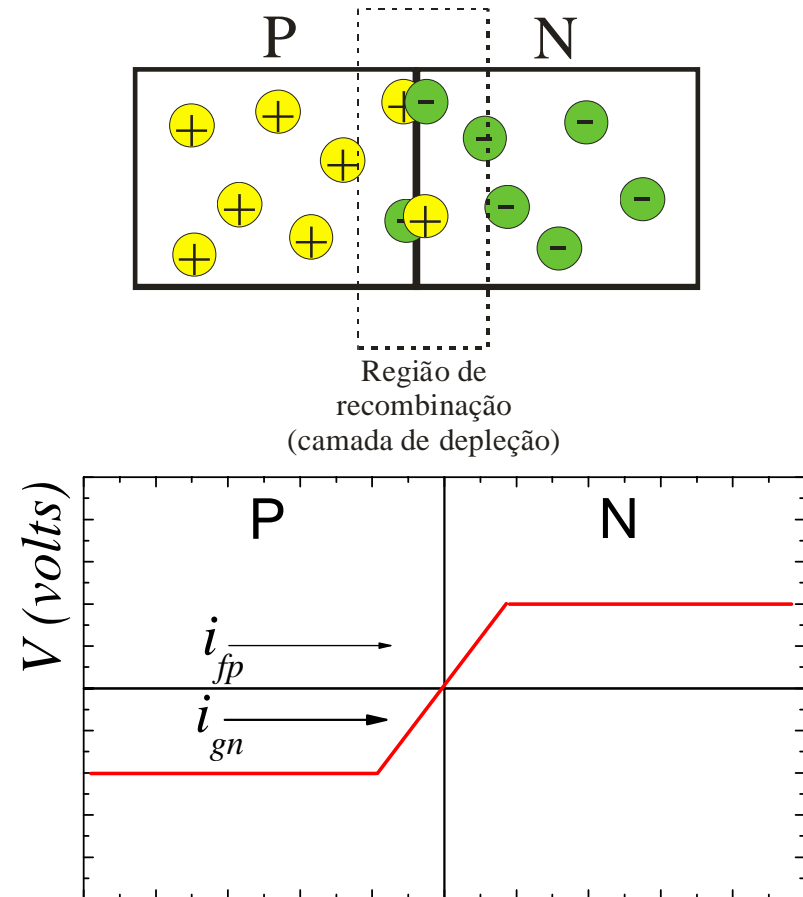
Dopando o cristal (junções N e P)

- 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

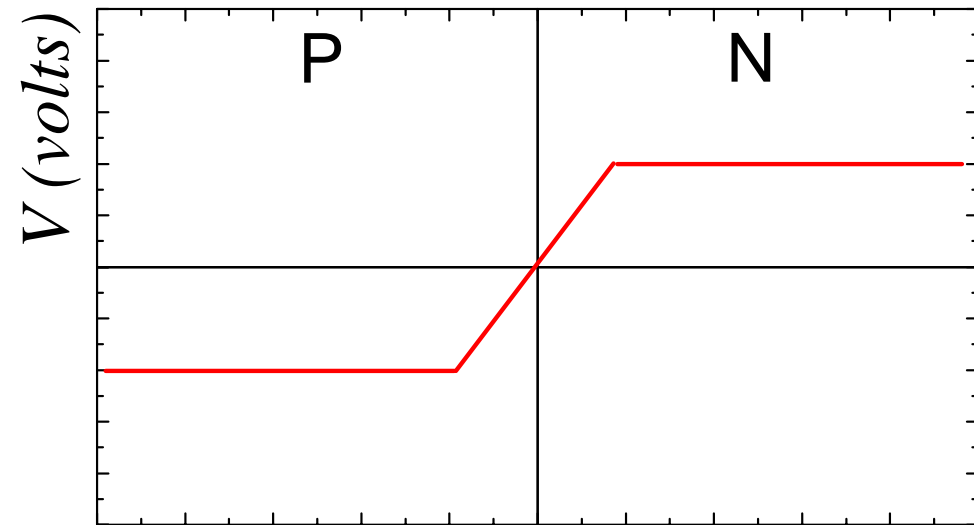


O diodo é uma junção PN

- 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

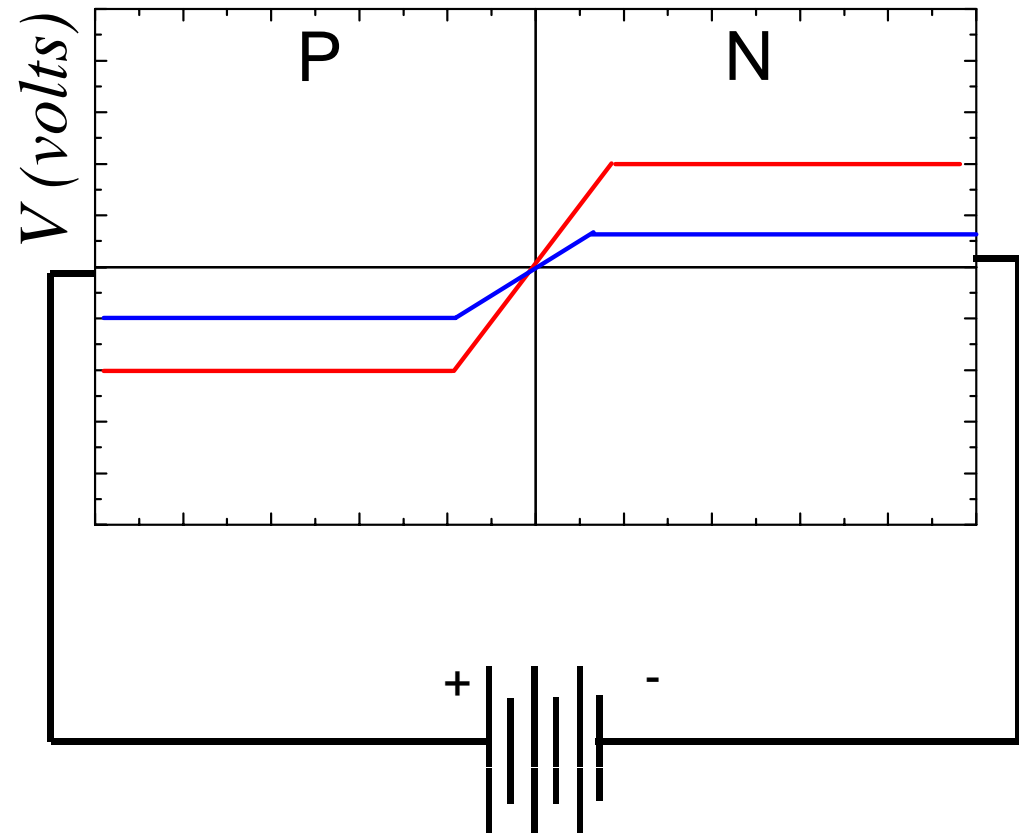


Aplicando tensões em diodo



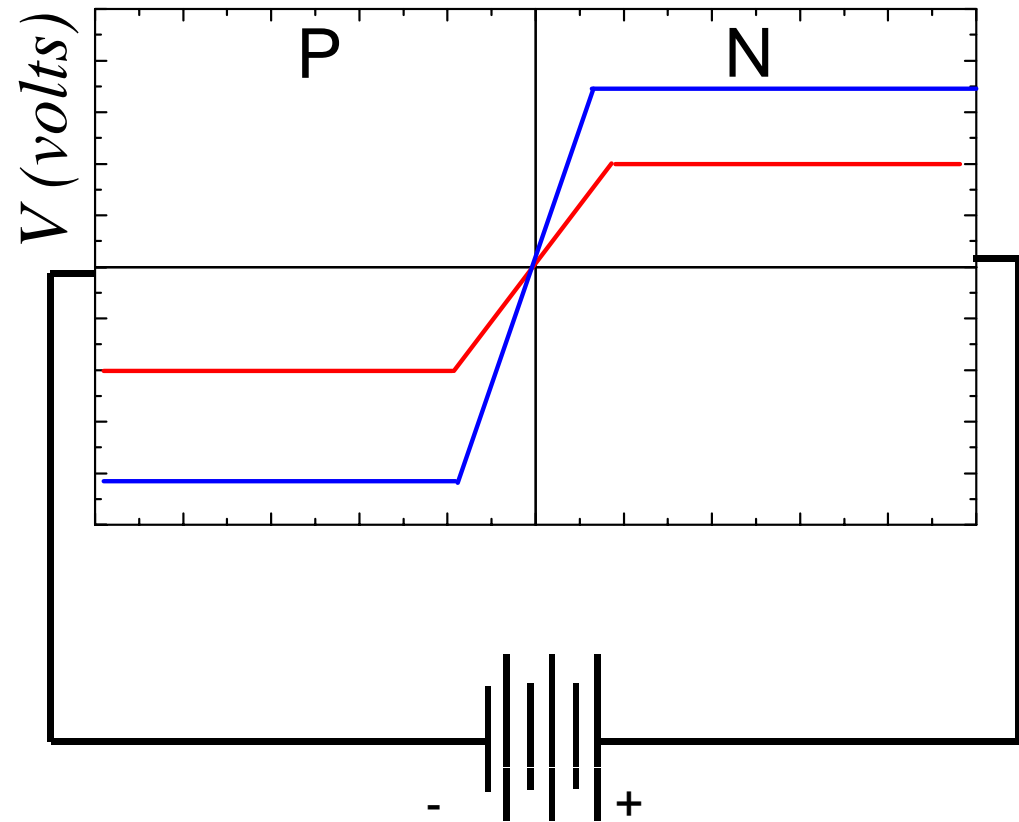
Aplicando tensões em diodo

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



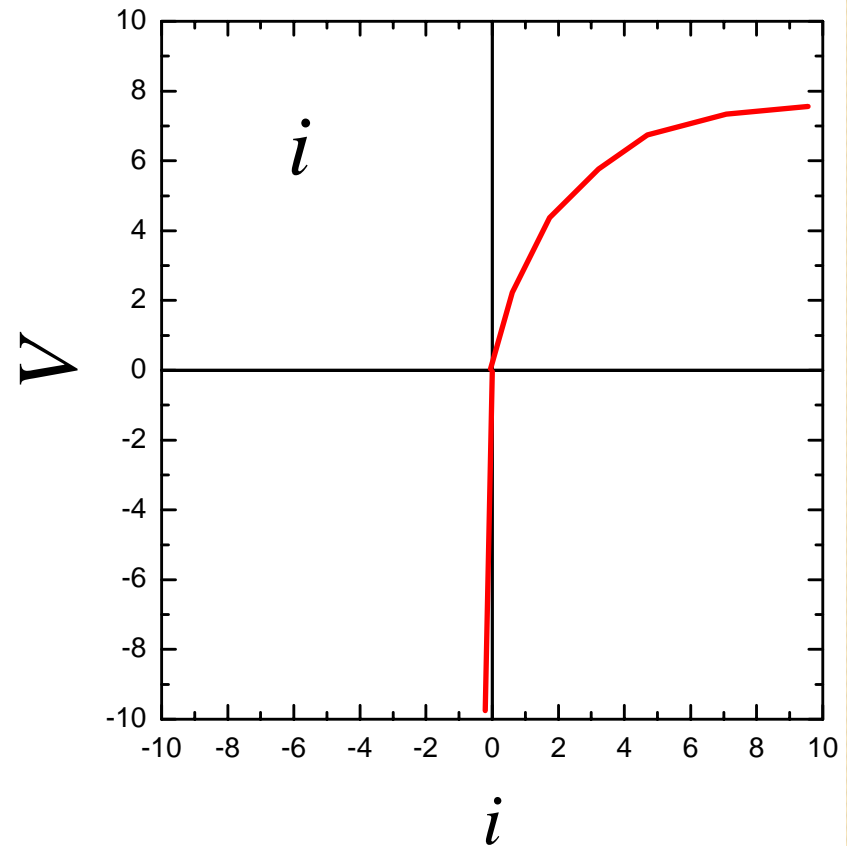
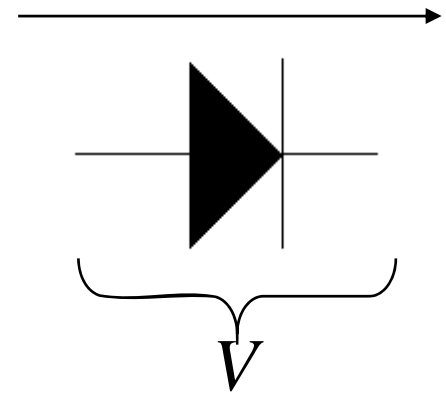
Aplicando tensões em diodo

- 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

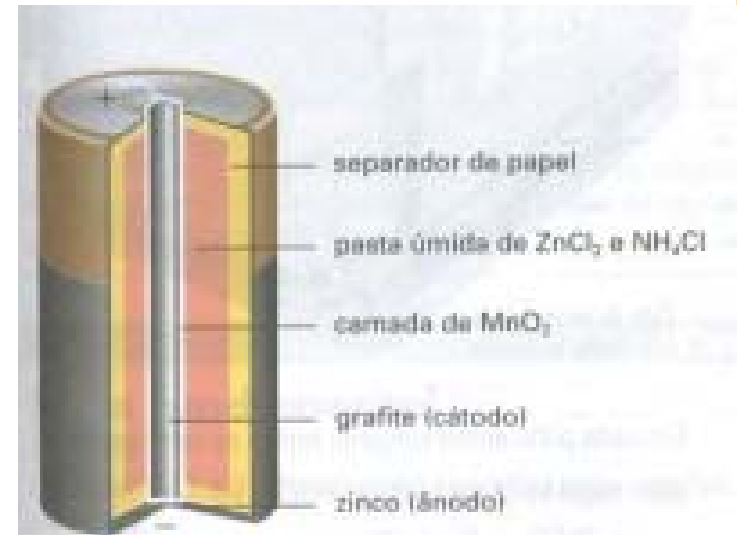
- Levantar a curva característica do diodo para polarização direta
 - Espera-se que R_{diodo} seja pequena. Qual circuito utilizar?
 - Quantos pontos medir? Definir bem a curva.
 - Procurar um modelo teórico para a curva característica do diodo e aplicá-lo aos dados
 - Dica: ver apostilas do ano passado.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

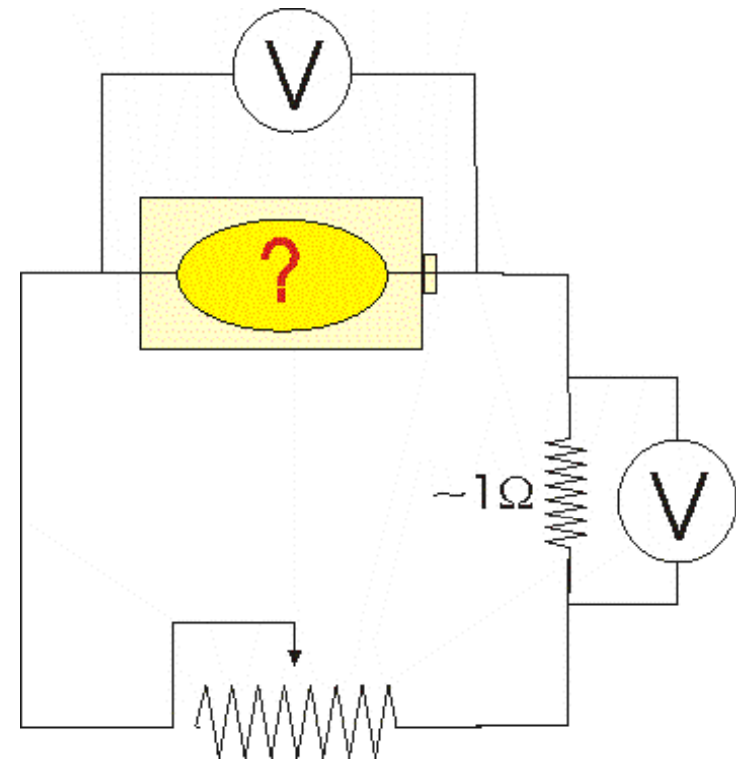
- Qual o modelo elétrico que a gente pode utilizar nos projetos de circuitos para uma pilha comum?



- 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?