

Prof. Antonio Domingues dos Santos
adsantos@if.usp.br
Ramal: 6886
Mário Schemberg, sala 205

Prof. Leandro Barbosa
lbarbosa@if.usp.br
Ramal: 7157
Ala1, sala 225

Profa. Eloisa Szanto
eloisa@dfn.if.usp.br
Ramal: 7111
Pelletron

Prof. Henrique
Barbosa
hbarbosa@if.usp.br
Ramal: 6647
Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin
nelson.carlin@dfn.if.usp.br
Ramal: 6820
Pelletron

Prof. Paulo Artaxo
artaxo@if.usp.br
Ramal: 7016
Basilio, sala 101

Circuitos

<http://lababerto.if.usp.br>

Física Exp. 3
Aula 2, Experiência 1

Energias Renováveis

1. Curva característica de pilha recarregável
2. Curva característica de painel solar e LED
 - Rever ajuste linear por χ^2
3. Montar a rede elétrica de uma casa
 - Caráter prático, ligar mundo real à teoria em sala
4. Carga da bateria com o painel solar e potência
 - Ajuste linear de função não linear: linearização

Para a folha de dados

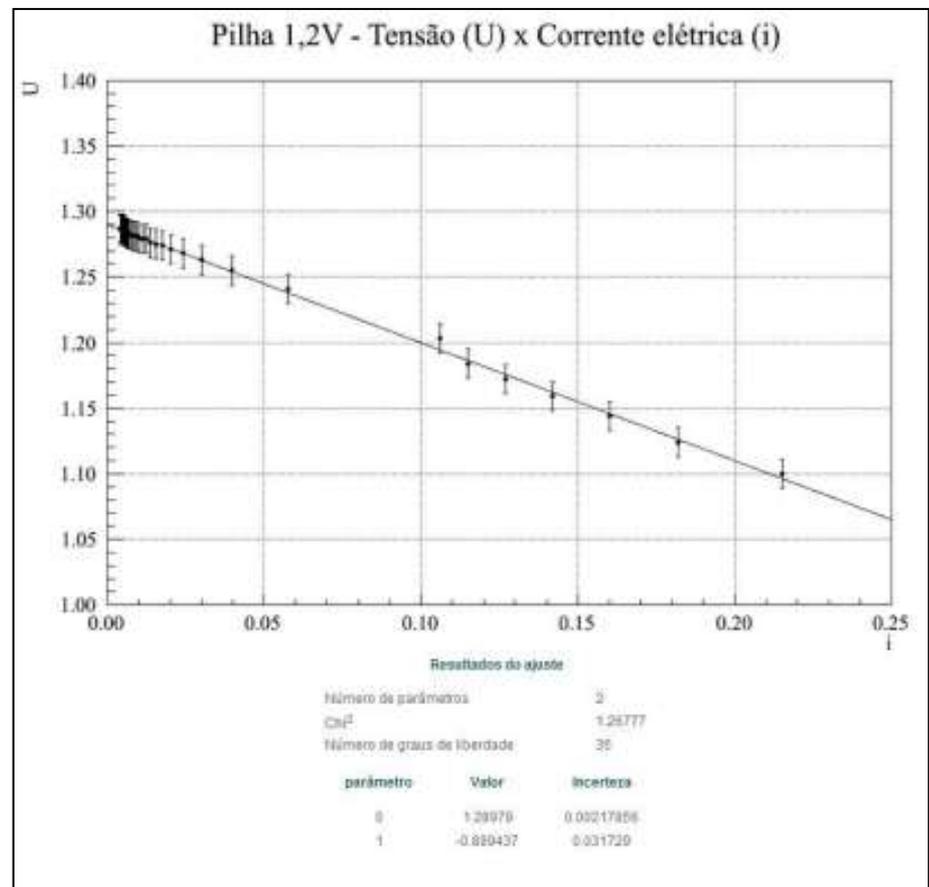
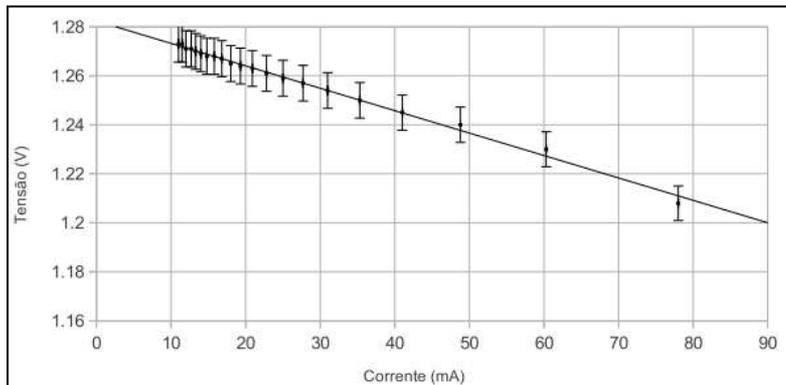
- Indique a equação que você usou como modelo teórico para a tensão na pilha em função da corrente e de alguns destes parâmetros:
 - a força eletromotriz \mathcal{E}_0 ,
 - a resistência interna R_g e
 - a corrente máxima i_{\max} .
- Faça o gráfico, com barras de erro e com a função ajustada por mínimos quadrados. Coloque o resultado do ajuste!
- Lembre-se, é uma folha de dados, não precisa de: introdução, objetivos, discussão, etc, etc...

Resultado Típico

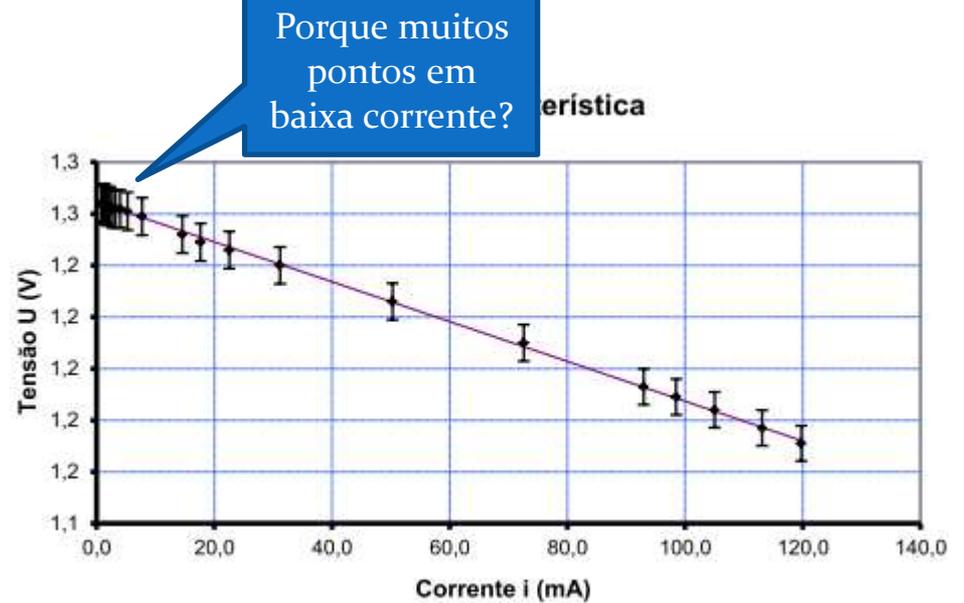
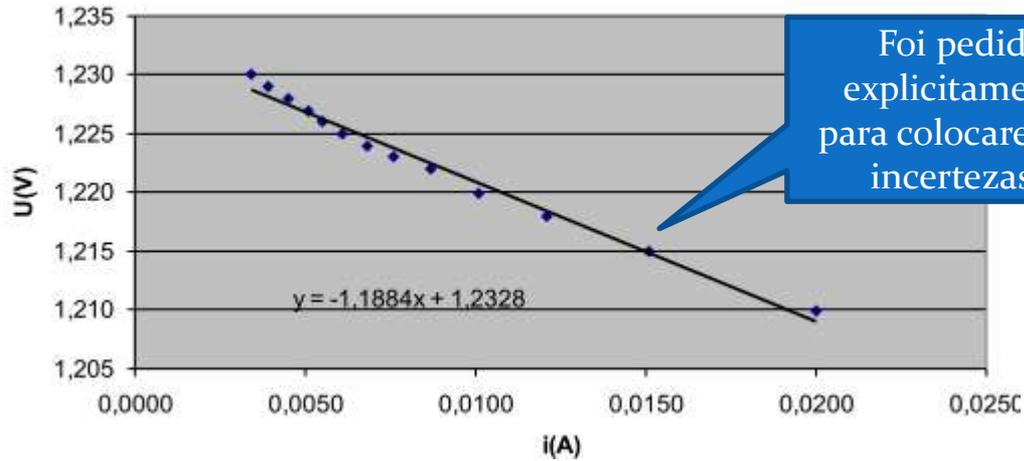
Equação da tensão na pilha em função de ε_0 , R_g e i :

$$V_{ab} = \varepsilon_0 - iR_g$$

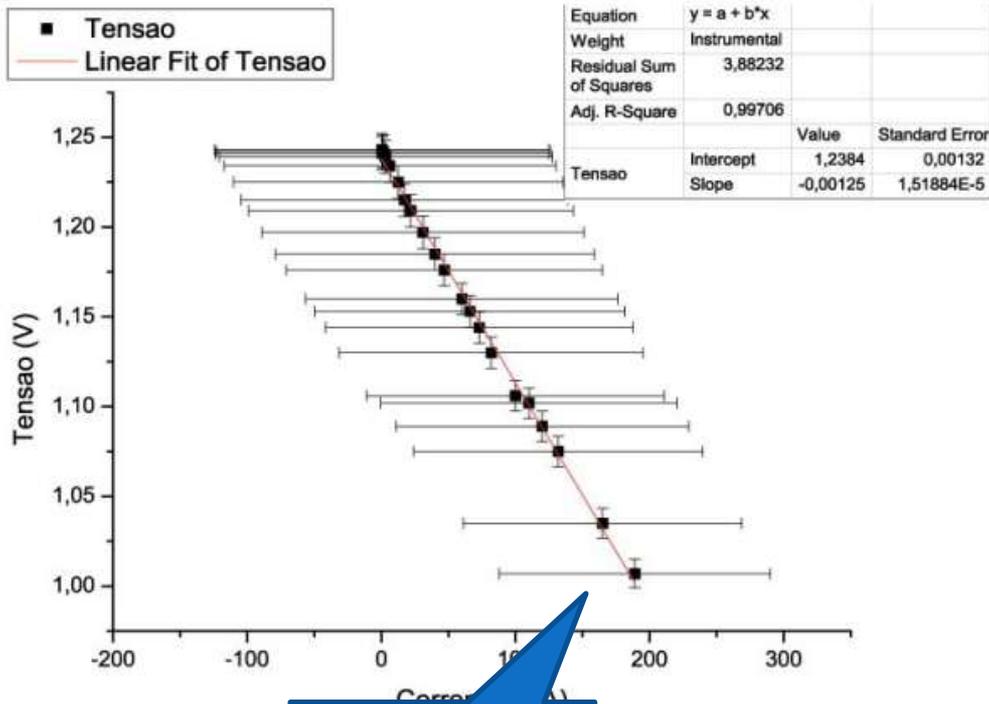
Eq. 1



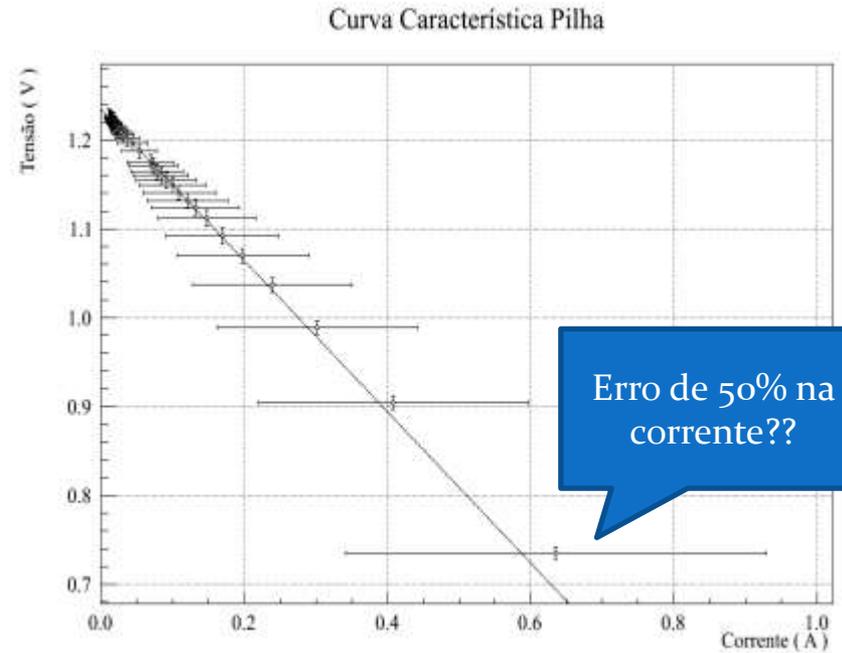
Problemas



Problemas



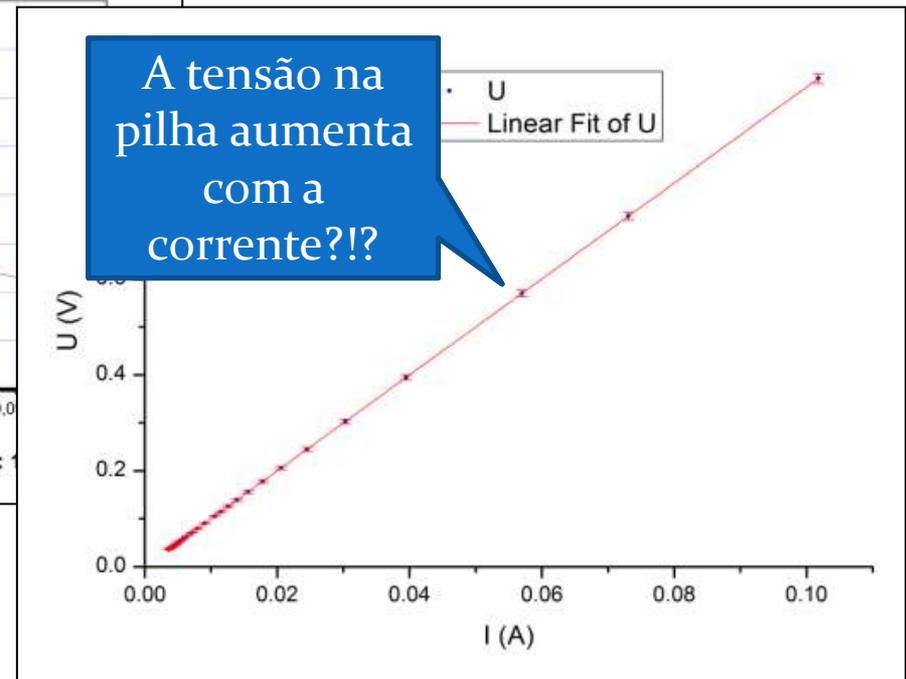
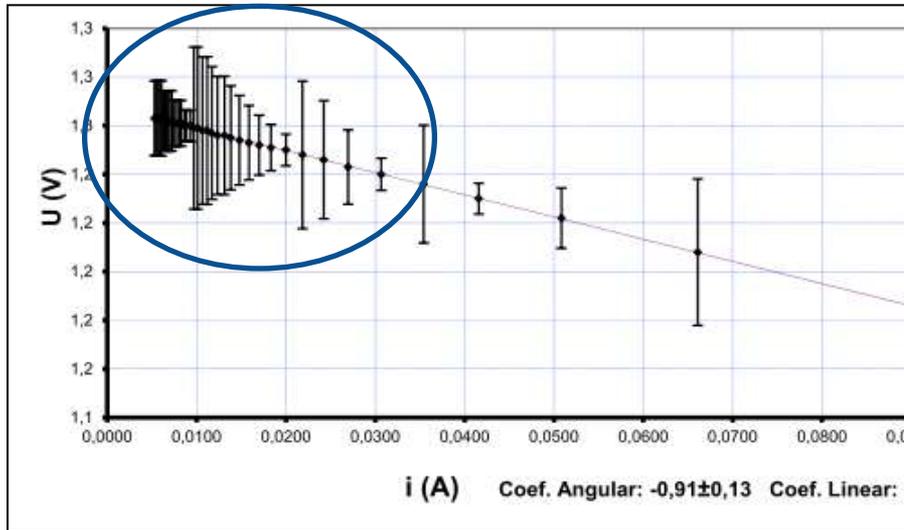
Erro de 50% na corrente??



Erro de 50% na corrente??

Problemas - 2

- Reveja a teoria de erros ensina em lab 1 e 2



Considerando-se que a resistência dos cabos é nula, a corrente é máxima quando $U = 0$ em (2):

$$i(U) = \frac{\mathcal{E}_0 - U}{r} \Rightarrow i_{max} = \frac{\mathcal{E}_0}{r}$$

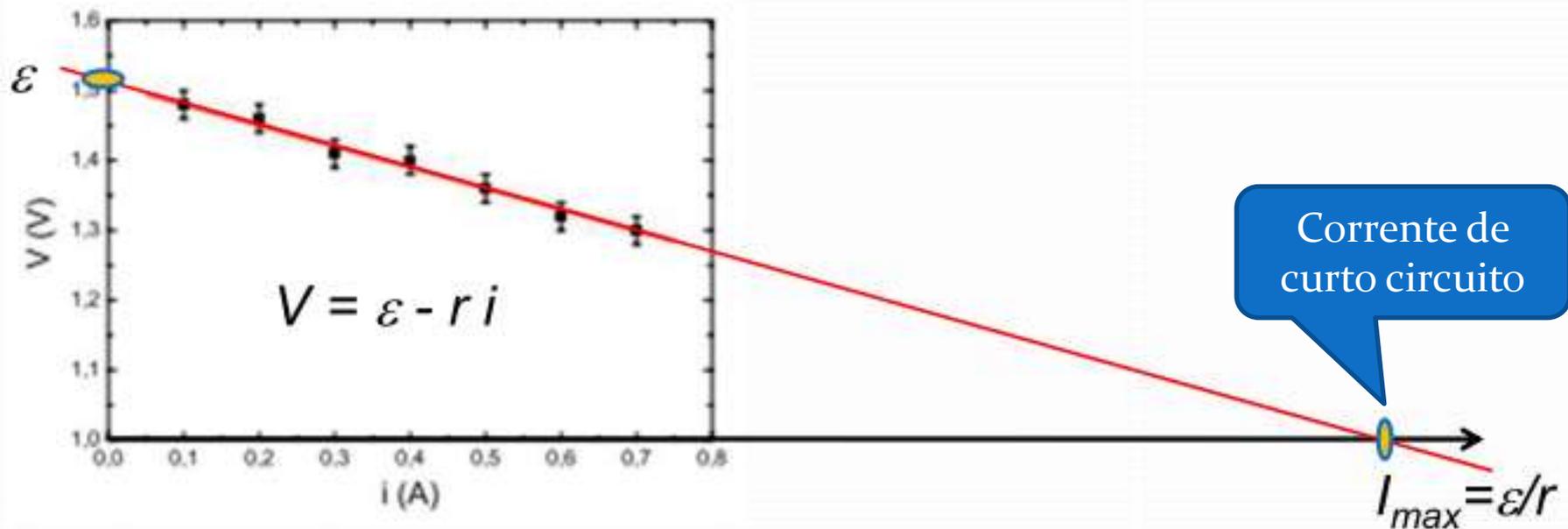
Propagando devidamente a incerteza:

$$i_{max} = 1,435 \pm 0,051 A$$

Como calcular a corrente máxima?

Consistência da análise

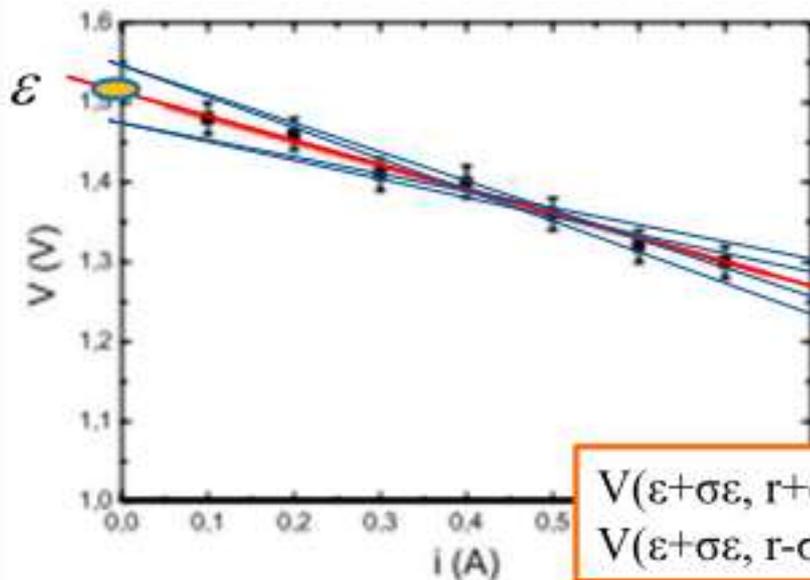
- Medimos V e i
 - De maneira independente, com erros não correlacionados
- Há uma dependência linear.
 - Podemos usar MMQ para determinar os parâmetros ε, r
 - $\varepsilon \pm \Delta\varepsilon$ e $r \pm \Delta r$



Consistência da análise

- $\varepsilon \pm \Delta\varepsilon$ e $r \pm \Delta r$
- Mas qual o erro em I_{\max} ?
 - Podemos propagar os erros?
 - **NÃO! Pois ε e r não são independentes!!**

$$V = \varepsilon - r i$$



$V(\varepsilon + \sigma_\varepsilon, r + \sigma_r)$; $V(\varepsilon - \sigma_\varepsilon, r - \sigma_r)$;
 $V(\varepsilon + \sigma_\varepsilon, r - \sigma_r)$ e $V(\varepsilon - \sigma_\varepsilon, r + \sigma_r)$

```

After 5 iterations the fit converged.
final sum of squares of residuals : 1.24456e-008
rel. change during last iteration : -5.58296e-015

degrees of freedom (FIT_NDF)      : 28
rms of residuals (FIT_STDFIT)    : 2.10828e-005
reduced chisquare) = WSSR/ndf    : 4.44485e-010

Final set of parameters  Asymptotic Standard Error
=====
a          = -0.000277589  +/- 3.313e-006  (1.194%)
b          =  0.00340543   +/- 1.072e-005  (0.3148%)

correlation matrix of the fit parameters:
      a      b
a      1.000
b     -0.933  1.000
    
```

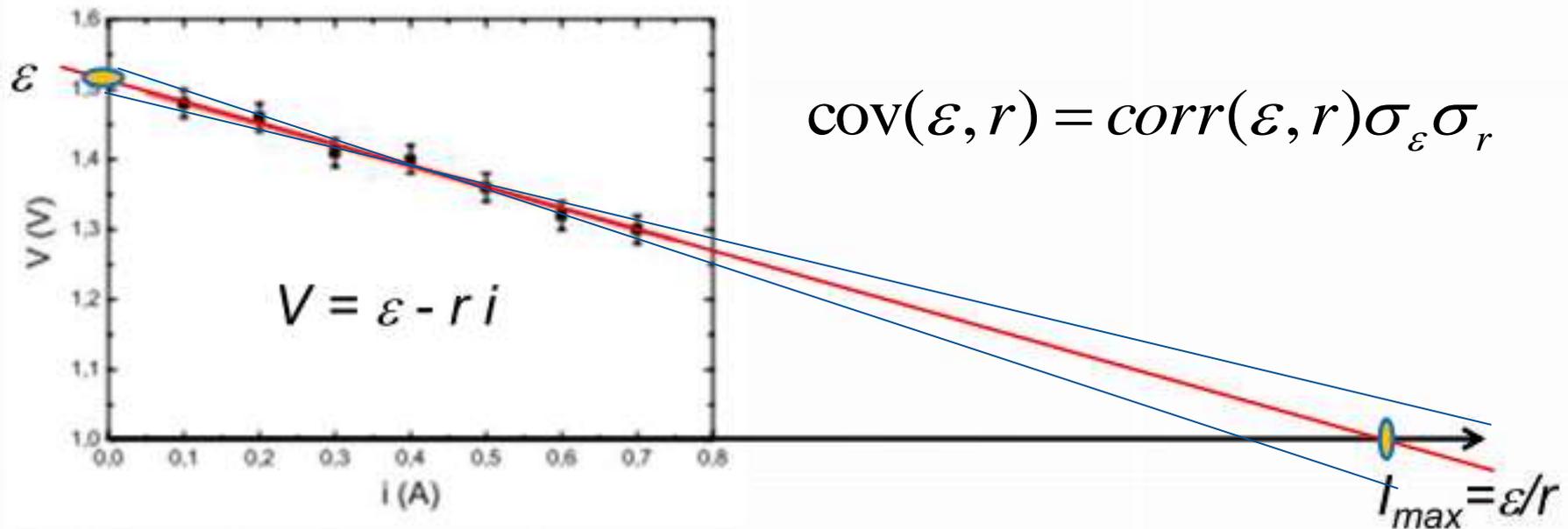
Podemos calcular: $I_{\max} = \varepsilon / r \dots$ Não podemos calcular ΔI_{\max} pela propagação!

$I_{\max} = \varepsilon / r$

Consistência da análise

- Neste caso, precisaríamos levar em conta esta $i_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}$ covariância:

$$\left(\frac{\sigma_{i_{\max}}}{i_{\max}} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_r}{r} \right)^2 - 2 \frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon} \frac{\sigma_r}{r} \text{corr}(\varepsilon, r)$$

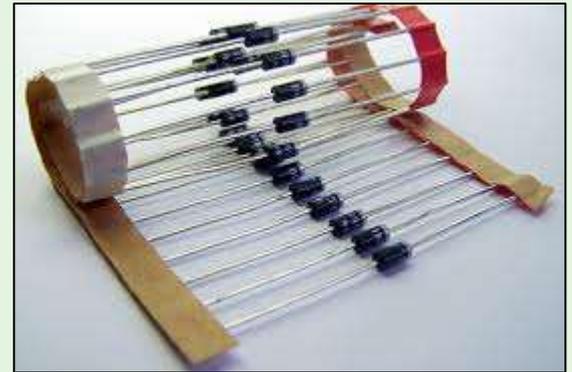
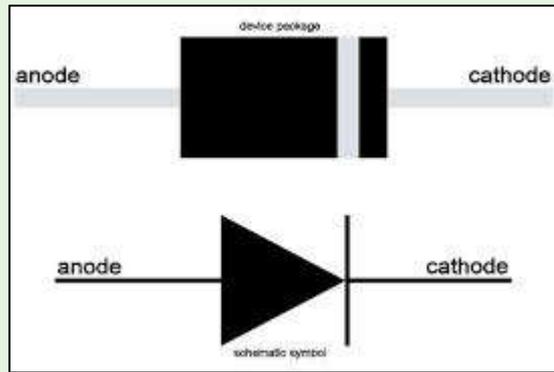


Pergunta para semana que vem

- Leia a apostila de curvas características:
 - Pilha: pag 28-33
 - Diodo: pag. 19-27
- ... e no começo da próxima aula, entregue em papel a resposta para a pergunta:
 - Você mediu a curva característica de 1 pilha e determinou: \mathcal{E}_o , R_g e i_{\max} . O que aconteceria se você tivesse usado duas pilhas idênticas em série? E se fosse em paralelo?

Energias Renováveis

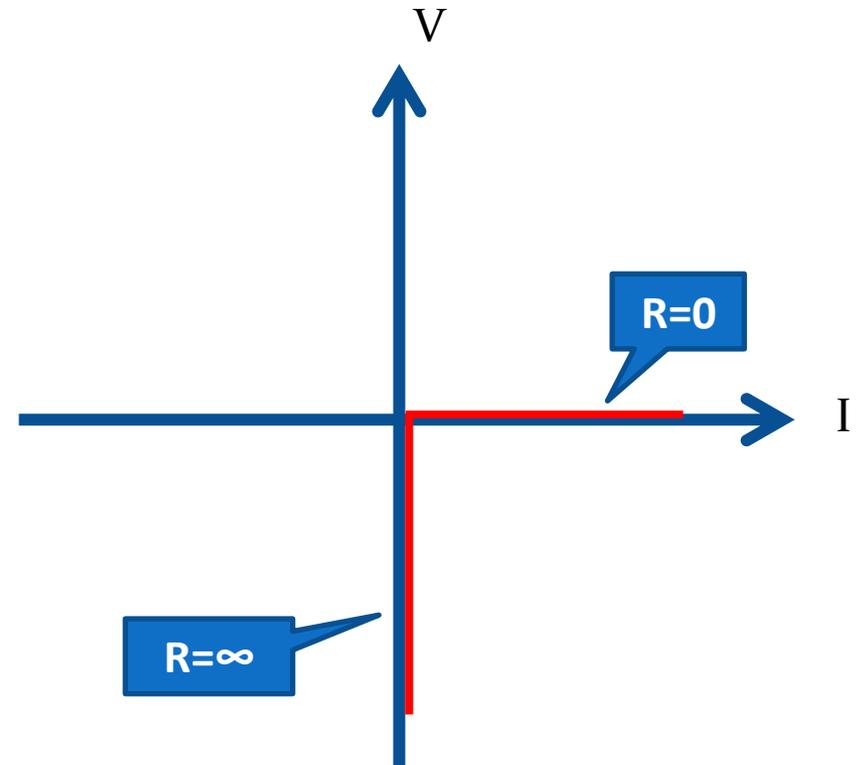
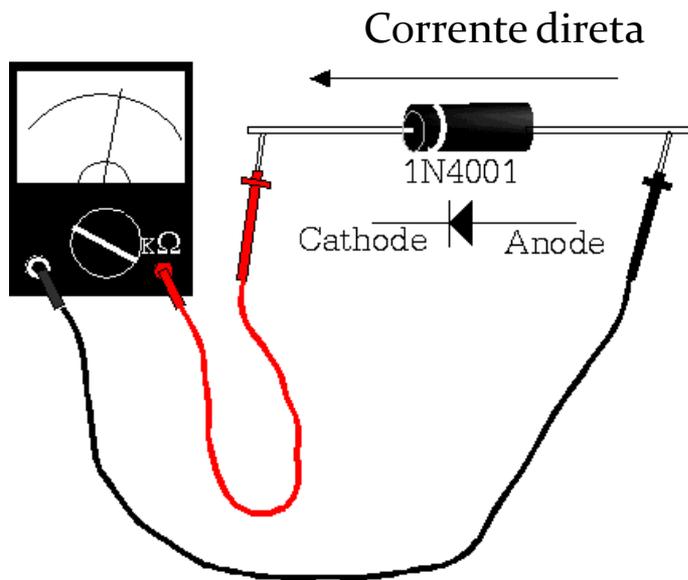
1. Curva característica de pilha recarregável
2. Curva característica de painel solar e LED
 - Rever ajuste linear por chiz
3. Montar a rede elétrica de uma casa
 - Caráter prático, ligar mundo real à teoria em sala
4. Carga da bateria com o painel solar e potência
 - Ajuste linear de função não linear: linearização



Parte 1 – Diodo

Diodo ideal

- O diodo ideal é um dispositivo que **conduz perfeitamente a corrente elétrica num sentido (resistância zero)** e **não conduz no sentido inverso (resistância infinita)**.



Diodo Real

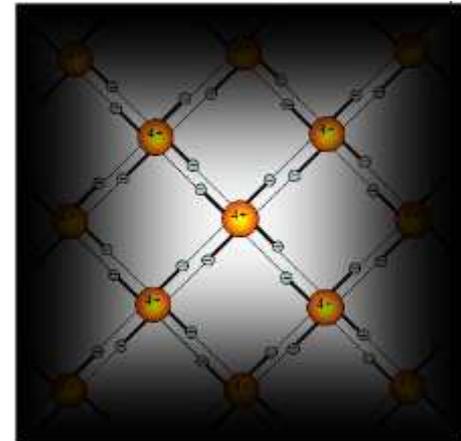
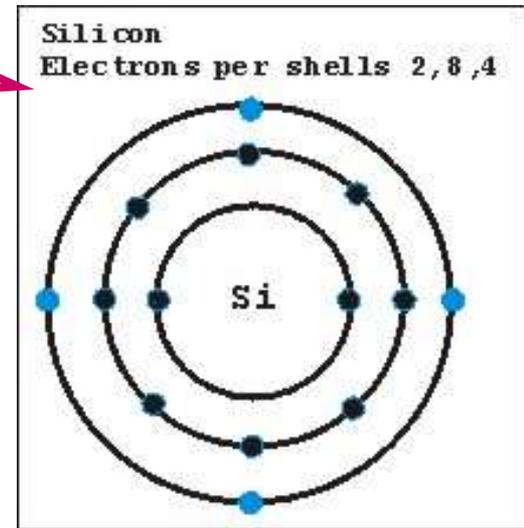
- O **diodo real** se comporta de maneira parecida, isto é, apresenta **baixa resistância** elétrica para a corrente fluindo num sentido e **alta resistância** elétrica para a corrente fluindo no sentido inverso.
- Diodos são, em geral, construídos de materiais semi-condutores como o germânio e o silício.



Silício

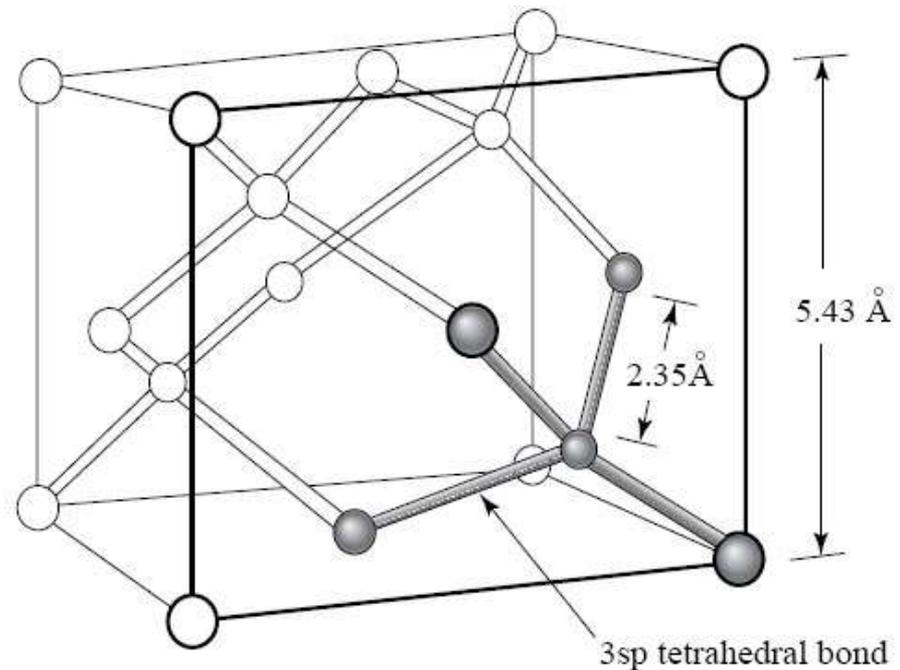
Si: 14 p
28(n+p)
14e⁻

- O silício é um semi-condutor que tem 4 elétrons na última camada (elétrons de valência) e pode formar monocristais
 - os átomos do cristal se dispõem num reticulado cristalino de modo que cada átomo **partilha seus quatro elétrons de valência com quatro outros átomos vizinhos**, estabelecendo as chamadas ligações covalentes



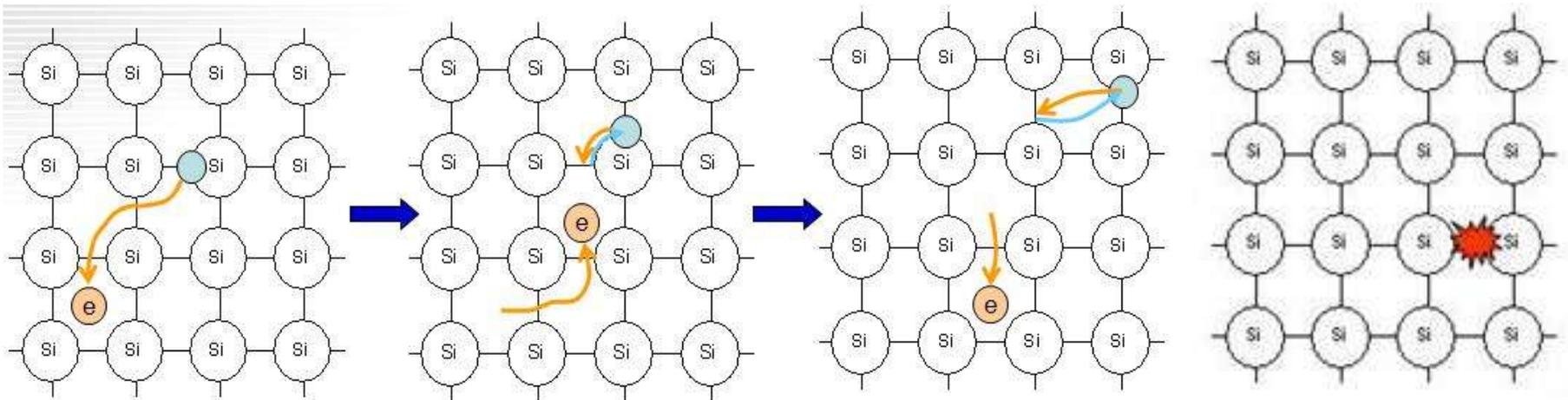
Silício como semicondutor

- Em temperaturas muito baixas todos os elétrons do **Si** estarão ligados à rede cristalina e o cristal se comporta como um **isolante elétrico**, por **não dispor de cargas elétricas livres** que possam participar da condução de correntes.



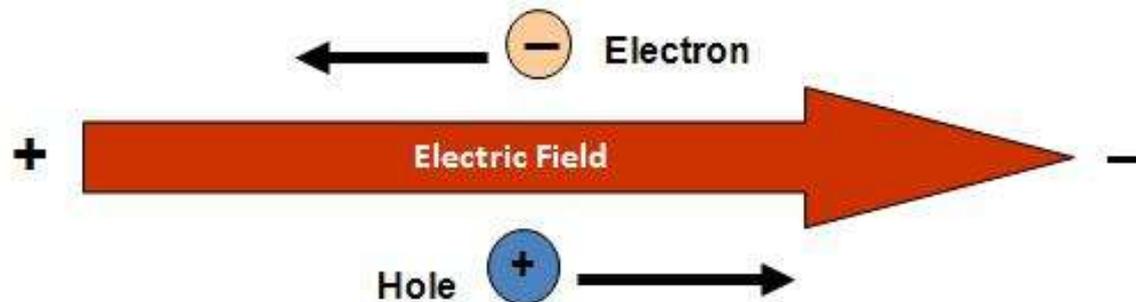
O silício como semicondutor

- À temperatura ambiente ($\approx 300^\circ\text{K}$), a energia térmica é suficiente para romper algumas ligações covalentes, criando um par elétron-lacuna.
- Elétrons e lacunas, ao se encontrarem, se recombinam desaparecendo como partículas livres.



O silício como semicondutor

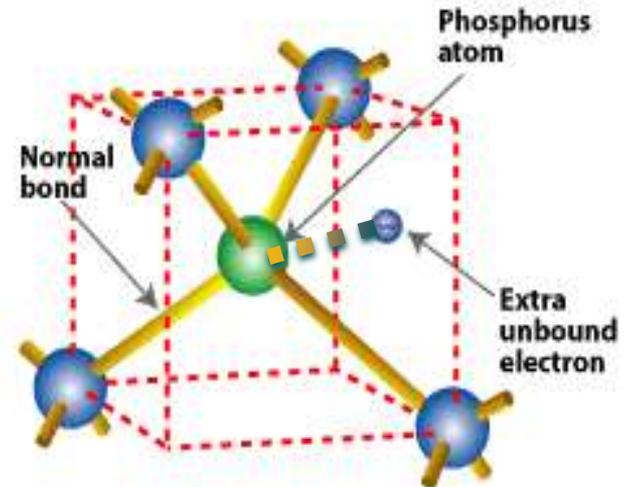
- A concentração de elétrons e lacunas depende da temperatura, aumentando rapidamente com o aumento da temperatura:
 - Na presença de um campo elétrico essas cargas, elétrons livres e lacunas são obrigadas a se mover gerando uma corrente elétrica



- A condução, exclusivamente por meio dos elétrons e lacunas, no mono-cristal puro é chamada de **condução intrínseca** e os elétrons e lacunas, nesse caso, são chamados de **portadores intrínsecos**.

O cristal de silício tipo N

- É possível introduzir diminutas quantidades de impurezas especiais no cristal (~ 1 para cada 10^8 átomos), sem alterar a estrutura cristalina
 - Cada átomo da impureza ocupará o lugar de um átomo de silício do mono-cristal
 - Se a impureza introduzida for **pentavalente** (por exemplo, arsênio, fósforo ou antimônio), quatro de seus elétrons de valência serão usados para as ligações covalentes do silício e o quinto elétron fica “livre”, ou muito fracamente ligado.
 - Esse átomo pentavalente (impureza) é um doador de carga negativa.



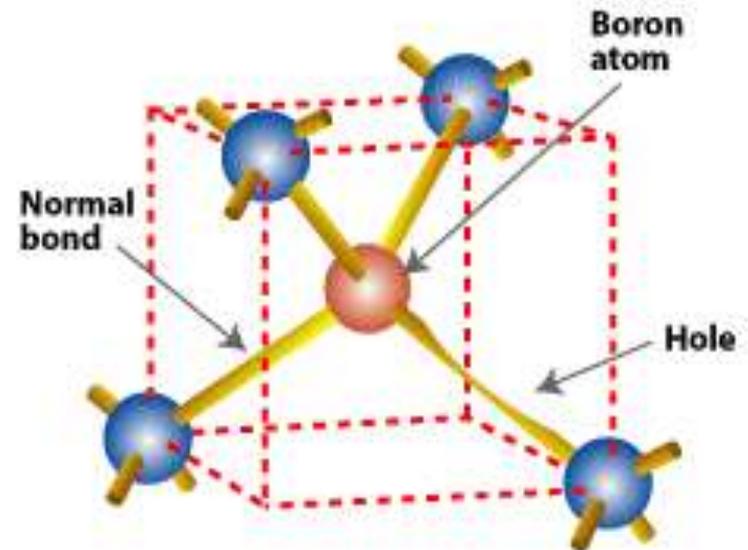
Esse tipo de impureza torna este cristal um cristal **tipo N** por conter um excesso de portadores de carga **negativa** “livres”.

O cristal de silício tipo P

- Se substituirmos alguns átomos do cristal por impurezas trivalentes (por exemplo, gálio, boro, índio), uma das quatro ligações covalentes com o átomo de silício não vai se estabelecer, gerando uma lacuna ou portador de carga positiva.

Em ambos os casos a introdução de impurezas mantém o cristal eletricamente neutro

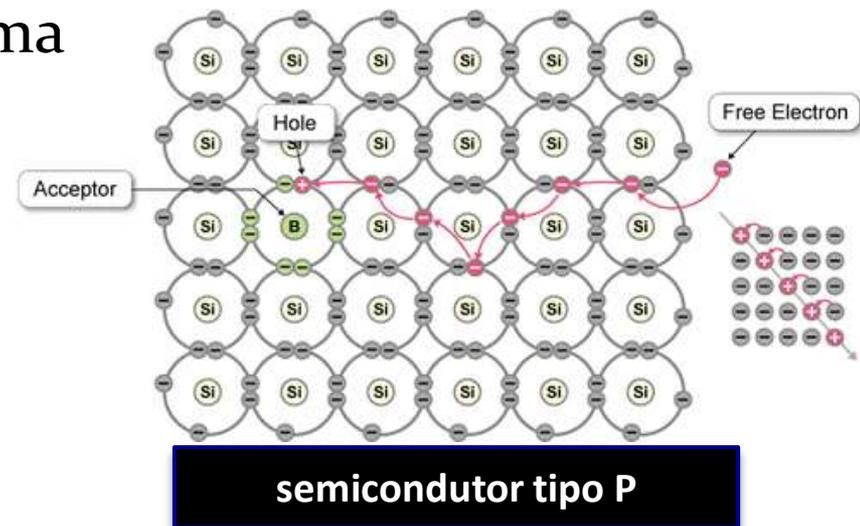
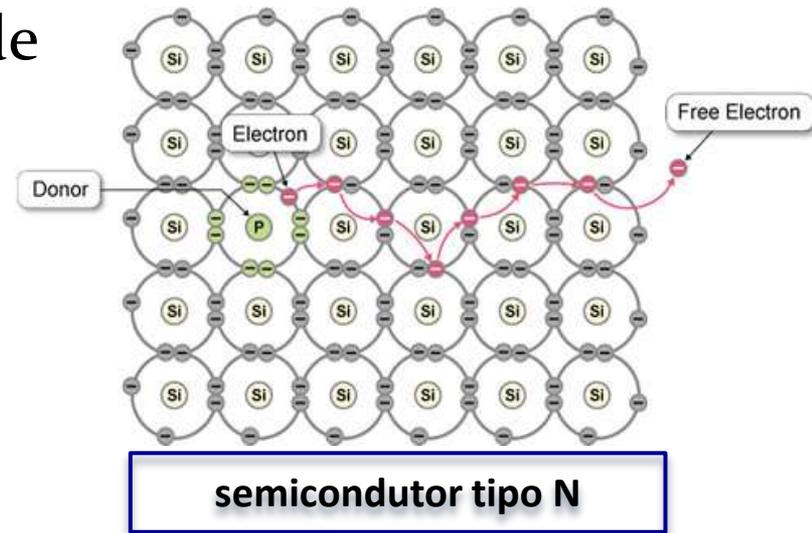
Esse tipo de impureza torna o cristal um cristal **tipo P** por conter um excesso de portadores de carga **positiva** “livres”.



Portadores majoritários

- A estrutura cristalina de cada tipo de cristal de silício:
 - tipo N possui elétrons livres que passeiam pelo cristal
 - tipo P que tem lacunas que “passeiam”... na medida em que elétrons desligados de seus átomos por vão caindo ora numa lacuna ora em outra.

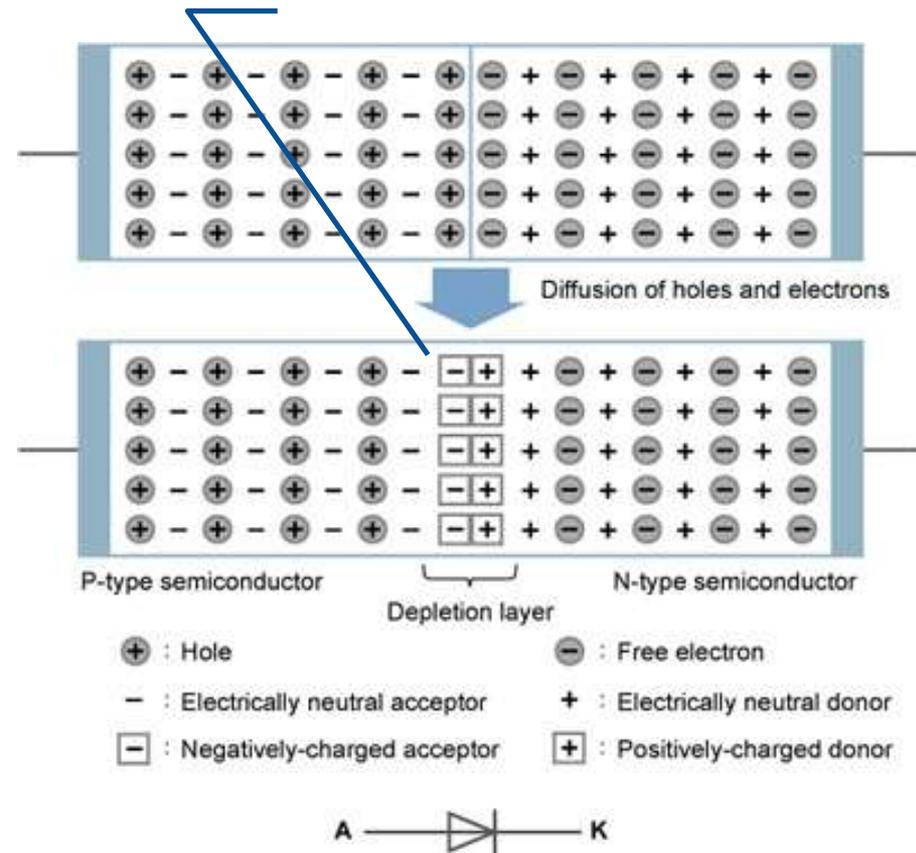
Nesses cristais os portadores de carga são muito mais numerosos que no cristal de silício puro e são chamados de **portadores majoritários**



Junção P-N

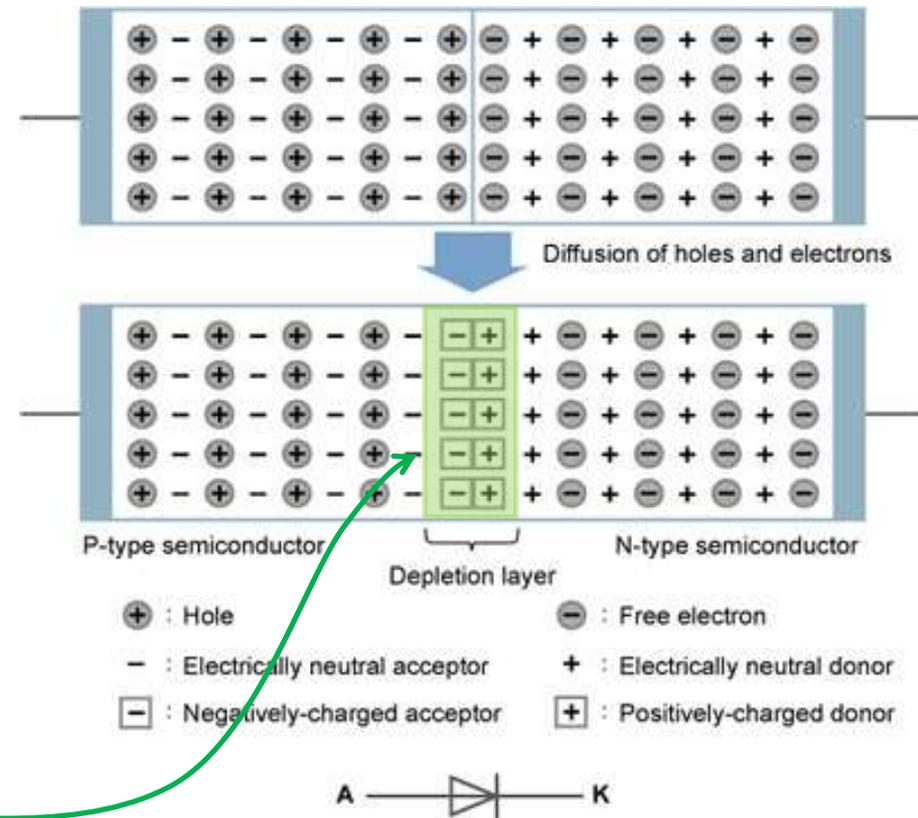
- O que acontece quando se junta um cristal **N** com um cristal **P**?
- As lacunas do cristal **P** tendem a se difundir para o cristal **N**, onde se recombina, e os elétrons da região **N** tendem a se difundir para o cristal **P**, onde também se recombina.

Quando o elétron ocupa uma lacuna do outro lado (ligação covalente faltando um elétron), os dois átomos ligados ficam com excesso de 1 elétron!



Junção P-N

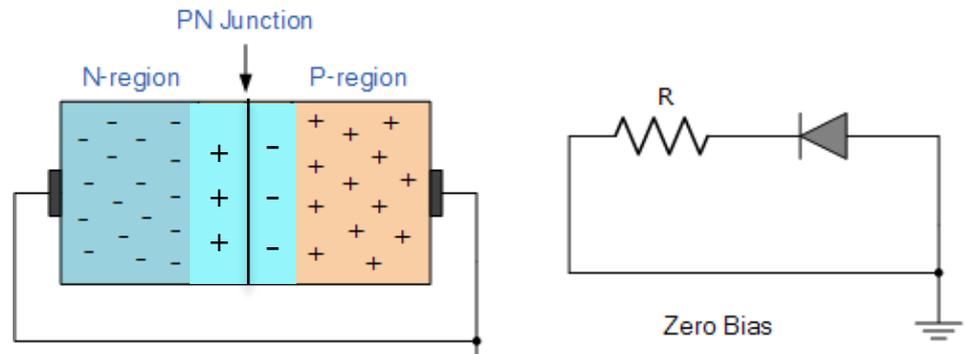
- Quando essa recombinação ocorre forma-se a chamada uma **junção P-N**:
 - Isso faz com que o lado **P** da junção fique com um excesso de elétrons e, portanto, com carga negativa
 - e o lado **N** da junção fique com falta de elétrons, e, portanto, com carga positiva
- Esse processo, que se deve exclusivamente à energia térmica, cria uma zona com carga espacial, positiva de um lado e negativa do outro, nas vizinhanças da junção chamada de **camada de depleção**.



Barreira de potencial

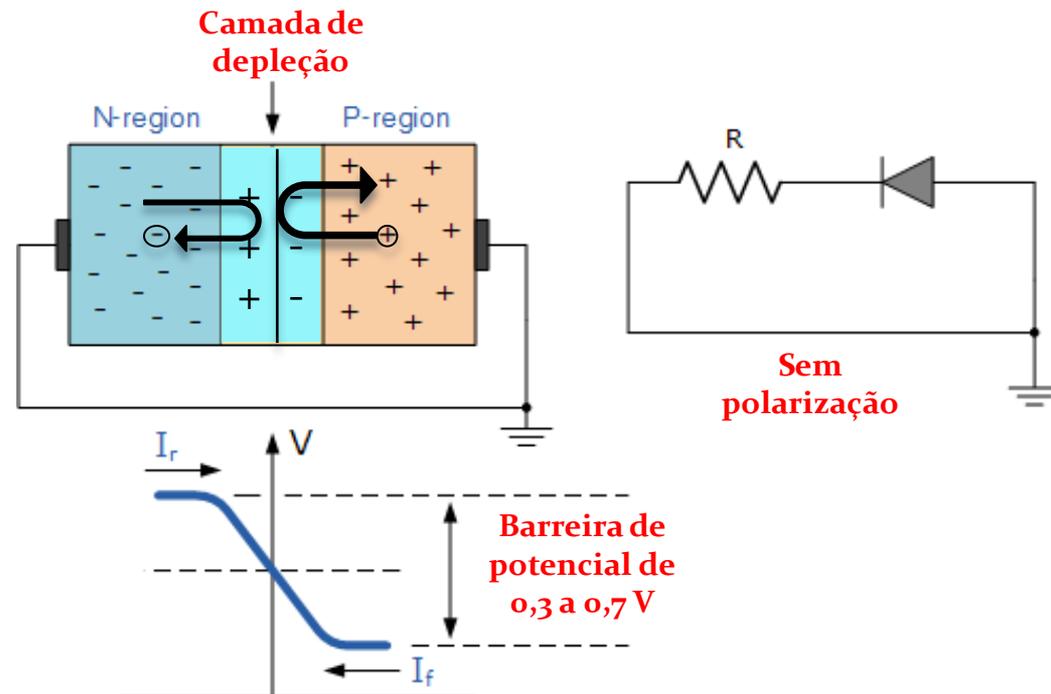
- Chega um ponto em que outras cargas livres (de portadores majoritários) que entrem na região da camada de depleção vão estar numa região que **não** tem outras cargas livres, mas está carregada com carga **diferente de zero** (porque o lado **N** da junção ficou **positivo** e o lado **P** da junção ficou **negativo**):

- Essas cargas livres vão encontrar uma **barreira de potencial** que vai desencorajar que elas continuem o processo de difusão na junção.



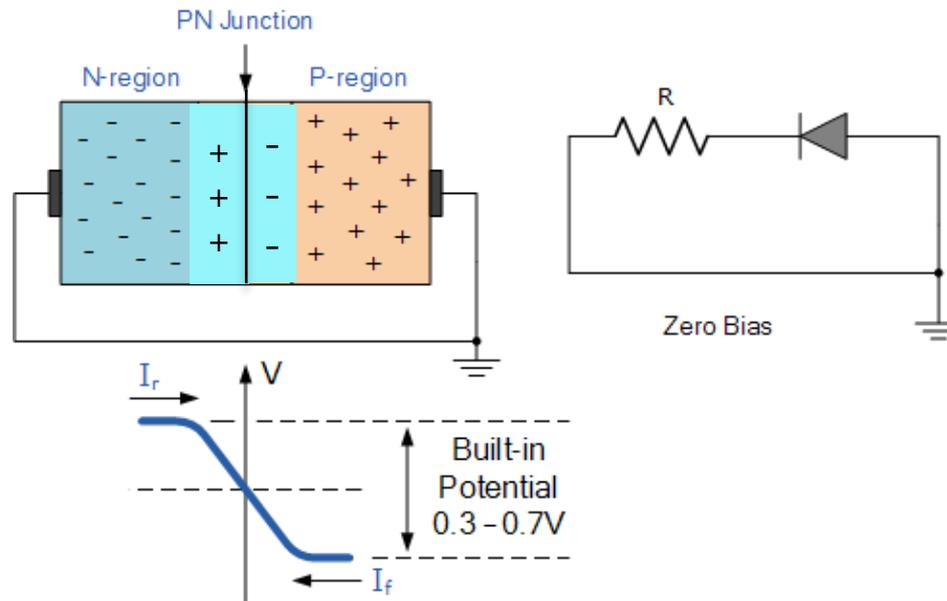
Difusão de cargas

- Assim, se
 - ...os elétrons que sobraram do lado N entrarem na zona de depleção vão ser repelidos de volta ao lado N
 - ... as lacunas que sobraram do lado P entrarem na zona de depleção serão repelidas de volta para o lado P.
- Com isso, o processo de difusão de cargas para.



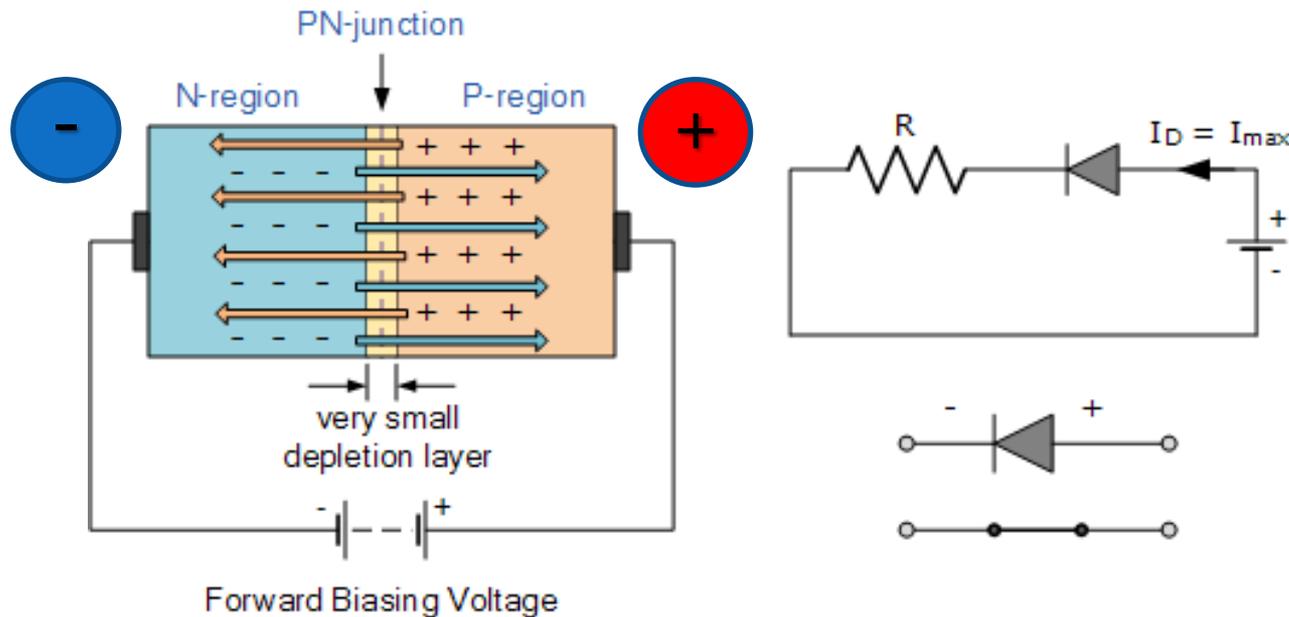
Barreira de potencial

- Ou seja para que uma carga livre de qualquer lado da junção para penetrar na camada de depleção, ela **tem que ter uma energia extra** para superar as **forças de repulsão** dos átomos doadores e aceitadores de elétrons:



Polarização direta

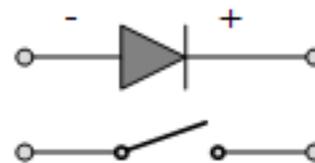
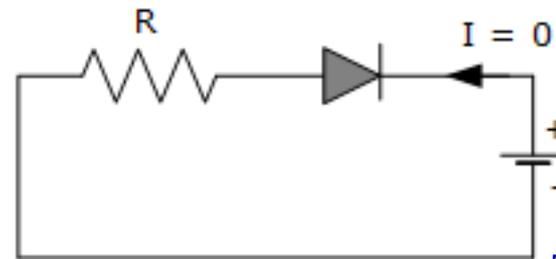
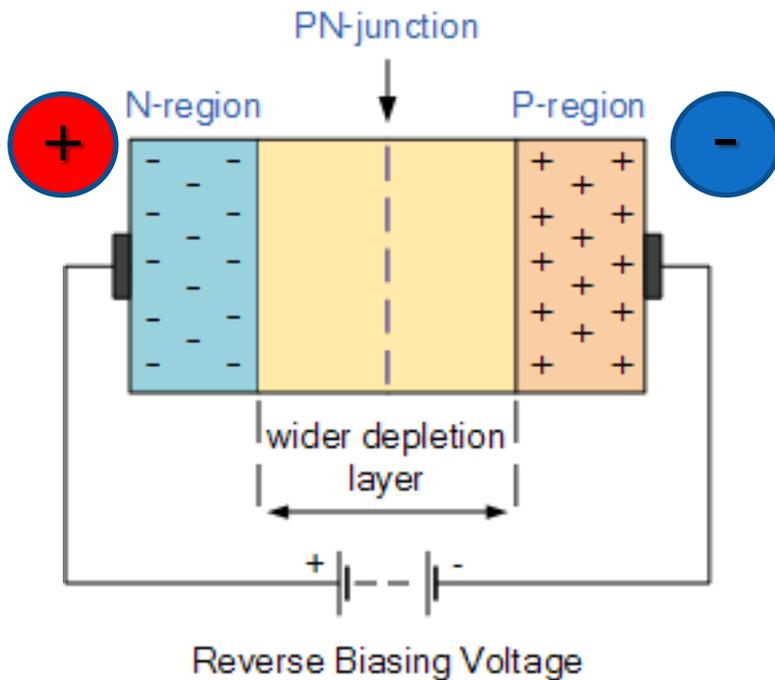
- Se fornecermos essa energia extra, aplicando uma diferença de potencial externa negativa do lado **N** e positiva do lado **P** e **maior** que o valor da barreira de potencial:
 - as lacunas do lado **P** serão repelidas para o lado **N** e os elétrons do lado **N** serão repelidos para o lado **P** da junção, vamos ter **corrente fluindo através da junção!**



E tem o efeito de fazer com que a ddp através da função caia: a camada de depleção fica mais fina

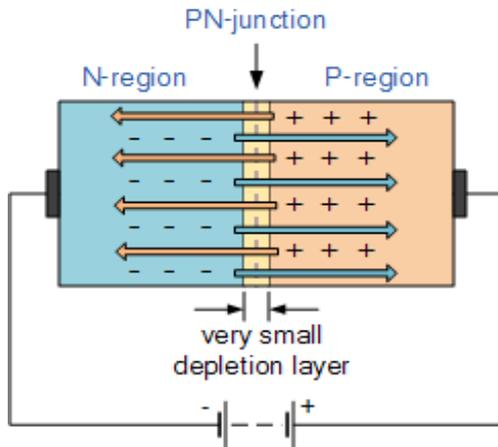
Polarização reversa

- Por outro lado se polarizarmos a junção inversamente: tensão positiva do lado **N** e tensão negativa do lado **P**
 - Os elétrons livres do lado **N** serão atraídos para o polo positivo e para longe da junção e as lacunas do lado **P** também se afastem da junção: e a **corrente deixa de fluir**.

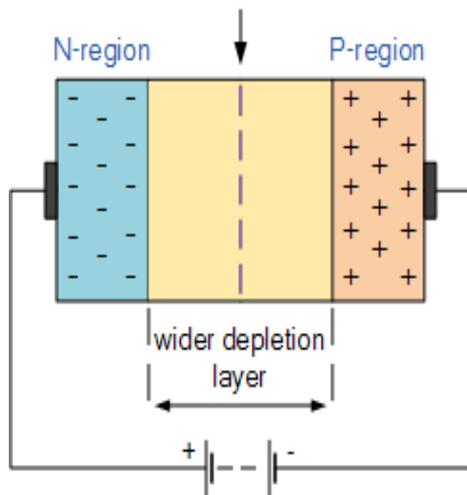


E tem o efeito de fazer com que a ddp através da junção aumente: a camada de depleção se torna mais larga

Resumo



Forward Biasing Voltage
PN-junction



Reverse Biasing Voltage

Quando o diodo é polarizado diretamente, com ddp maior que a barreira, a barreira de potencial através da junção cai e a corrente se estabelece.

Quando o diodo é polarizado inversamente cria-se uma barreira de potencial que impede a passagem da corrente.

Corrente no Diodo

- **Corrente majoritária, I** , na polarização direta é a corrente devida aos portadores majoritários do tipo **P** e do tipo **N**.
- **Corrente de saturação, I_0** , é a corrente que aparece quando se aplica polarização reversa: quando predomina a corrente de portadores minoritários que é função só da temperatura.

Curva Característica

- A equação do diodo, ou a lei do diodo, é:

$$i_D(V_D) = i_{D0} \left(\exp \left[\frac{eV_D}{kT} \right] - 1 \right)$$

Onde:

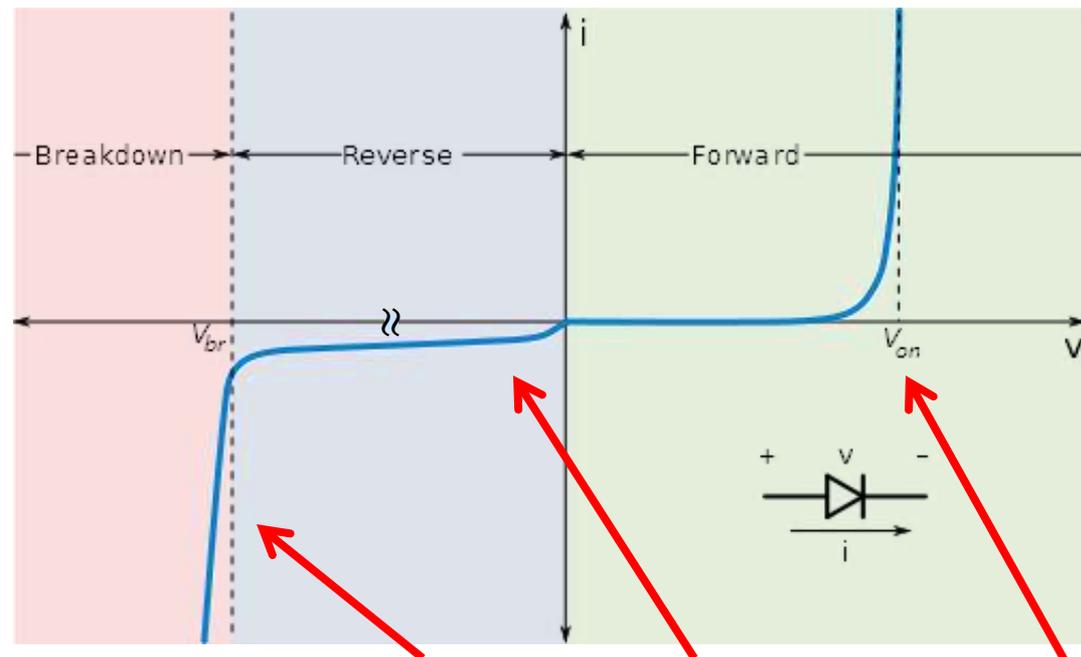
i_D e V_D são a corrente e a
vontagem do diodo

e é a carga do elétron

i_{D0} é a corrente de saturação

$k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K é a
constante de Boltzman

T é a temperatura em Kelvin



Não existem diodos ideais.

Curva Característica

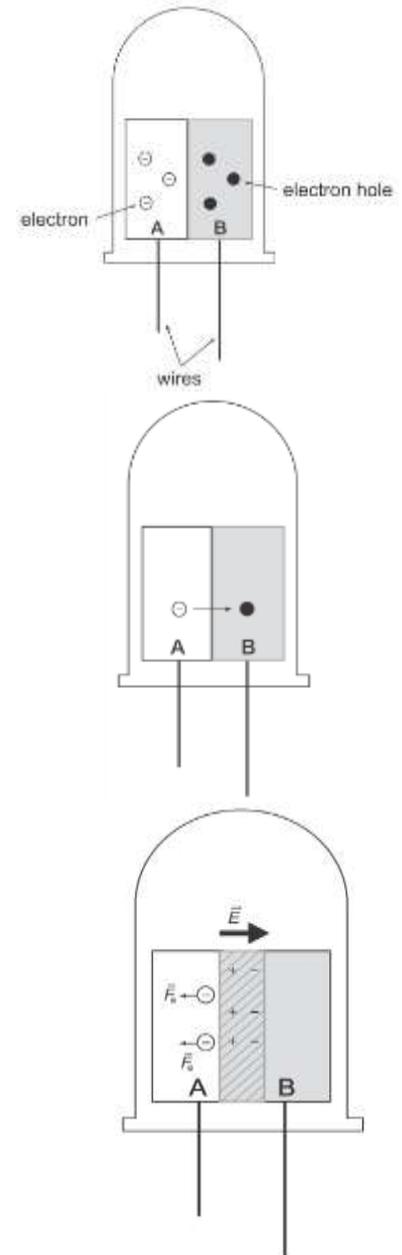
- Essa curva característica nos mostra que um diodo real apresenta várias limitações, por exemplo:
 - tensão direta não nula
 - o que significa que a resistência direta não é nula
 - resistência reversa finita
 - significando que existe uma pequena corrente reversa
 - existência de um valor máximo para a tensão reversa
 - além do qual o diodo conduz significativamente.



Parte 2 – Diodo Emissor de Luz LED (Light Emitting Diode)

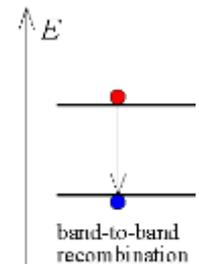
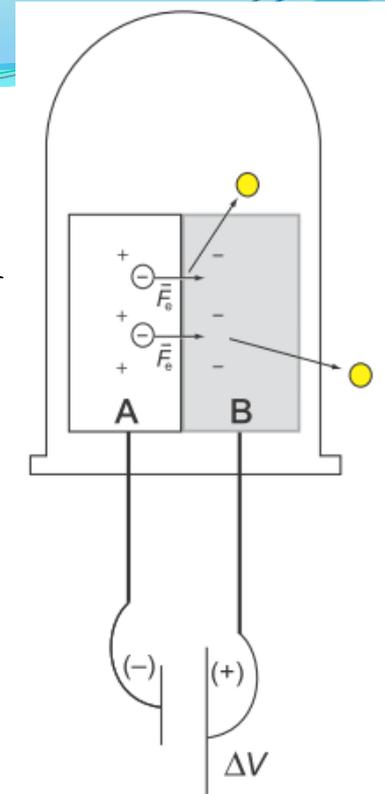
Como o LED funciona?

- O LED é um diodo:
 - são 2 camadas de materiais semicondutores, uma do tipo **N** (que tem elétrons fracamente ligados) e outra do tipo **P** (que tem lacunas)
 - juntando as 2 camadas se obtém uma junção **P-N** e acontece a difusão de elétrons e lacunas através da junção, formando a camada de depleção, que fica carregada:
 - Negativa do **P** (que tinha lacunas e pode receber elétrons)
 - Positiva do lado **N** (que poderia doar os elétrons fracamente ligados)



Como o LED funciona?

- Conectando o LED a uma fonte de tensão em polarização direta:
 - Lado negativo da junção no positivo da fonte
 - Lado positivo da junção no negativo da fonte
 - Vai haver passagem de corrente desde que a fonte forneça uma ddp maior que a da barreira, elétrons de um lado vão cair nas lacunas do outro: passa corrente
- Ao fazer isso os elétrons passam de estados de energia maior para estados de energia menor:
 - A energia que sobra é emitida sob forma de luz: fótons



Um pouco de quântica

- Sempre que um elétron livre “cai em” uma lacuna (estado ligado) a diferença de energia é transformada em uma partícula, um fóton.
- Isso acontece em todos os diodos, mas só conseguimos ver a luz quando o diodo é composto de materiais específicos!

Diferença de potencial
em um diodo comum:

$$\Delta V = 0.7 \text{ V}$$



De um LED visível:

$$\Delta V = 3.6 \text{ V}$$



Energia para atravessar
a barreira de potencial:

$$\Delta E = 0.7 \text{ V} * q = 0.7 \text{ eV}$$

$$\Delta E = 3.6 \text{ V} * q = 3.6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} * 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$$

Um pouco de quântica

- Então, qual será a cor do fóton emitido?

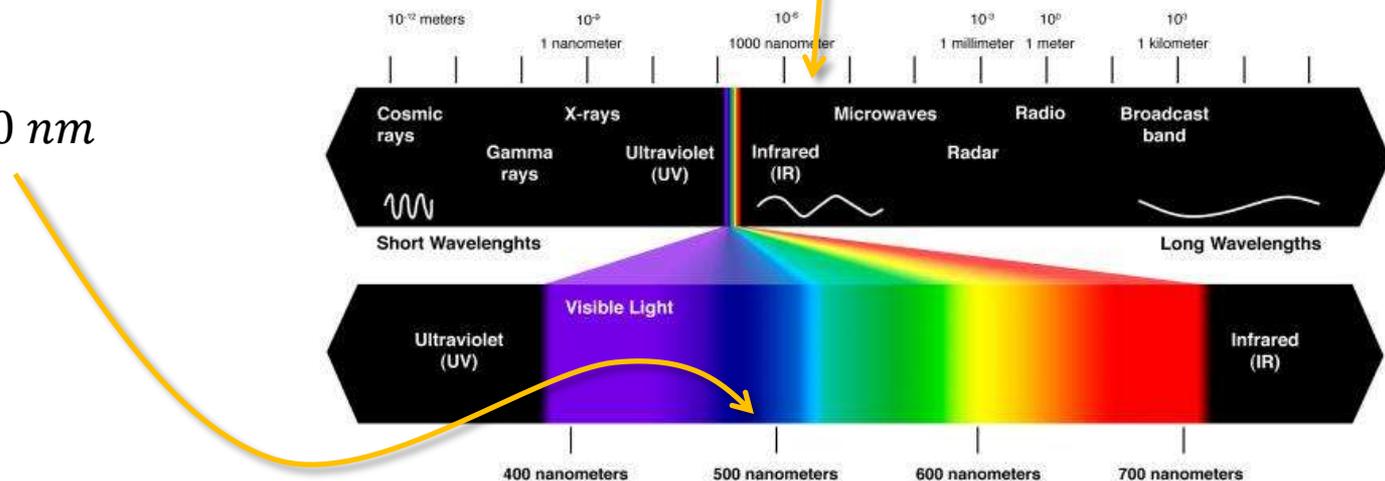
- Usamos a relação de Planck $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

Diodo comum:

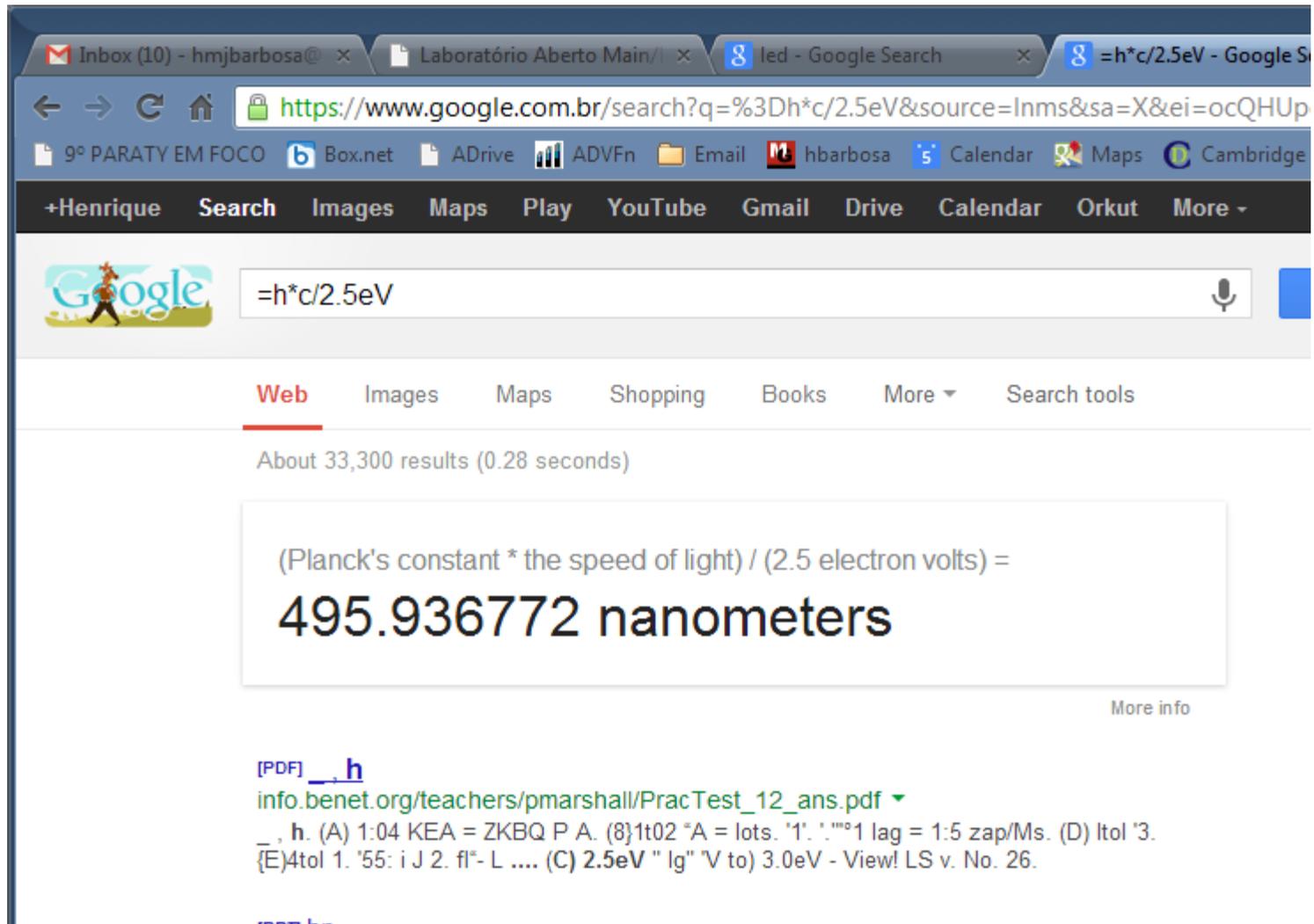
$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6.34 \times 10^{-34} \text{ J s} * 3 \times 10^8 \text{ m/s}}{0.7 \text{ eV}} = 1.7 \mu\text{m}$$

LED visível:

$$\lambda = \frac{hc}{2.5 \text{ eV}} = 500 \text{ nm}$$



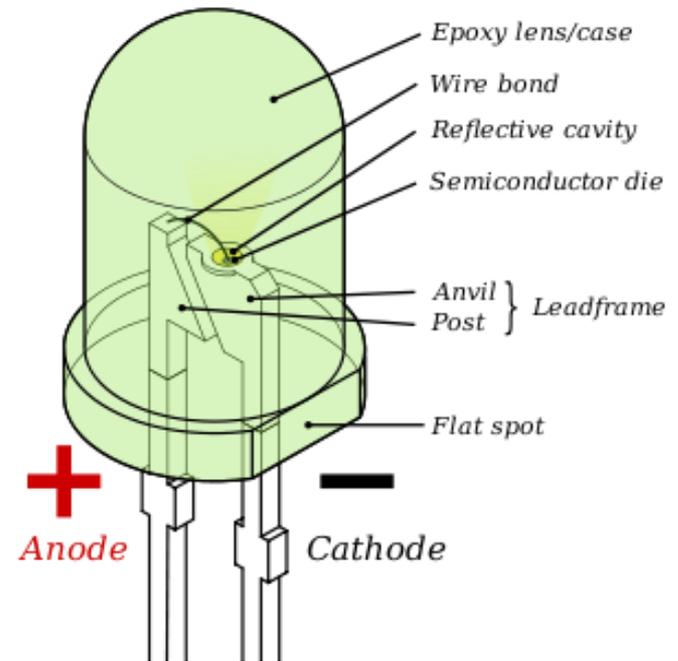
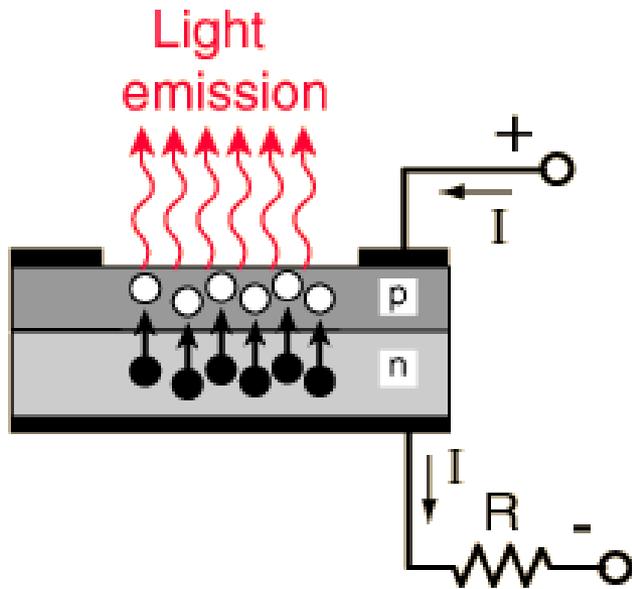
Calculadora do Google



The screenshot shows a Google search interface. The search bar contains the equation $=h*c/2.5eV$. Below the search bar, the results are displayed under the 'Web' tab. The main result is a calculation: (Planck's constant * the speed of light) / (2.5 electron volts) = **495.936772 nanometers**. Below this result, there is a link to a PDF document: info.benet.org/teachers/pmarshall/PracTest_12_ans.pdf. The PDF content includes a list of questions and answers, with the relevant part being: (C) 2.5eV "lg" "V to) 3.0eV - View! LS v. No. 26.

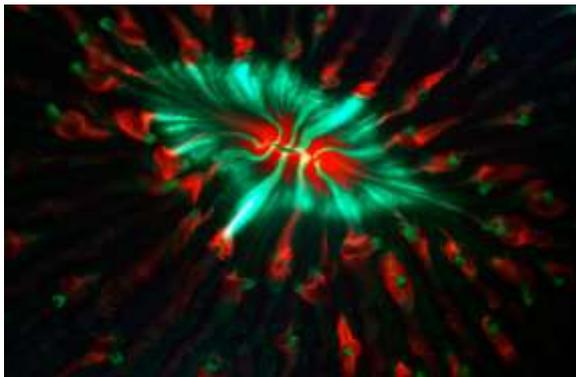
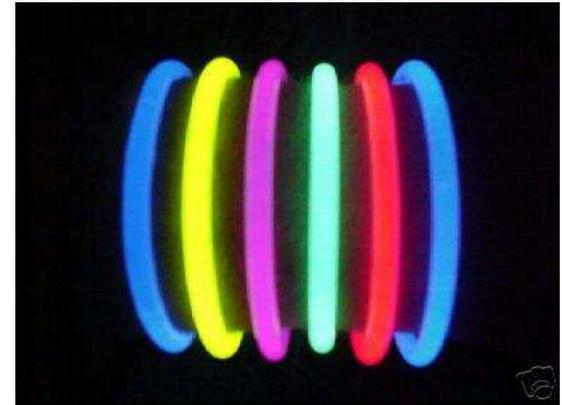
LED: outras diferenças

- Um LED e um diodo também são diferentes na geometria! Precisa-se construir o LED de tal maneira que a luz possa escapar...



Outros exemplos de luminescência

- Ou da emissão de luz por reação química
 - Quimioluminescência
- Ou emissão de luz por seres vivos:
 - bioluminescência

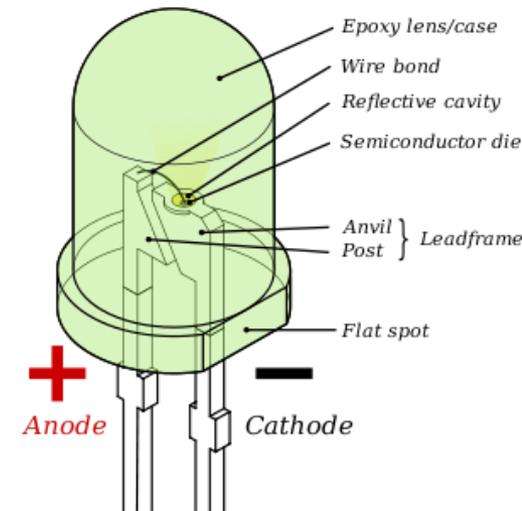
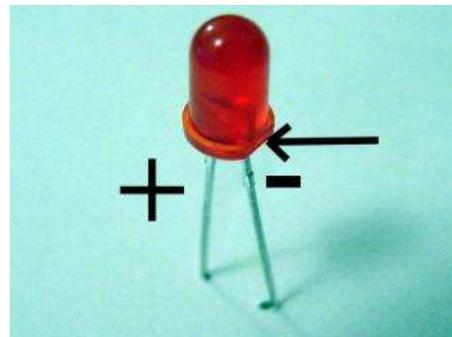


Bioluminescência em
coral cogumelo aumento
6X

Atividades da semana

- Vamos medir a curva característica (tensão x corrente) de um LED
 - Com várias medidas de tensão em polarização direta
 - Tentaremos também medir em polarização inversa (corrente de saturação)

Para saber qual é a polarização direta de um led: olhe na base dele e deve ver uma parte achatada que tem um sinal de flecha: o arame que sai do lado dessa parte achatada deve ser conectado ao negativo da fonte e o que sai do outro lado, conectar ao positivo da fonte.



Para a folha de dados – Parte 1

- Faça o gráfico, com barras de erro, da tensão x corrente no LED.
 - Meça desde $-4V$ (reverso)
 - até $+3.6V$ (não passe disso para não queimar o LED)
- Lembre-se, é uma folha de dados, não precisa de: introdução, objetivos, discussão, etc, etc...

Dica:

1. Use um resistor de proteção para medir a corrente
2. Primeiro ligue a fonte, verifique a tensão de saída, e só depois conecte-a no circuito! Isso evitará queimar os componentes.

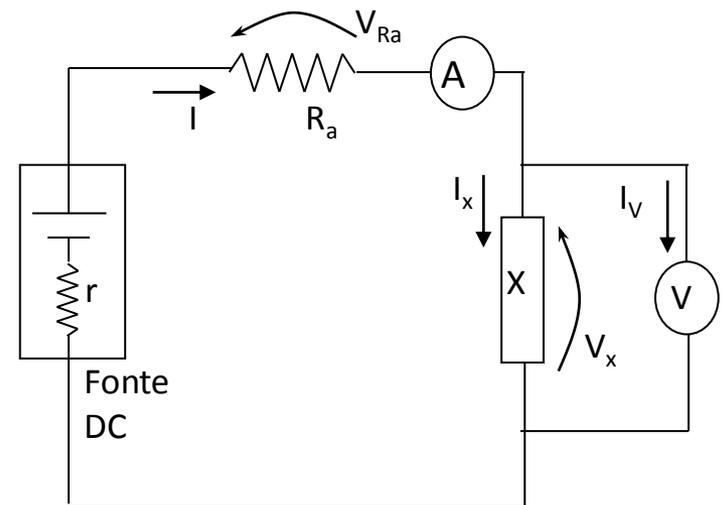
Para o relatório – Parte 1

- Descreva as medidas que você fez
- Discuta os resultados e compare com os de seus colegas
- Você consegue encontrar uma função analítica para descrever a curva característica do LED?
 - Faça o ajuste e discuta os resultados

Dicas 1: o circuito

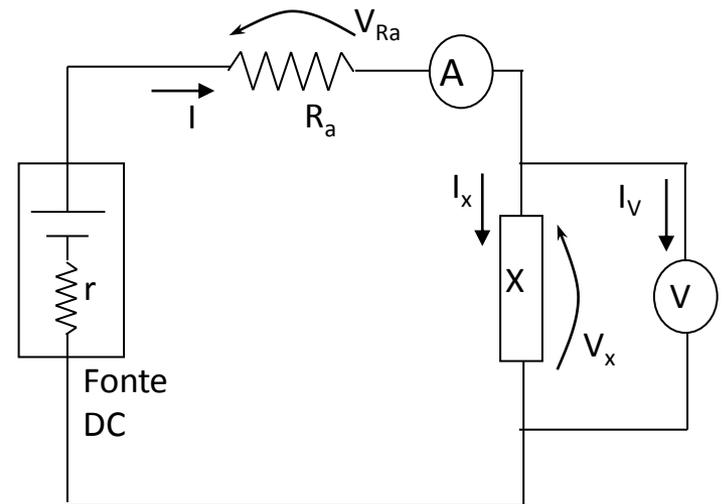
- Monte um circuito de 1 malha como o da a figura:
 - O elemento X é o LED
 - R_a é uma resistência de proteção usada para limitar a corrente máxima no circuito, mas também pode ser usada para medir a corrente no circuito ($V=R*i$)
 - A fonte é de corrente contínua (DC)

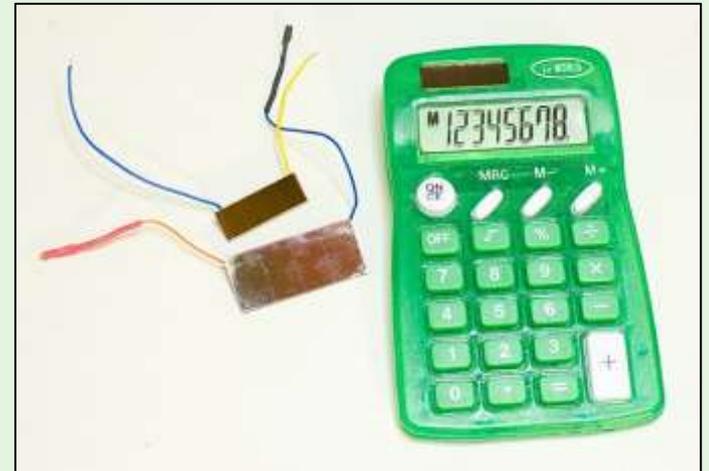
• CUIDADO: você não deve ultrapassar 3,6 volts no LED!



Dicas 2: Calcular R_a

- Vamos supor o pior cenário:
 - a menor resistência possível no circuito : $R_x = 0$
 - significa a maior potência possível em R_a
 - dada a potência máxima do fabricante e o valor de R_a , calcule qual a tensão máxima que vai poder aplicar em R_a ...
- E não passe desse valor!!

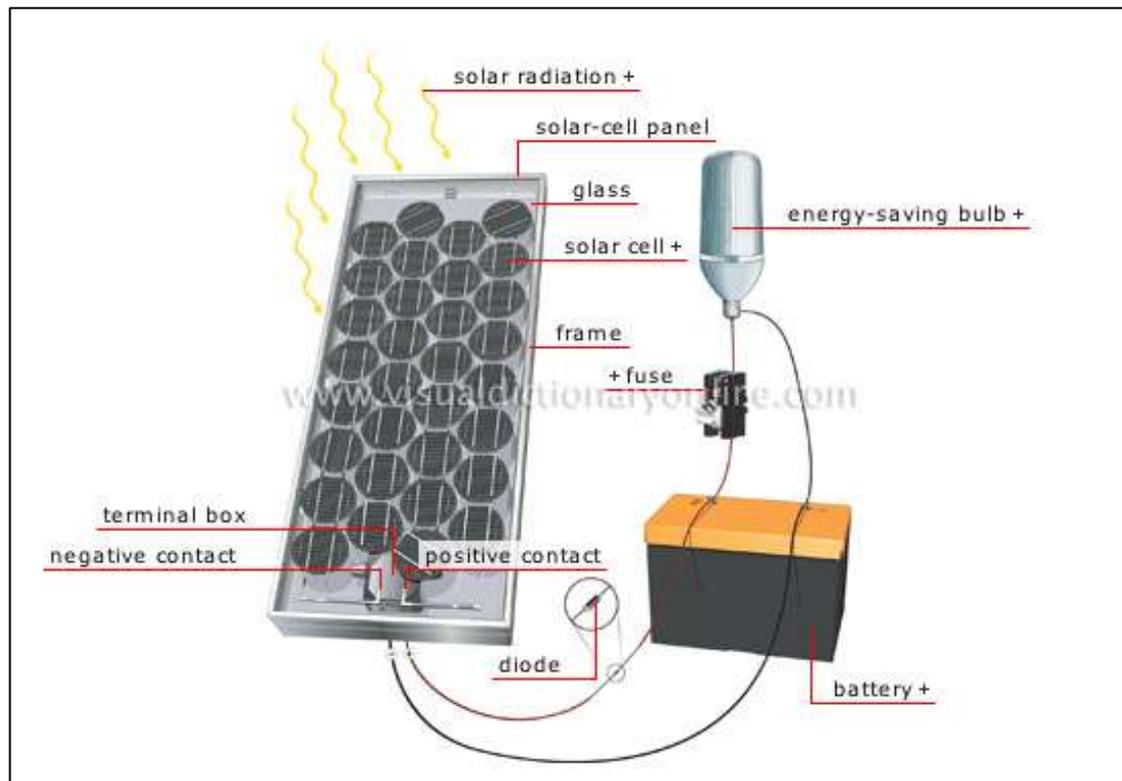




Parte 3 – Painel solar

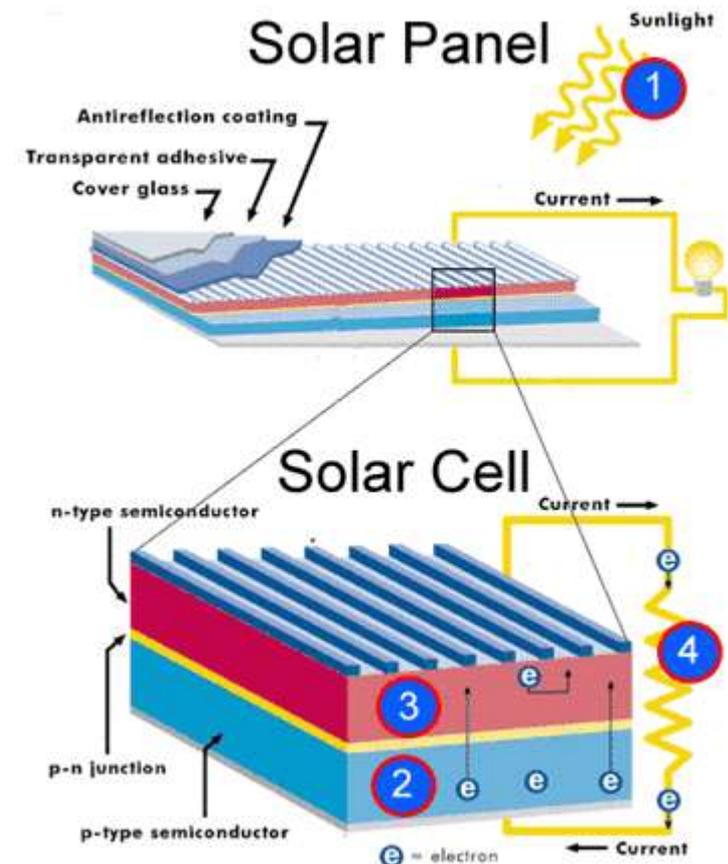
Como funciona um Painel Solar?

- Um painel solar é uma combinação de várias células fotovoltaicas, em série e em paralelo.



Como funciona um Painel Solar?

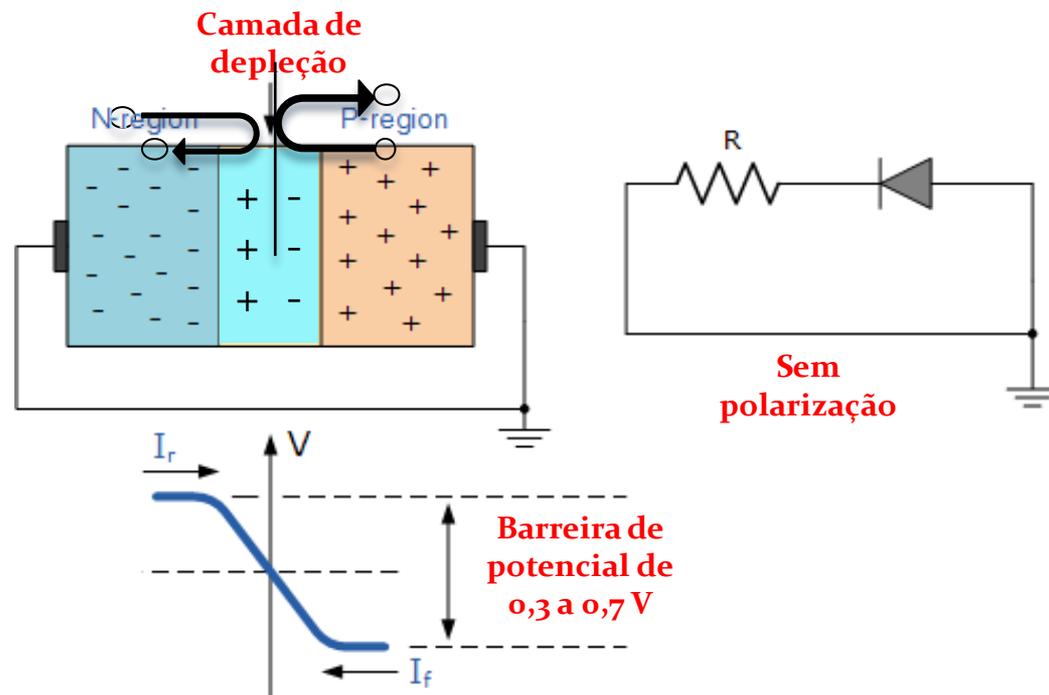
- A cada célula é formada por uma camada de material semicondutor do tipo **N** e outra do tipo **P**
 - O lado **P** fica embaixo, em contato com uma placa de metal
 - O lado **N** fica em cima, em baixo de um série de filamentos metálicos
- Quando um fóton atinge o material, ele arranca um elétron e forma uma lacuna



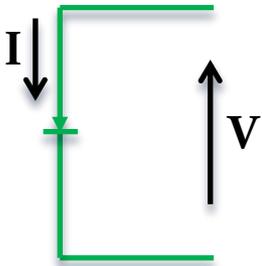
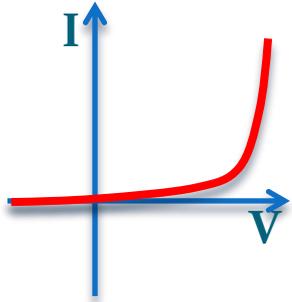
Como funciona um Painel Solar?

- Existe um campo elétrico na junção P-N que mantém os elétrons do lado N, e as lacunas do lado P
 - Se o par elétron-lacuna foi formado próximo ou dentro da camada de depleção, o campo elétrico vai forçar uma separação das cargas, o que produz uma diferença de potencial.

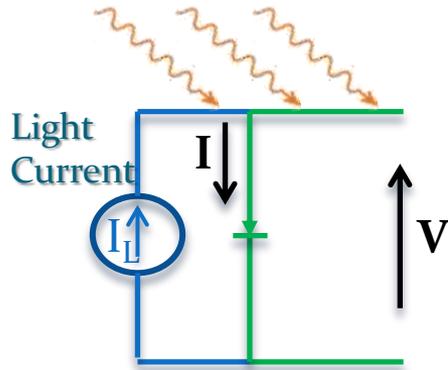
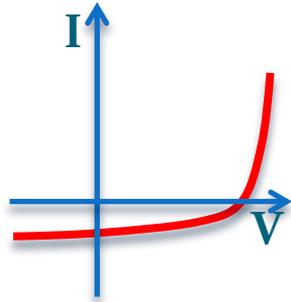
- É assim que se transforma a energia solar em energia elétrica.



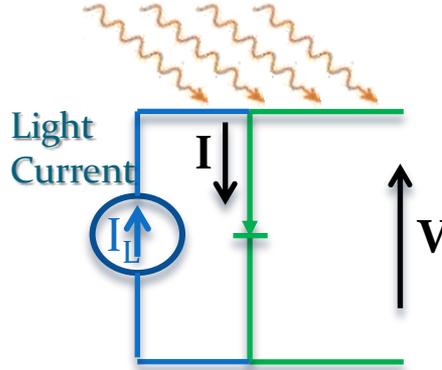
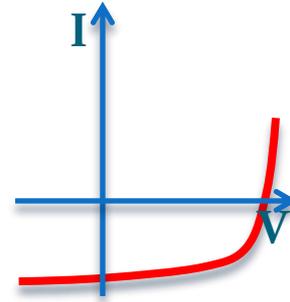
Curva Característica



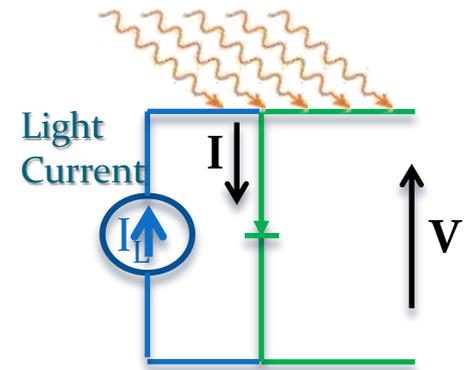
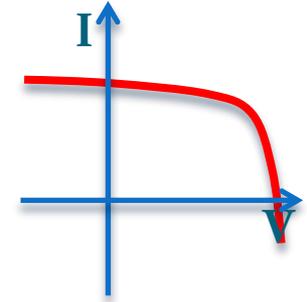
Sem luz, a célula solar funciona como um diodo grande



A medida que iluminamos a célula, a curva $i \times V$ se desloca pela produção de corrente



Quanto mais luz, maior o deslocamento



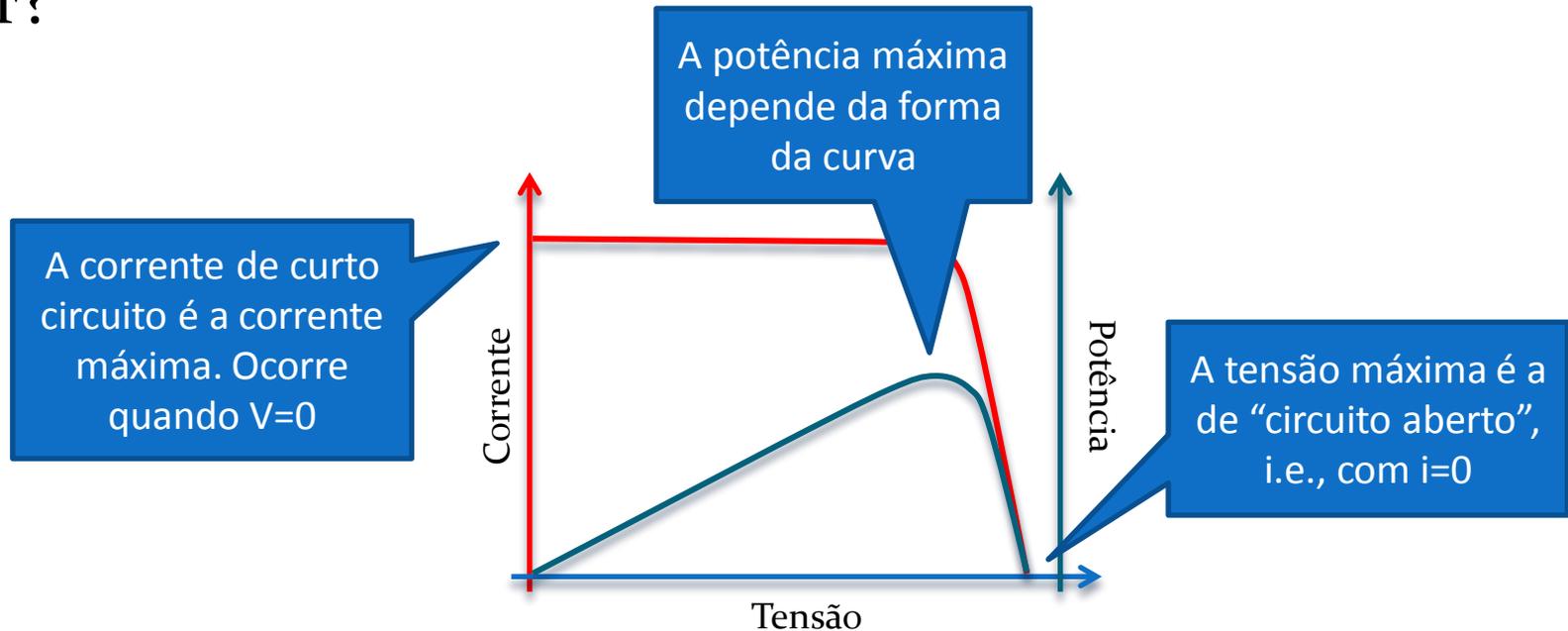
Como a célula produz eletricidade, a convecção é inverter o eixo da corrente

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

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

Potência

- Como é então a potência fornecida por um painel solar?

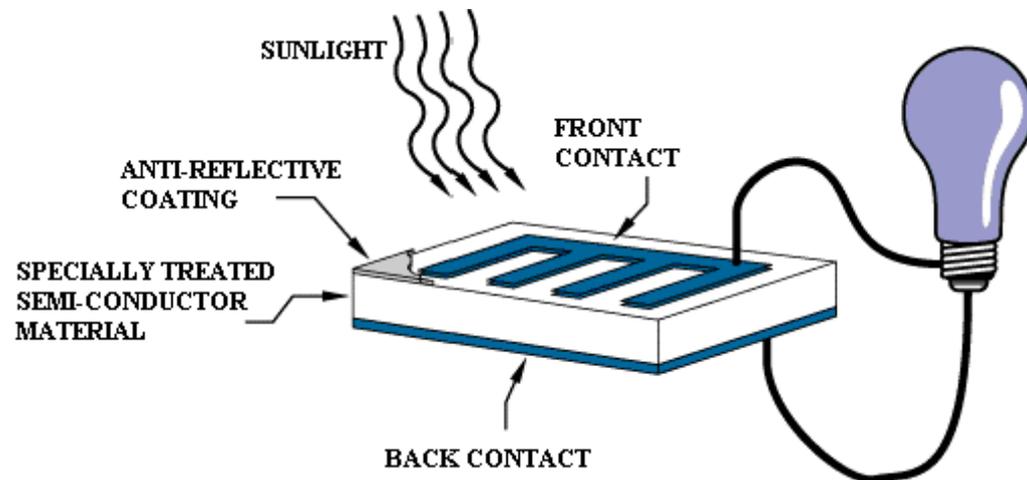


A corrente de curto circuito depende:

- da área da célula
- do número de fótons (potência incidente)
- do espectro da luz incidente
- das propriedades ópticas (abs e reflex)
- Probabilidade de coleção

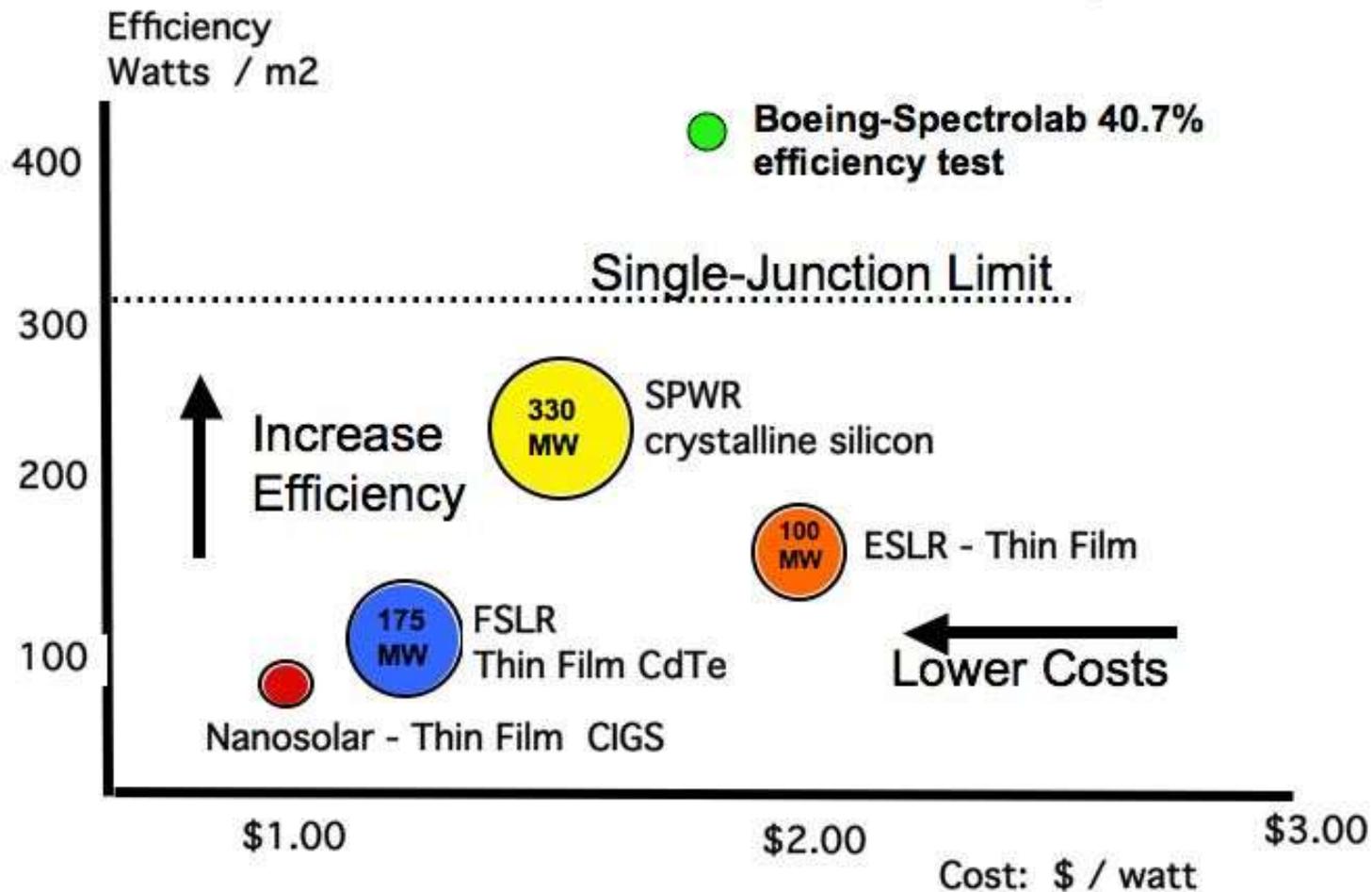
Construção do Painel Solar

- Neste caso, a construção também precisa ser adequada.
 - Por exemplo, usa-se uma camada antirreflexo para que toda a luz do sol entre no material
 - Os materiais das regiões **P** e **N** são escolhidos para célula absorver os fótons de luz visível (lembram das cores dos LED?)



Eficiência

Photovoltaic Device: Efficiency/Cost



Source: The Lewis Group, Company reports, Green Econometrics research

Para a folha de dados – Parte 2

- Faça a curva característica, tensão x corrente, para o painel solar com as incertezas.
 - Meça um intervalo de corrente que permita caracterizar toda a curva característica
- Faça a curva da potência produzida pelo painel solar, incluindo as incertezas.
 - Estime a potência máxima e a corrente para qual se obtém esta potência máxima.

Dica:

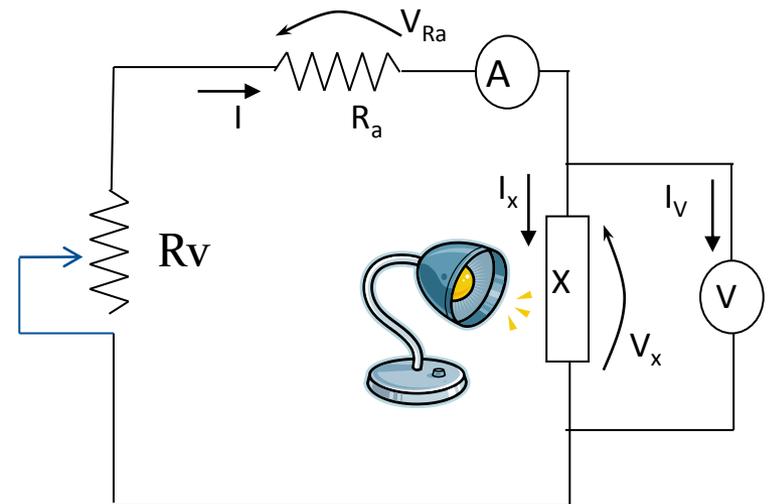
1. Você pode usar um resistor de 1Ω , medir a tensão nele, e assim calcular a corrente.
2. Você também pode usar um amperímetro, pois o painel solar não produz correntes altas e não há risco de queimar o instrumento.

Para o relatório – Parte 2

- Descreva as medidas que você fez
- Discuta os resultados e compare com de seus colegas
- Você consegue ajustar a função analítica que descreve a curva característica do painel solar?
 - Faço o ajuste e discuta os resultados

Dicas 3: circuito p/ painel solar

- Monte um circuito de 1 malha como o da a figura:
 - O elemento X é o painel solar
 - Ilumine-o com o abajur à uma distância de 15cm
 - R_a é uma resistência de proteção usada e também será usada para medir a corrente. Alternativamente, você pode usar diretamente um amperímetro
 - R_v é uma resistência variável que servirá para regular a corrente no circuito



Pergunta da semana:

- Leitura:
 - Apostila de leis de Kirchhoff, pág. 1-7
 - Apostila de MMQ:
<http://lababerto.if.usp.br/index.php/Main/Estatistica>
- No começo da próxima aula, entregue em papel a resposta para:
 - O que é o terra, o neutro e a fase em um circuito elétrico como o que você tem na sua casa?