

**Relatório Final F609**



**Comparando diferentes estruturas que convertem a luz solar  
em energia elétrica**



**Aluno:** Willian Vieira dos Santos    **RA:** 086202

**e-mail:** wvsolon x gmail.com

**Orientador:** Profa. Dra. Maria José S. Pompeu Brasil

**e-mail:** brasil x ifi.unicamp.br

**Coordenador:** Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi

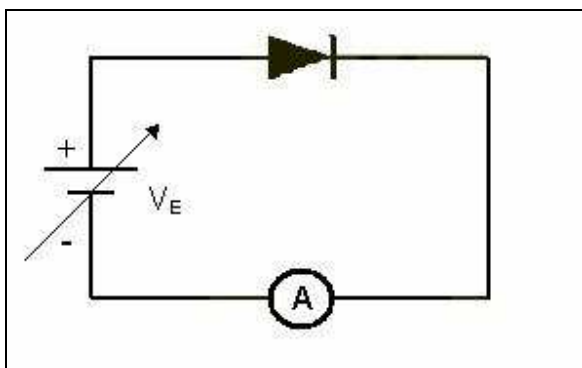
Campinas, 11 de junho de 2012.

## RESULTADOS ATINGIDOS

Para caracterizar os efeitos fotovoltaicos de uma célula de silício, do diodo semicondutor 2N3055 e da célula de Grätzel foram elaborados gráficos IV para analisar o comportamento destas estruturas com luz. Isto foi feito no laboratório GPO da Unicamp, montando um circuito com a célula, uma fonte variável de voltagem e medindo a corrente. O teste foi feito para as 3 estruturas em diferentes intensidades de luz e no escuro.

<b>Tabela 1: Equipamentos utilizados</b>
Fonte de luz HL 2250 (Homlux)
Multímetro Keithley 175 A
Fonte voltagem Keithley 230 programmable voltage source
Software de controle de medidas do laboratório

O circuito para o teste de cada célula segue o esquema:



**Figura 1: circuito para teste da célula**

Tomando-se dados obtidos pelo software do laboratório na leitura das células Silício, 2N3055 e Grätzel em 3 situações (escuro, luz fraca (ambiente), luz média (5.5 mW) e luz forte (13 mW)), obtivemos os seguintes gráficos:

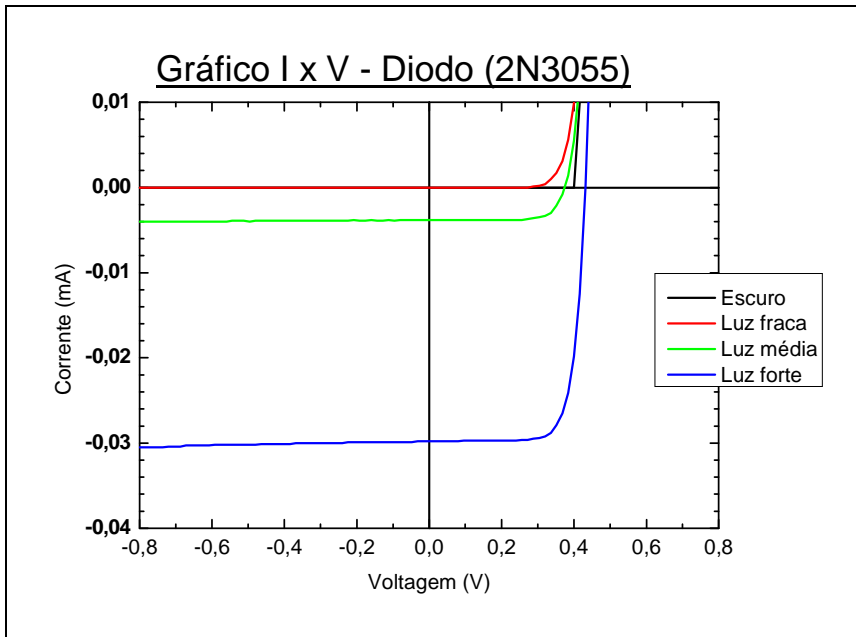


Gráfico 1: gráfico I x V da célula 2N3055

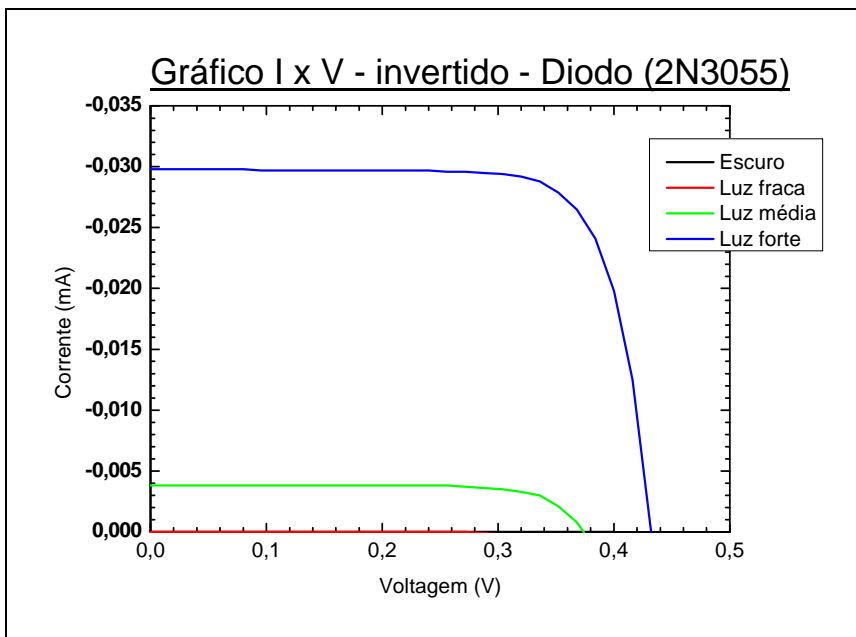
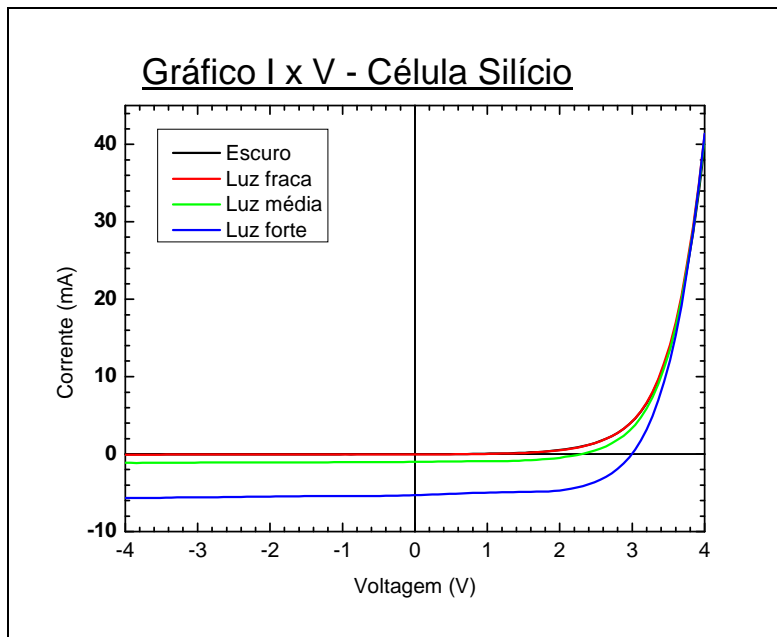
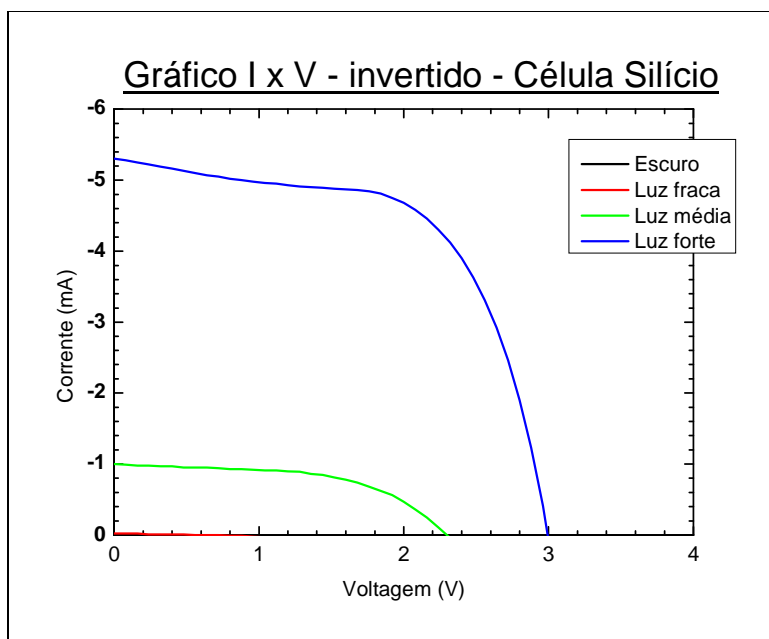


Gráfico 2: gráfico I x V da célula 2N3055 - invertido



**Gráfico 3: gráfico I x V da célula Silício**



**Gráfico 4: gráfico I x V da célula Silício - invertido**

O gráfico IV da célula de Silício (gráfico 3) demonstra uma sensibilidade muito grande à variação de luz. Comparando-se à célula do diodo (gráfico 1) observa-se que a célula de Silício varia na ordem de miliampere enquanto o diodo na ordem de microampere. Isto é esperado, pois a célula de silício foi desenvolvida para este fim.

Da mesma maneira, que os gráficos IV da célula do diodo semiconductor 2N3055 demonstram uma pequena sensibilidade à variação de luz da estrutura é típica, pois o componente

não foi desenvolvido com esta função e sim para ser encapsulado em um transistor e ser utilizado em aparelhos eletrônicos.

Já na célula de Grätzel, com montagem em display de calculadora (ver mais adiante fotos), foi observado, em primeira verificação, que a tensão do circuito aumentava gradualmente com uma incidência constante de luz. Inicialmente, observa-se 3,3 mV. Após 2 minutos, a tensão era de 4,4 mV. Ao desligar a luz, após cerca de 4 minutos, temos uma tensão de 1,6 mV. Observa-se uma variação de tensão ao longo do tempo.

Este circuito não foi conclusivo, pois neste teste o circuito não estava montado na configuração acima, apenas um circuito com resistor. A ideia é observar se a célula de Grätzel se comporta como um semiconductor igual à célula de Silício e transistor 2N3055.

O teste teve que ser refeito contendo uma fonte variável de tensão no circuito para medir os pontos de corrente em função da tensão.

Um segundo projeto da célula de Grätzel, agora com vidro ITO, foi preparado para compor o projeto e observar a eficiência em relação à primeira de menor qualidade. Foi lida uma tensão, inicialmente, em circuito aberto ( $V_{ac}$ ) de 0,5 V.

O gráfico IV da célula de Grätzel obtido pode ser visualizado nos gráficos:

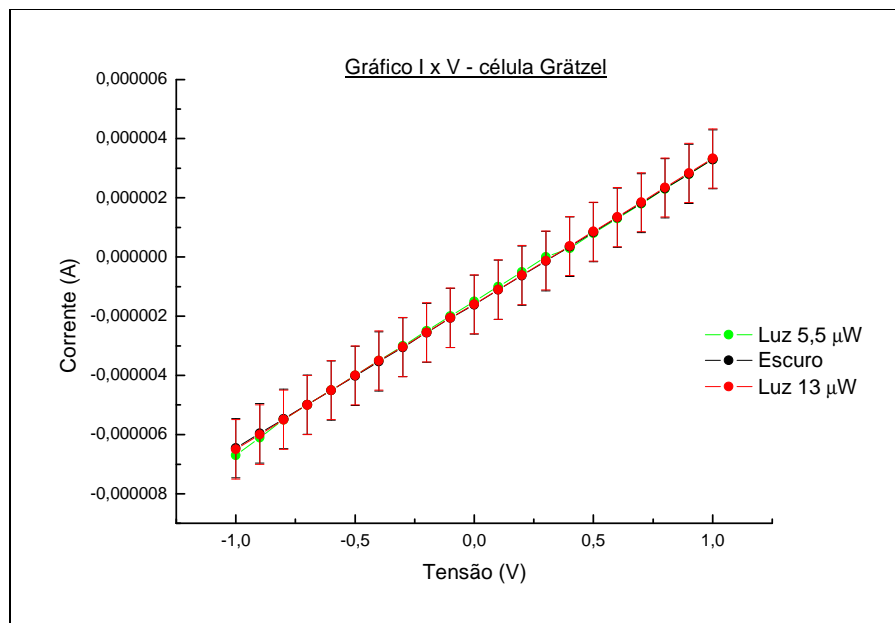
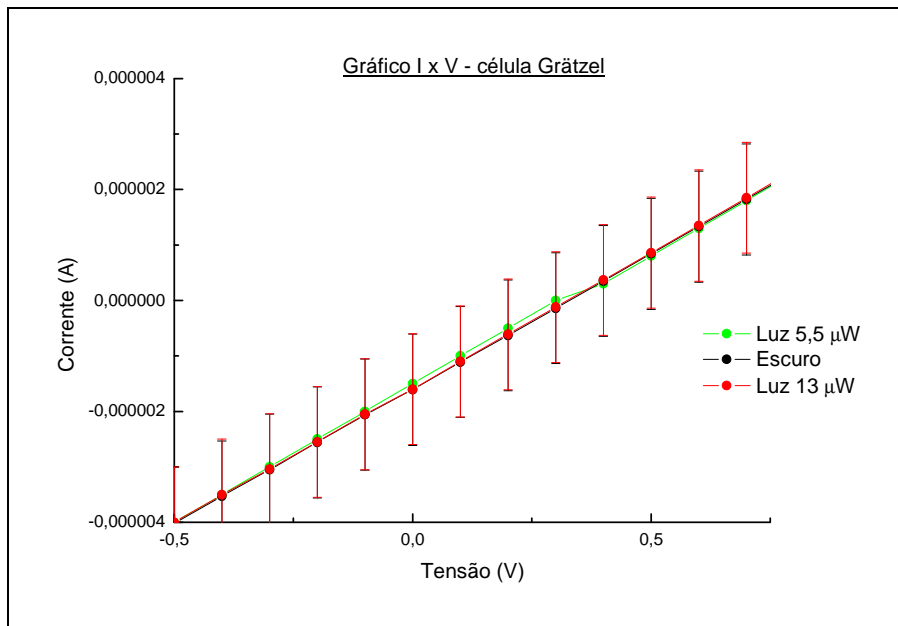


Gráfico 5: gráfico I x V da célula Grätzel comparativo

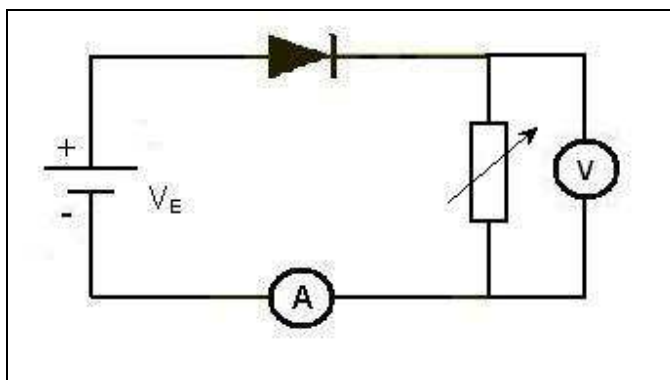


**Gráfico 6: gráfico I x V da célula Grätzel comparativo (zoom)**

Analisando o crescimento linear dos dados, verificamos que a impedância no circuito de forma ôhmica e de alta resistência (cerca de 200 kΩ), ou seja, a célula não está se comportando como um diodo semiconductor, mas como um resistor de alto valor.

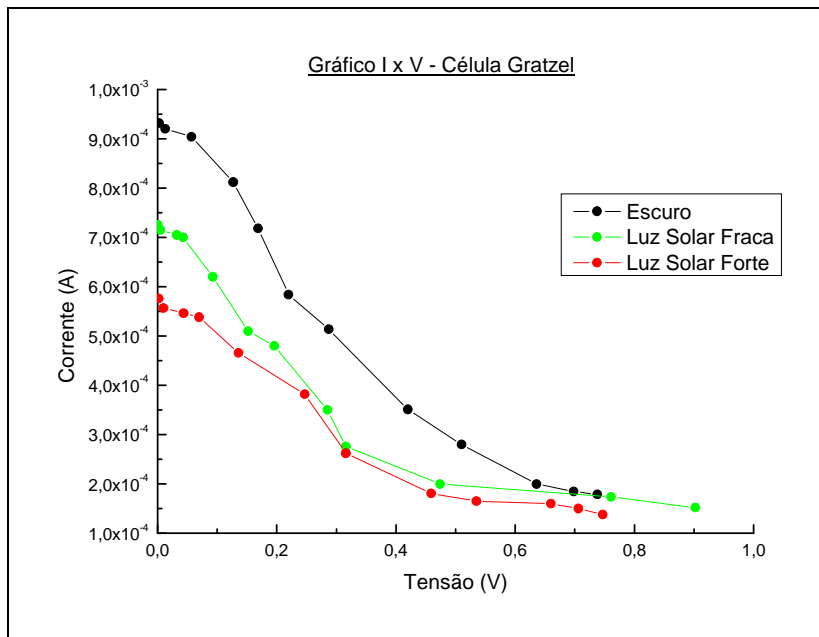
A aplicação de voltagem variável na célula pode ter danificado as moléculas reativas da estrutura, fazendo-a se comportar como um resistor somente.

Assim, foi elaborado e montado um terceiro esquema de leitura seguindo um circuito de resistência variável, conforme a própria literatura propunha:



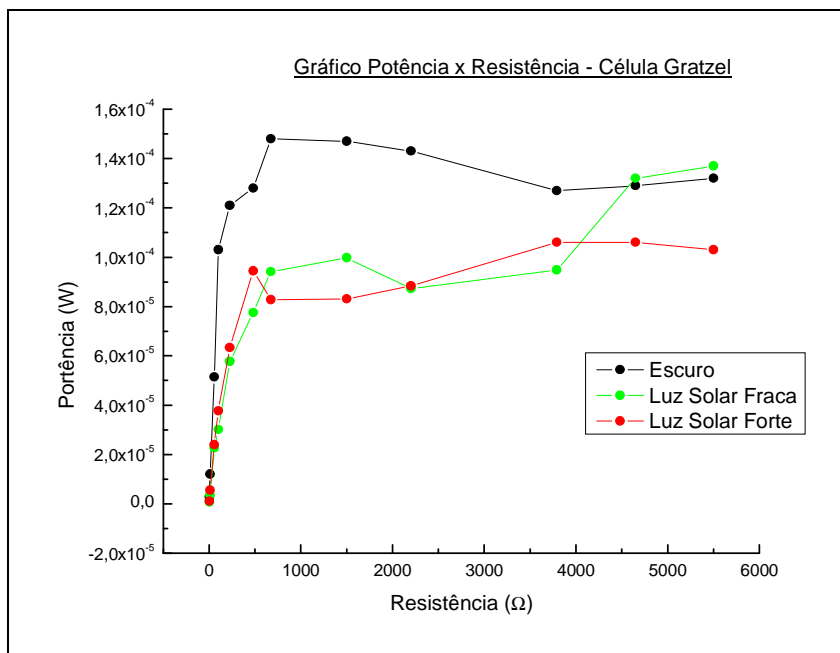
**Figura 2: Esquema utilizado para medir a célula Grätzel**

Após coletar dados, através de circuito com uma fonte de 1,5 V e com resistência variável, foi possível obter o seguinte gráfico:



**Gráfico 7: gráfico I x V da célula Grätzel**

O gráfico de eficiência pode ser determinado pela potência (corrente x tensão) pela resistência utilizada no circuito:



**Gráfico 8: gráfico potência x resistência da célula Grätzel**

Estes gráficos demonstram que a célula está se comportando como um diodo semiconductor. Comparamos com os testes anteriores e vemos que não plotamos um gráfico contínuo. Isto se deve às trocas discretas da resistência, aguardando um tempo de reação da célula.

Segundo referência [6], há um tempo aleatório para célula se adequar ao circuito, e o teste com tensão variável não proporcionava esse tempo.

## FOTOS DA EXPERIÊNCIA

### Construindo uma fotocélula de Grätzel

- **Materiais**
  - Vidro ITO (Índio Tin Oxide)
  - Dióxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ )
  - Corante (dye)
  - Grafite
  - Iodo
  - Clips

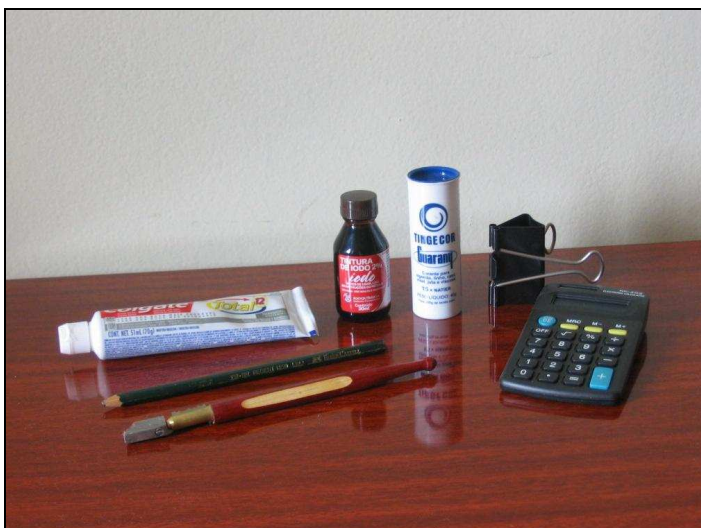


Figura 3: Materiais para construir a célula Grätzel

- **Procedimentos**

Para obter os materiais correspondentes caseiros utiliza-se um lápis para o grafite, tinturaria de iodo é encontrado facilmente em farmácia, corante para tecido encontrado em supermercado é o correspondente do dye e o dióxido de titânio é um ingrediente típico de creme dental com branqueador óptico (eu utilizei Colgate Total 12 Whitening).

Nas especificações de materiais comentadas por aqueles que fizeram o experimento, dizia-se que o mais complicado de encontrar era o vidro ITO. Este vidro possui um tratamento especial em uma das faces com uma camada condutora de  $\text{SnO}_2$  (Dióxido de Estanho). Realmente, este vidro somente encontra-se para importação.



Contudo, a condução pode ser observada em um display de calculadora. Pesquisando sobre os displays, encontrei que os monitores de LCD possuem uma camada de vidro ITO e, supostamente, os displays de calculadoras. Desmontando uma calculadora retira-se o display e deste as películas externas. Verifica-se que há duas lamelas de vidro agrupadas. Separando-as, podem ser utilizadas para o experimento.



**Figura 4: Retirando display da calculadora**

Os procedimentos a seguir, leva-se em conta aplicações no lado condutor da lamela de vidro, ou seja, procurar observar o lado do vidro onde o canais de ligação

Lavar bem as lamelas de vidro do display da calculadora com água e sabão. Depois de secar bem, fixa-se uma das lamelas sobre a mesa com fita crepe e aplica-se o creme dental procurando deixar uma superfície regular. Deixar secar da noite para o dia. Colocar no forno a 280°C por 15 minutos (na especificação original, pede-se 450°C por 10 minutos).



**Figura 5: Pasta de dente com dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>)**

Na outra lamela de vidro, aplicar o grafite, pintando toda a face condutora de modo que fique escurecido.



**Figura 6: grafite (lápiz) em uma das lamelas**

Preparar solução de água e corante de tecido (dye). Após ter esfriada a lamela com a pasta, mergulhar na solução dye e deixar por 5 minutos. Retirar e secar com um secador.



**Figura 7: Aplicando o corante (dye)**

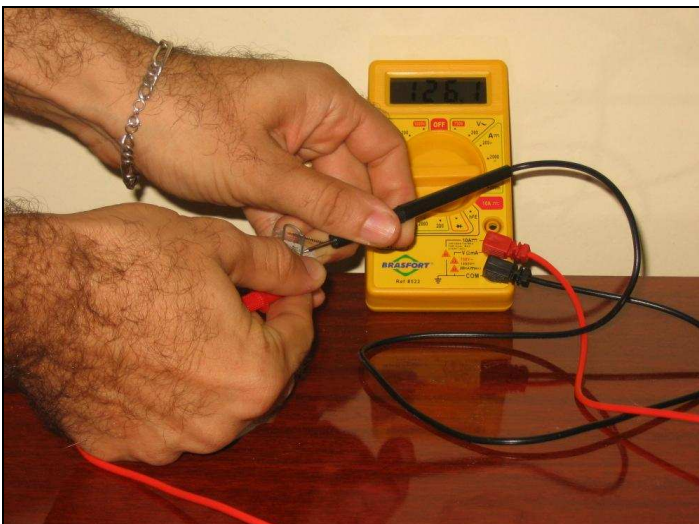
Juntar as duas lamelas defasadas face a face trabalhadas e prender com um clipe. Aplicar o iodo nas junções.



**Figura 8: célula Gratzel finalizada**

- **Testando os dispositivos**

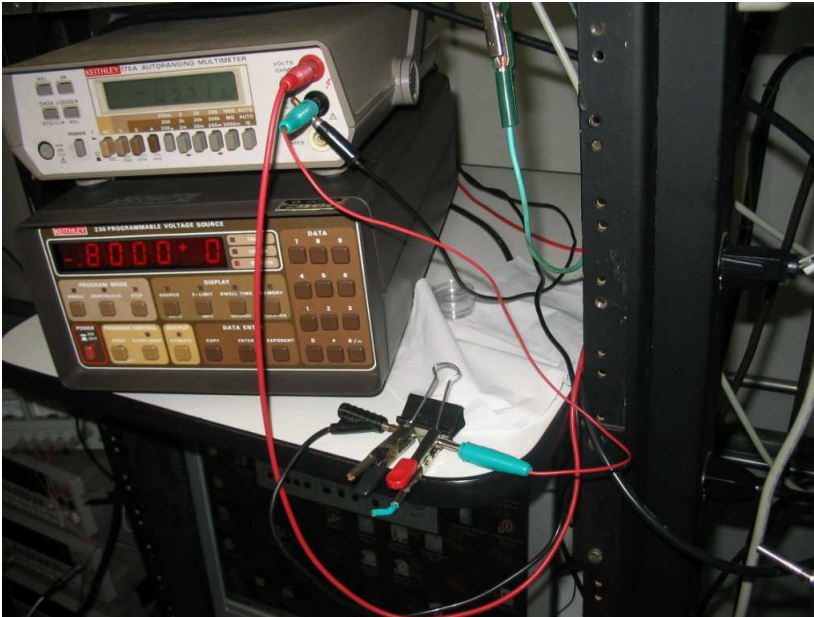
Com um multímetro, aplicar a ponta de prova positiva (vermelha) no lado da lamela com grafite e a ponta de prova negativa (preta) no lado da lamela com o dióxido de titânio. Antes do teste, o multímetro foi ajustado para medir tensão e selecionada uma escala alta (20 V). Como o resultado não foi bom, diminuí para 2000 mV e depois para 200 mV, quando pude observar a tensão aproximada a 200 mV.



**Figura 9: Medindo tensão em circuito aberto**

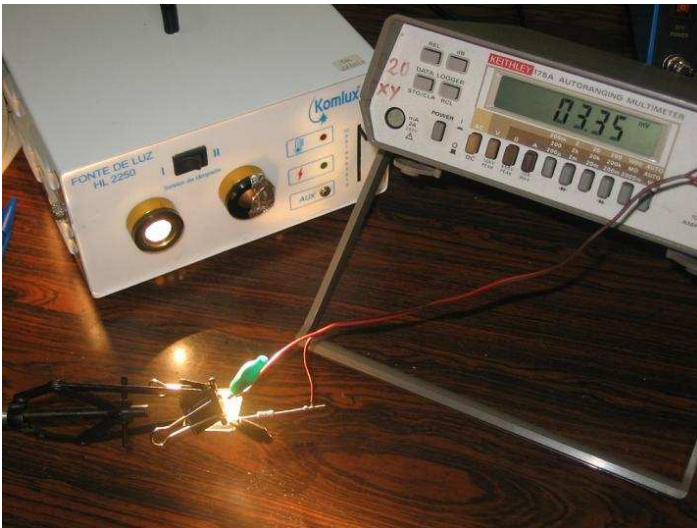


No laboratório do GPO / Unicamp, submetemos a célula Grätzel à tensão variável:



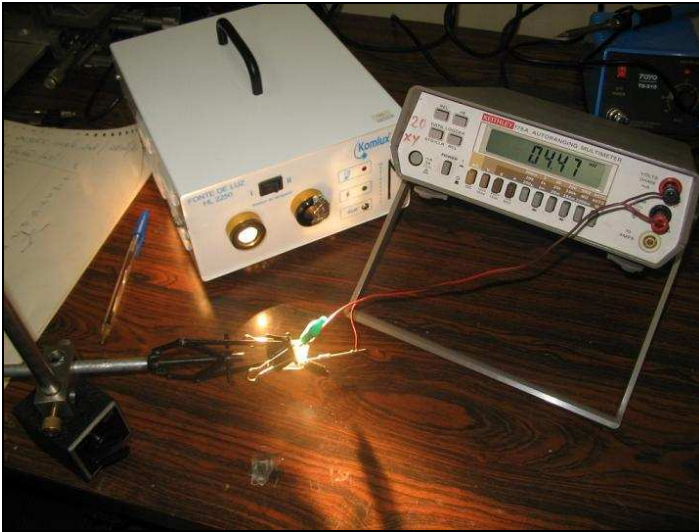
**Figura 10: Medindo tensão variável na célula Grätzel**

Em circuito resistivo, podemos observar a tensão da célula submetendo à luz forte:



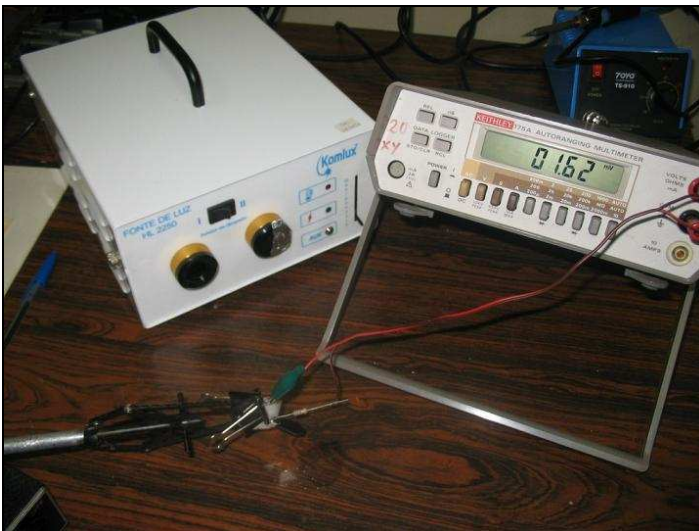
**Figura 11: Leitura resistência variável na célula Grätzel**

Após 2 minutos, a tensão subiu, conforme figura a seguir:



**Figura 12: Tempo de leitura da célula Grätzel**

Novamente, após 2 minutos, mas agora sem luz, a tensão desceu, conforme figura a seguir:



**Figura 13: Leitura sem luz na célula Grätzel**

- **Célula de silício**

O teste de tensão variável com a célula de silício:



**Figura 14: Medindo tensão variável na célula silício**

e no circuito resistivo:

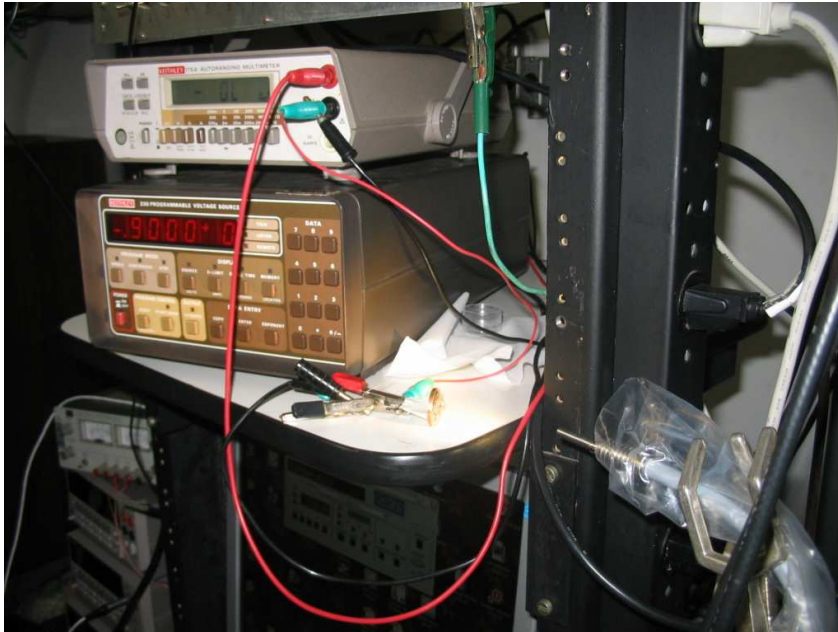


**Figura 15: Leitura em circuito resistivo na célula silício**



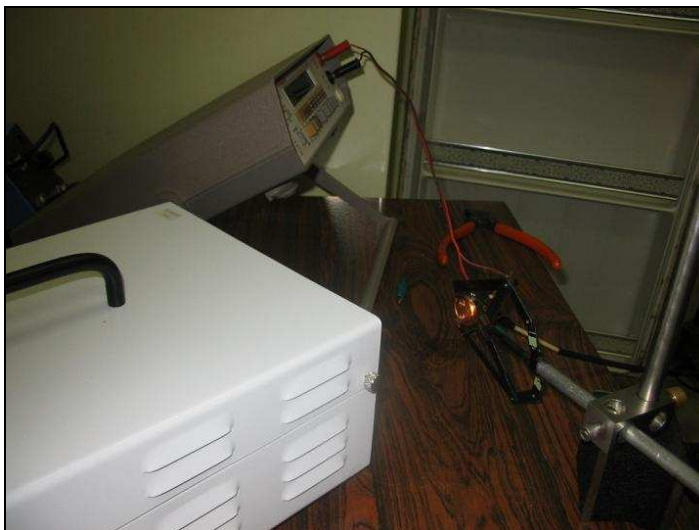
- **Transistor 2N3055**

O teste de tensão variável com o diodo do transistor 2N3055 :



**Figura 16: Medindo tensão variável no diodo 2N3055**

e no circuito resistivo:



**Figura 17: Leitura em circuito resistivo no diodo 2N3055**

## **DIFICULDADES ENCONTRADAS E AGRADECIMENTOS**

A principal dificuldade encontrada foi conciliar os horários para trabalhar no laboratório da Unicamp e apurar os resultados visto que não conseguia me ausentar do meu trabalho profissional a todo o momento. Para resolver isto, utilizei muito o contato via e-mail com a minha orientadora e procurei utilizar minha casa para trabalhar no projeto.

Outra dificuldade foi encontrar o vidro com ITO, de venda restrita no mercado, para construir a fotocélula de Gratzel. Minha orientadora conseguiu um contato que possuía acesso a uma amostra e foi possível aumentar a eficiência do projeto.

A orientação da professora Maria foi essencial para todo o projeto. Ela me corrigiu e orientou em todos os pontos que tive dificuldades, tanto na teoria como no experimental. Outro profissional, Milton do GPO, teve grande colaboração no projeto aceitando me acompanhar e me auxiliar nos detalhes técnicos, mesmo nos horários que não satisfaziam o seu expediente. Segue uma nota de agradecimento muito especial ao profissionalismo que observei.



## PESQUISA REALIZADA

**Palavras-chaves:** células fotovoltaicas, células solares, fotocélula de silício, transistor 2N3055, célula fotovoltaica de Grätzel, diodo semiconductor

### Referências:

- 1- Fundamentos de Física – volume 4 – 8ª. edição – Haliday, Resnick, Walker
  - Teoria básica relacionada à estrutura e funcionamento dos semicondutores com ênfase nas propriedades elétricas dos sólidos
- 2- Physics of Semiconductor Devices – S. M. Sze
  - Estudo mais elaborado e avançado da teoria dos semicondutores
- 3- <http://www.cienciaviva.pt/docs/celulafotovoltaica.pdf>
  - Paper com procedimentos de como montar uma célula fotovoltaica de Grätzel. Demonstra os processos químicos envolvidos na transformação de energia
- 4- [http://algol.fis.uc.pt/forum/euso/task\\_2.pdf](http://algol.fis.uc.pt/forum/euso/task_2.pdf)
  - Informações adicionais sobre fotocélulas caseiras e figuras com os processos envolvidos na obtenção da energia elétrica pela luz solar
- 5- [http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/12\\_28.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala12/12_28.asp)
  - Montagem de um aparelho intitulado fotoscópio para ler impulsos de luz a partir do transistor 2N3055
- 6- [http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v28\\_77.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v28_77.pdf)
  - Paper com informações sobre as estruturas de células sensibilizadas por corantes, que inclui a célula de Grätzel
- 7- <http://www.aedie.org/9CHLIE-paper-send/281-MOTA.pdf>
  - Experiências com células de silício monocristalinas e diversas variações de testes, com temperaturas diferentes

## DESCRIÇÃO DO TRABALHO

### Nível básico

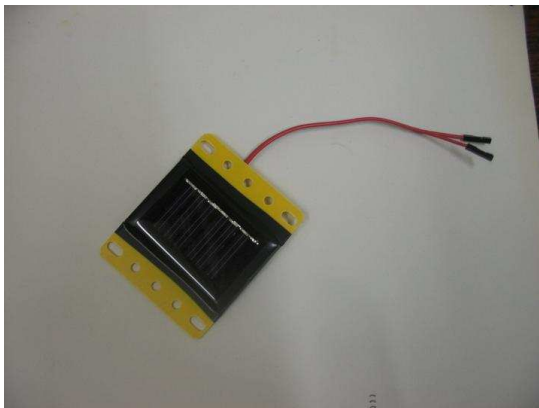
Uma célula fotovoltaica (ou simplesmente fotocélula) é um dispositivo capaz de converter energia luminosa em energia elétrica através de processos físico-químicos. A este processo dá-se o nome de efeito fotovoltaico.

Hoje em dia há muitas aplicações que fazem uso da energia elétrica gerada por fotocélulas desenvolvidas para uso comercial: postes de iluminação urbana, energia elétrica domiciliar, satélites de telecomunicações.

A grande vantagem deste dispositivo é a obtenção de energia limpa, ou seja, que não degrada o meio ambiente e nem oferece riscos de uso. A desvantagem é o custo elevado em relação aos outros meios.

De modo geral, pode-se utilizar diferentes estruturas que convertem energia luminosa em energia elétrica, originando partículas móveis carregadas. Estas estruturas em geral são baseadas numa classe de materiais conhecido como semicondutor.

Uma célula solar típica, comercial, é construída com semicondutor de Silício (Si) monocristalino. O rendimento desta célula, ou seja, a porcentagem de conversão da radiação em energia elétrica quando a estrutura é exposta a luz, é cerca de 15%. Existem também, estruturas de materiais policristalinos e amorfos de Silício, assim como outros materiais como Arseneto de Gálio (GaAs) e Telureto de Cádmio (CdTe) em substituição ao Silício.



**Figura 18: Célula solar de Silício**

Na verdade transistores comerciais de semicondutores utilizados em circuitos eletrônicos também podem atuar como fotocélulas quando são iluminados. Os transistores são formados por diodos, geralmente produzidos com Silício. Assim, fazendo a ligação de apenas um dos diodos que constitui o transistor, ele também apresentará sensibilidade à luz. Como este dispositivo não foi otimizado para ser converter energia luminosa em elétrica, sua resposta à luz não é tão eficiente quanto a célula solar, mas ele poderia ser usado como um fotodetector. Podemos testar

isto utilizando um transistor comercial como o 2N3055 usado em autofalantes. Para isso, é necessário serrar o invólucro do componente para expor o diodo à luz.



**Figura 19: Diodo (aberto) do transistor 2N3055**

Um terceiro tipo de célula fotovoltaica é conhecida como célula de Grätzel por ter sido proposta originalmente pelo Dr. Michael Grätzel do Instituto Federal de Tecnologia da Suíça. Neste caso, a conversão da radiação luminosa em energia elétrica se dá por meios eletroquímicos, e é possível fabricar um modelo simplificado com materiais caseiros.



**Figura 20: Célula de Grätzel**

## Nível ensino médio

Durante o terceiro ano do ensino médio, os alunos aprendem sobre eletromagnetismo. A concepção deste projeto pode relacionar este conceito com a ideia das propriedades elétricas dos sólidos. Além disso, alguns alunos já cursam em paralelo ao ensino médio um curso profissionalizante, incluindo cursos relacionados com eletrônica, o que facilitaria muito a compreensão dos conceitos usados aqui.

### **Isolantes, condutores e semicondutores**

Na natureza encontramos os elementos em 3 estados físicos: gasoso, líquido e sólido.

Os gases geralmente são considerados isolantes (não conduzem corrente elétrica). Porém, se forem submetidos a um campo elétrico intenso, podem ser ionizados e transformar-se em condutores, como ocorre nas lâmpadas fluorescentes.

Os líquidos podem ser isolantes ou condutores. A água pura não conduz eletricidade, ou seja, ela se comporta como um isolante. Porém, se adicionarmos sal (NaCl), ela se torna condutora através dos íons de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  que se formam na água..

Os sólidos cristalinos tem seus átomos dispostos em uma estrutura periódica tridimensional conhecida como rede cristalina e são classificados em isolantes, condutores (metais) e semicondutores.

Esta classificação é feita com base em duas propriedades básicas: a resistividade ( $\rho$ ) e a concentração de portadores de carga ( $n$ ).

Isolantes: não conduzem eletricidade. Elevado  $\rho$  e  $n$  quase nulo.

Condutores: são bons condutores elétricos. Baixo  $\rho$ , alto  $n$  e  $\rho$  aumenta com a temperatura.

Semicondutores: a capacidade de condução elétrica é intermediária entre condutores e isolantes. Valores de  $\rho$  e  $n$  intermediários e  $\rho$  diminui com o aumento da temperatura.

Os semicondutores são a base dos dispositivos sensíveis à luz, como as células fotovoltaicas que convertem radiação em energia elétrica. As células em geral são equivalentes ao componente conhecido como diodo e sua utilização em eletrônica é essencial. Vamos rever resumidamente como este componente funciona.

### **Diodo semicondutor**

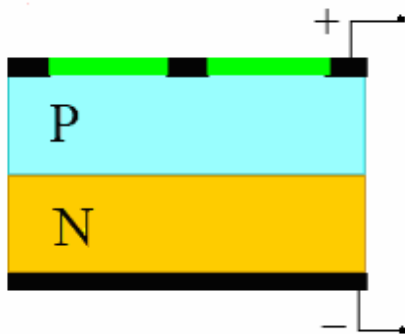
A característica básica do diodo é que ele permite que a corrente flua num sentido com muito mais facilidade do que no sentido oposto outro. Por causa desta característica, os diodos são muito utilizados como retificadores de corrente elétrica em inúmeros aparelhos, desde uma lavadora até um computador.

Esquemáticamente, em um circuito, o diodo é simbolizado pela seguinte figura:



O principal semicondutor utilizado para fabricar diodos é o silício (Si). A produção de um diodo semicondutor é realizada através de um processo conhecido como dopagem. Neste processo, são adicionadas impurezas, ou seja, átomos de outros elementos no cristal semicondutor puro. Estas impurezas com número de valência diferentes do elemento original gerados portadores de carga com mobilidade no material.

A figura 4 mostra visualmente o esquema de um diodo semicondutor. Ele é constituído de duas camadas semicondutores envolvidas por camadas condutoras finas, os contatos. A camada “p” é assim chamada por possuir portadores positivos (falta de elétrons – buracos). A camada “n” possui portadores negativos (elétrons).

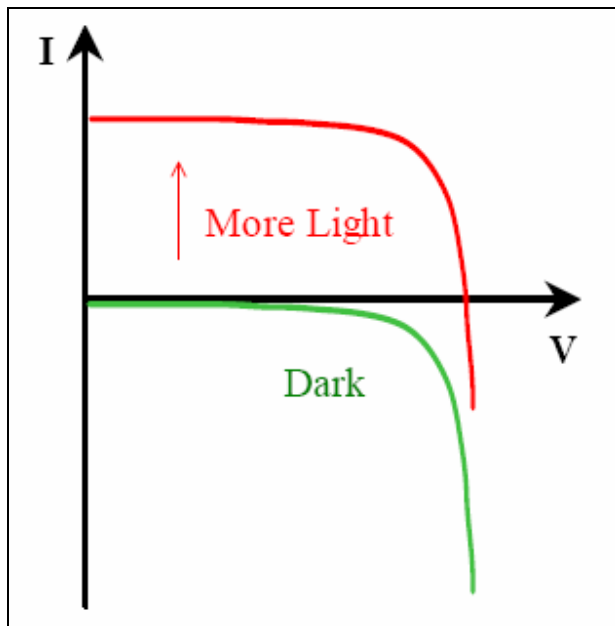


**Figura 21: Estrutura do diodo semicondutor**

Devido a esta diferença de portadores, quando a estrutura p-n é formada, aparece uma diferença de potencial (ddp) entre as duas camadas, que podemos medir quando ligamos fios nos contatos do diodo. Quando iluminado, este diodo pode absorver a energia luminosa gerando portadores adicionais que serão acelerados pela ddp interna da estrutura gerando um aumento de corrente. Assim, o diodo iluminado pode se comportar como uma pilha ou força eletromotriz (fem) num circuito.

### **Célula Solar**

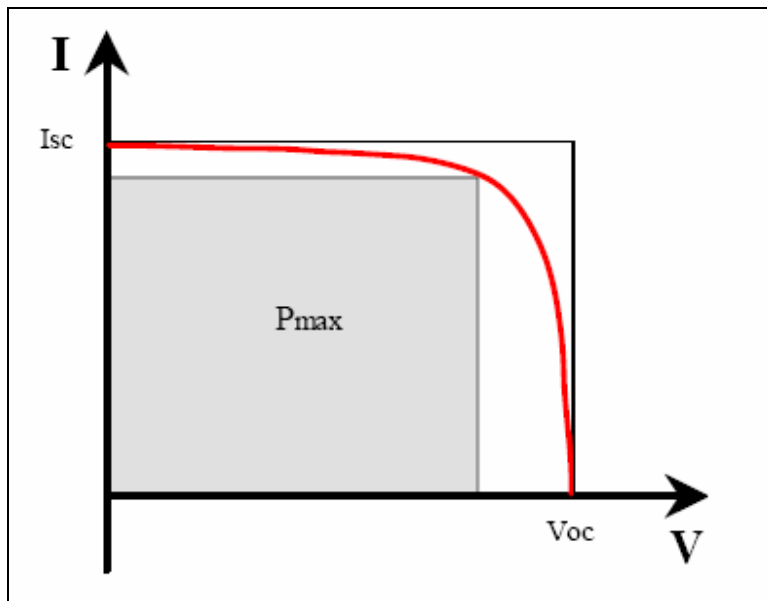
Uma célula solar possui a mesma estrutura de um diodo semicondutor descrito acima. Quando exposto à luz, aumenta a corrente elétrica através do diodo. Para caracterizar uma célula, faz-se uma medida da corrente elétrica em função da tensão aplicada na célula. Assim podemos obter curva  $I \times V$  (Corrente x Tensão) da célula. A figura a seguir apresenta duas curvas  $I \times V$  típicas de uma célula solar no escuro e iluminada:



**Figura 22: Gráfico I x V**

No escuro, a corrente é quase nula até que a voltagem externa aplicada vença a ddp interna da célula e os portadores da região p e n passam a conduzir. Sob iluminação, aparece uma corrente mesmo com tensão externa zero devido aos portadores criados pela luz que são acelerados pela ddp interna da célula. Esta corrente gerada pela luz (fotocorrente) é aproximadamente constante até determinada tensão máxima aplicada no sentido oposto da fotocorrente. Acima deste valor máximo, que corresponde a ddp gerada entre os contatos da célula, a corrente vai a zero e inverte de sentido quando passa a ser dominada pelos portadores criados pela dopagem.

Com este gráfico é possível medir a potência gerada pela célula iluminada dada por  $P=IV$ . A potência máxima gerada pela célula é obtida para uma dada voltagem para o qual este produto é máximo e que corresponde aproximadamente ao retângulo mostrado na figura. A potência máxima será, portanto, igual a área do retângulo, que é aproximadamente igual à área interna da curva IV :



**Figura 23: Integração da potência**

### **Célula de Grätzel**

A célula de Grätzel é uma célula fotovoltaica um pouco diferente pois inclui um eletrólito e uma reação eletroquímica que gera os portadores de cargas utilizados no circuito. Um modelo simplificado desta célula pode ser construída com materiais caseiros. A condução dos portadores é feita por trocas iônicas entre os materiais que constituem a célula. As células são formadas por uma camada semicondutora ( $\text{TiO}_2$ ), uma camada de moléculas de corante (dye), e um eletrólito e catalisador (iodo). Seu funcionamento também gera uma diferença de potencial (ddp) sob iluminação.

## Nível graduação

Neste nível, podemos fazer uma abordagem mais elaborada da física envolvida no projeto para explicar o experimento. A ideia de níveis de energia atômicos e da formação de bandas de energia num cristal permite discutir a geração de portadores em detalhes e compreender o processo de conversão de energia solar em elétrica.

### **Níveis de energia**

Quando os elementos que formam um material se arranjam numa rede cristalina, os níveis atômicos se transformam em bandas de energia permitidas separadas por bandas de energia proibidas para os elétrons.

A ocupação destas bandas por elétrons muda para diferentes materiais e definem a classificação dos sólidos. No caso de metais a banda de mais alta energia ocupada não está completamente cheia. Já para isolantes e semicondutores, a banda de energia mais alta ocupada está completamente preenchida e a banda seguinte está completamente vazia.

### **Semicondutores**

A estrutura de bandas de um semicondutor é parecida com a de um isolante. Contudo, a banda de energia de proibida ("gap",  $E_g$ ) entre a última banda ocupada (banda de valência) e a próxima banda permitida vazia (banda de condução) é menor que a do isolante. Comparando o silício (Si) com  $E_g = 1,1$  eV e o diamante  $E_g = 5,5$  eV observamos que o primeiro é um semicondutor e o segundo é um isolante.

O aumento da energia térmica ( $KT$ ) aumenta a probabilidade de um elétron ser excitado e passar da banda de valência para a banda de condução. Os elétrons que estão numa banda completamente preenchida (banda de valência) não conseguem responder a um campo elétrico pois não tem níveis de energia livres se fossem acelerados pelo campo. Mas quando os elétrons passam para a banda de condução com estados vazios, eles podem ser acelerados pelo campo elétrico e conduzir corrente. Podemos considerar que apenas os portadores em bandas semi-preenchidas: elétrons na banda de condução (carga  $-e$ ) e buracos na banda de valência (carga  $+e$ ) podem conduzir eletricidade. Assim a energia térmica pode aumentar a concentração de portadores num semicondutor, diminuindo sua resistividade.

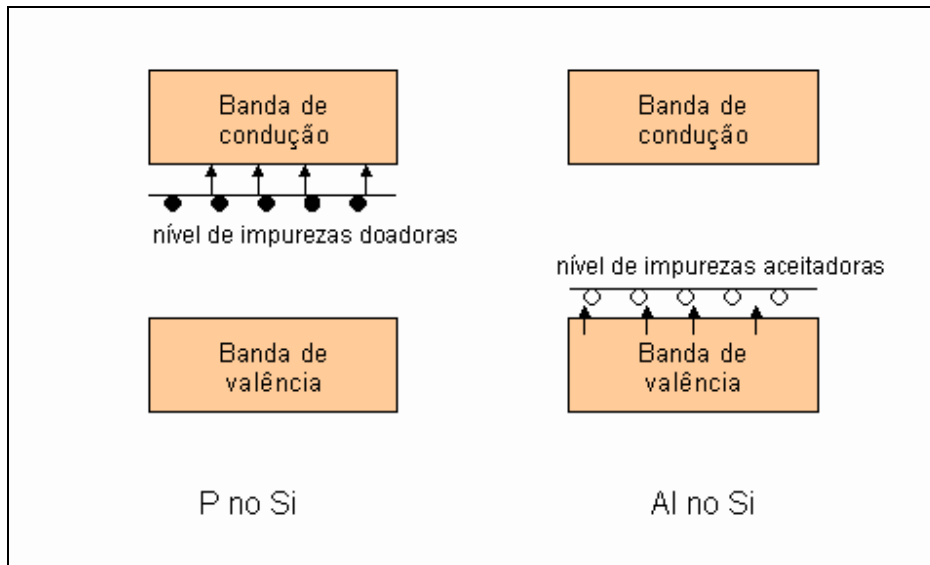
### **Semicondutores dopados**

Um método para aumentar a concentração de portadores de um semicondutor é introduzir algumas impurezas na rede cristalina do material. Em um semicondutor dopado tipo n átomos originais do cristal são substituídos por outro átomo, chamado de impureza ou átomo doador, que possui uma valência maior que a do átomo original da rede. O(s) elétron(s) adicionais ficam fracamente ligados aos átomos de impureza, ou seja, ficam num nível de energia logo abaixo da



banda de condução. Eles podem, portanto, serem facilmente excitados para a banda de condução aumentando a densidade de portadores de carga negativa (elétrons), em maioria, em relação aos portadores de carga positiva (buracos), em minoria.

Num semiconductor tipo p inserimos impurezas ou átomos aceitadores que possuem uma valência menor do que o átomo original do material. A falta de elétron(s) gera um nível de energia próximo a banda de valência. Elétrons da banda de valência podem ser facilmente excitados para estes níveis aceitadores deixando um buraco na banda de valência. Isto gera portadores de carga positiva (buracos) em maioria em relação aos portadores de carga negativa (elétrons) em minoria.

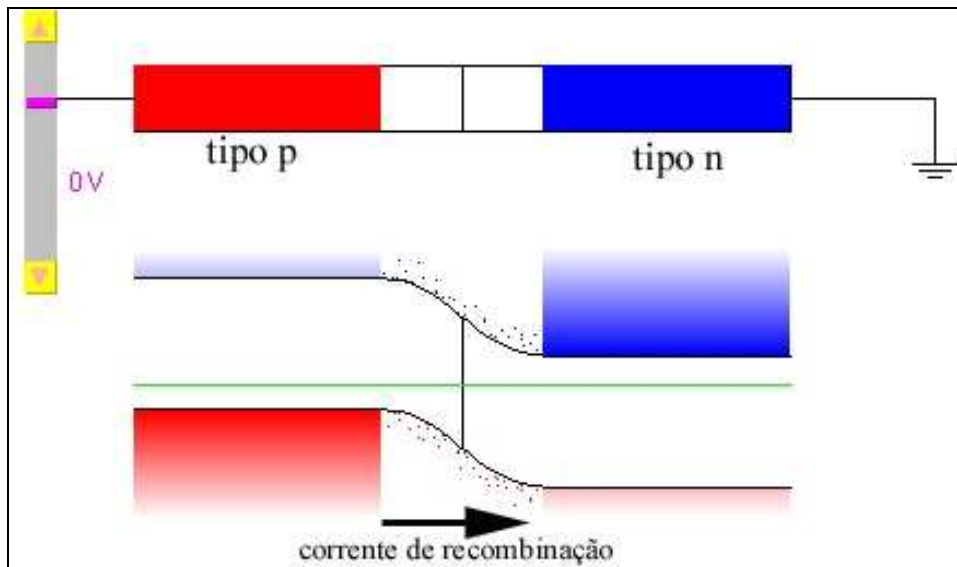


**Figura 24: Bandas de energia**

Apesar das impurezas gerarem portadores de cargas nas bandas, na verdade o material continua neutro, pois o átomo de impureza terá uma carga igual e oposta a do portador gerado. Além disso, dopando o material tipo n ou tipo p, teremos um aumento da condutividade do material, mas isto não gera uma diferença de potencial e, portanto, não gera uma corrente elétrica no cristal.

### **Junção p-n**

A junção p-n é um cristal semiconductor com uma camada dopada com impurezas aceitadoras seguido de uma camada dopada com impurezas doadoras. Quando a junção é formada, os portadores negativos do lado n tendem a difundir para o lado p, assim como os portadores positivos do lado p tendem a difundir para o lado n. Esta difusão acaba gerando um campo elétrico que se opõe ao movimento destas cargas. De modo que a difusão cessa quando é alcançado este equilíbrio entre a difusão e o campo elétrico da junção, como mostra a figura. Nesta situação os portadores majoritários não geram mais uma corrente, mas os poucos portadores minoritários presentes no material serão acelerados pelo campo elétrico da junção gerando uma pequena corrente.



**Figura 25: Corrente de recombinação na junção p-n**

### **Células fotovoltaicas**

As células fotovoltaicas são baseadas em uma junção p-n. Caso a junção entre o lado p e o lado n seja exposta à luz com fons de energia maior que a da banda proibida ( gap de energia), os fons podem excitar um elétron da banda de condução para a banda de valência nesta região. Estes portadores fotogerados serão então acelerados e separados pelo campo elétrico da junção (elétrons são acelerados para o lado n e buracos são acelerados para o lado p) aumentando a corrente na junção p-n.

Assim funcionam as células comerciais de silício (gap de  $\sim 1,1$  eV), feitas para o propósito de transformação de energia solar em elétrica. Estas células podem ser do tipo monocristalinas, policristalinas e amorfas. A primeira representa 60% da produção no mercado, pois sua eficiência na conversão de radiação solar em energia elétrica é de aproximadamente 15%, em comparação a 12% da policristalina e 6% da amorfa.

O diodo do transistor 2N3055 também é constituído de uma junção pn feita com silício, mas como o objetivo do transistor não é de conversão de energia luminosa em elétrica, o diodo é lacrado com um invólucro para não ser exposto à luz. Mesmo quando eliminamos esta tampa e expomos este dispositivo a luz, sua resposta não é muito significativa, pois esta estrutura não foi otimizada para iluminar a região da junção p-n, como no caso da célula solar.

As células de Grätzel, também conhecidas como célula solar nanocristalina sensibilizada por corante (CSNS), adquirem uma fotosensibilidade através dos efeitos químicos entre o corante e o iodo. O  $\text{TiO}_2$  também é um semiconductor, mas como energia de gap relativamente grande ( $\sim 3,0$  eV). Esta energia corresponde a um comprimento de onda na região ultravioleta e, portanto, seria pouco sensível a luz solar. O corante (dye), no entanto, tem níveis de energia atômicos que podem ser excitados com fons de menor energia correspondentes a comprimentos de onda na região visível do espectro, aumentando a resposta do dispositivo à luz visível. Os elétrons fotogerados no dye são atraídos para a camada de  $\text{TiO}_2$ , enquanto que o buraco restante gera uma reação química com o iodo, separando assim os dois portadores fotogerados. Utilizando vidros

com camadas finas transparentes condutoras (ITO), podemos fazer um contato elétrico nesta junção e usa-la como uma célula fotovoltaica.

### Modelos fotovoltaicos

Para analisar a resposta corrente vs voltagem aplicada a uma célula fotovoltaica, conhecida como curva IxV, utilizamos um modelo simples apresentado abaixo.

Neste modelo, a estrutura interna da célula é representada por uma fonte de corrente ( $I_s$ ) gerada pela absorção de ftons do feixe de radiação luminosa em paralelo com a própria junção p-n (diodo) orientado como mostra a figura, além de uma resistência interna em série ( $R_s$ ) que representa a resistência dos contatos do dispositivo. O desenho esquemático do circuito segue a figura:

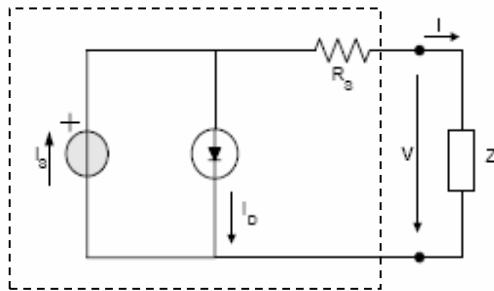


Figura 9 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z

A corrente final que passa no circuito externo utilizado para obter os dados da curva IxV é dada por:

$$I = I_s - I_d$$

## **DECLARAÇÃO DO ORIENTADOR**

Minha orientadora realizou os seguintes comentários:

*“O novo relatório apresentado mostra uma boa evolução do estudante ao longo do projeto. Acredito que o estudante melhorou bastante sua compreensão sobre os fenômenos físicos envolvidos no tema escolhido e também apresentou uma bom avanço em relação a medidas, apresentação dos resultados e discussão do projeto.*

*Ainda restam alguns pontos que poderiam ser aprimorados, tanto na parte das medidas, especialmente nas células de Gratzel, cujos dados ainda parecem pouco consistentes e deveriam ser repetidos, como também na apresentação e descrição dos resultados. Sugestões simples como analisar as curvas IV dos fotodiodos no texto proposto ao nível de graduação e trabalhar os resultados da célula solar e do diodo mostrando as potencia obtida a partir dos dados obtidos, poderiam ser incorporados sem grandes dificuldades.*

*De qualquer forma, apesar das dificuldades de tempo e horários livres, o estudante demonstrou interesse e responsabilidade no projeto, que foi certamente benéfico para sua formação.”*

## **HORÁRIO PARA APRESENTAÇÃO**

Solicito a quarta-feira, dia 13 de junho de 2012 – primeira turma, 15 – 17 h.

## **ANEXOS**

## Fazer uma célula fotovoltaica

Manuel Azevedo e António Cunha  
Departamento de Física Universidade de Aveiro

Nos últimos anos, tem-se assistido a um crescente interesse da sociedade por questões ligados à protecção do ambiente, da poupança dos recursos energéticos e da procura de novos recursos alternativos, não poluentes, como por exemplo a utilização da energia solar. Todos conhecemos as células solares (painéis) fotovoltaicas que se encontram nas auto-estradas, nos telhados de casas (infelizmente muito pouco em Portugal), nos satélites de telecomunicações e noutros lugares onde não existe rede eléctrica. Na sua maioria estas células solares baseiam-se no semiconductor de silício (Si) que é muito utilizado na microelectrónica. O facto da tecnologia das células fotovoltaicas não ter uma grande utilização na produção directa de electricidade, deve-se aos, ainda relativamente elevados, custos de produção. Daí que existam um elevado número de grupos de investigação no mundo e em Portugal a investigar novos materiais que não o Si e novos métodos de preparação. Um dos mais recentes resultados de investigação mostrou que é possível usar materiais orgânicos na produção de energia, envolvendo um processo semelhante ao que acontece na natureza com a fotossíntese. Em 1991, um grupo de investigação na Suíça, do Instituto Federal de Tecnologia, sob a orientação do Professor Michael Grätzel, desenvolveu uma célula fotovoltaica baseada num corante sintético que transforma uma grande parte da energia solar em energia eléctrica. Ao contrário da fotossíntese, onde a energia solar é utilizada nas plantas para a produção de açúcar, na célula de Grätzel a energia solar é directamente utilizada para a produção de energia eléctrica. Nos secções seguintes descreveremos o funcionamento da célula solar utilizando conhecimentos de Físico-Química do 3º ciclo do Ensino Básico e do Secundário fornecendo a receita para a preparação de uma célula solar fotovoltaica na sala de aula.

### Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica de Grätzel

O que acontece na fotossíntese? A fotossíntese é nada mais do que a transformação de energia solar em energia química. A energia solar é utilizada para fomentar a transformação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e a água (H<sub>2</sub>O) em oxigénio (O<sub>2</sub>) e glucose (açúcar). Na célula fotovoltaica, pretende-se a transformação da energia solar directamente em energia eléctrica.

A célula fotovoltaica de Grätzel é constituída principalmente por moléculas de um corante ("dye"), um semiconductor nanocristalino (TiO<sub>2</sub>, dióxido de titânio), um electrólito (solução de iodo), dois eléctrodos de vidro com uma camada condutora e transparente (SnO<sub>2</sub>) e um catalisador (grafite ou platina). Na figura seguinte apresenta-se o esquema da célula que vamos preparar:

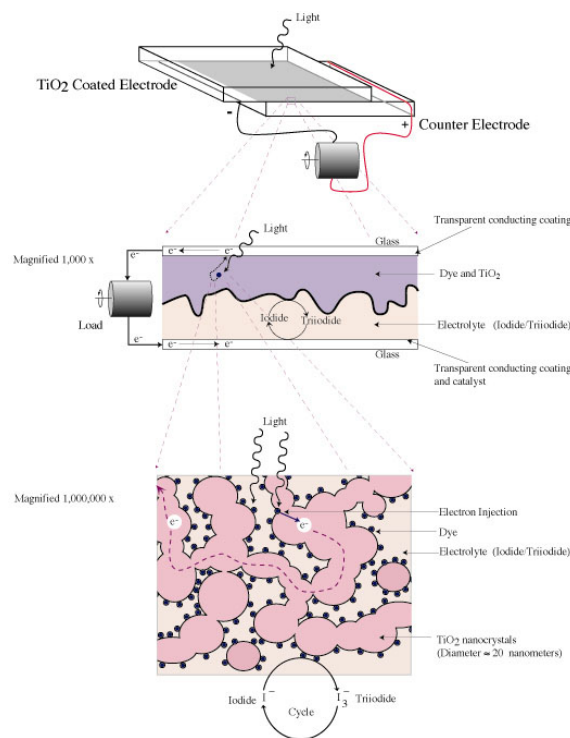


Figura 1: Estrutura da célula fotovoltaica.

O corante (dye) recebe do electrólito um electrão, (reacção III, abaixo). As moléculas do electrólito (solução de iodo) são reduzidas no eléctrodo positivo (recebem um electrão através do eléctrodo). Para facilitar a redução das moléculas na superfície do eléctrodo é depositado uma camada fina de grafite. Para haver um fluxo da corrente eléctrica é necessário ligar os dois eléctrodos a uma resistência de carga.

#### Reacções químicas:

- (I) dye + luz (energia solar) → dye\*
- (II) dye\* + TiO<sub>2</sub> → e<sup>-</sup>(TiO<sub>2</sub>) + dye oxidado
- (III) dye oxidado +  $\frac{3}{2}I^- \rightarrow dye \text{ (neutro)} + \frac{3}{2}I_3^-$
- (IV)  $\frac{3}{2}I_3^- + e^-(\text{eléctrodo}) \rightarrow \frac{3}{2}I^-$

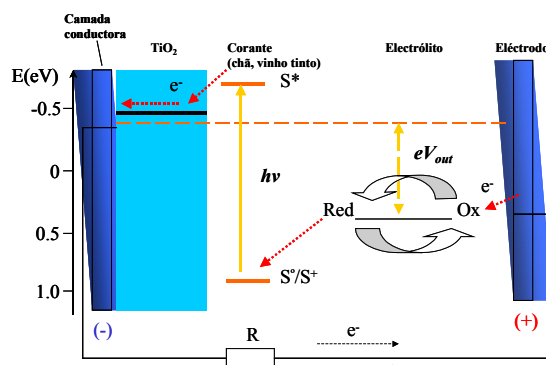


Figura 2: Esquema de energias da célula fotovoltaica

## Preparação da célula fotovoltaica

A preparação da célula fotovoltaica é feita em 4 passos:

1. Preparação do eléctrodo negativo (-)
2. Preparação do eléctrodo positivo (+)
3. Colocação da solução colorida no eléctrodo negativo (-)
4. Montagem da célula fotovoltaica

A descrição da preparação da célula tem como pressuposto que a pasta/solução de  $\text{TiO}_2$  e a solução do corante (chá) já se encontra prontas a utilizar.

### Passo nº 1: Preparação do eléctrodo negativo (-)

- a) Limpar as lamelas de vidro sem a camada de  $\text{TiO}_2$  (transparente) com água e uma escova e depois secar com um pano ou um secador.
- b) Todas as lamelas tem um lado que é coberto por uma camada condutora de  $\text{SnO}_2$  (ITO). O lado condutor da lamela pode ser determinado através da medida da resistência eléctrica com o multímetro.
- c) Coloque na mesa a lamela com a superfície condutora para cima e fixe-o com fita adesiva.
- d) Com a pipeta cheia, é colocada na superfície descoberta da lamela a solução/pasta de  $\text{TiO}_2$ .

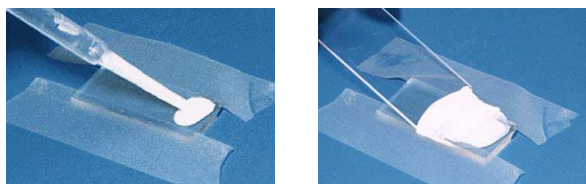


Figura 3: Colocação da pasta de  $\text{TiO}_2$  na lamela de vidro.

- e) Com a pá distribui-se a pasta de  $\text{TiO}_2$  na superfície de modo a obter um filme fino e homogéneo.
- f) Caso o resultado não seja satisfatório, limpe a lamela com um pano húmido e repita a colocação do  $\text{TiO}_2$ .
- g) **Não toque** na solução de  $\text{TiO}_2$  pois isso diminui a sua eficiência!
- h) Seque com um secador a solução de  $\text{TiO}_2$  até que a restante humidade tenha evaporado. A distância entre o secador e a lamela deve ser cerca de 10 cm.
- i) Retire a fita adesiva da lamela com cuidado e sem tocar no  $\text{TiO}_2$ .
- j) Coloque a lamela num forno, para “cozer” o filme de  $\text{TiO}_2$ . A temperatura deve ser entre os  $450^\circ\text{C}$  e  $550^\circ\text{C}$ . O tempo de recozimento é de cerca 10 minutos.

### Passo nº 2: Preparação do eléctrodo positivo (+)

- a) Limpar uma outra lamela de vidro com a camada condutora e transparente com água e uma escova e depois seque com um pano ou um secador.
- b) Determine o lado condutor da lamela com o multímetro (medir a resistência).
- c) Coloque na superfície condutora da lamela de vidro uma camada de grafite com o lápis. A superfície do vidro deverá ficar escurecida.

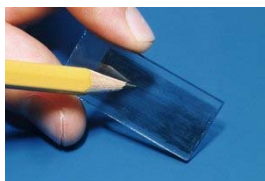


Figura 4: Preparação do eléctrodo positivo com um filme de grafite.

### Passo nº 3: Colocação do corante no eléctrodo negativo (-)

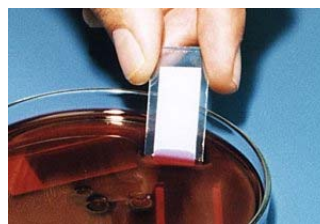


Figura 5: Colocação do corante.

- a) Depois de o eléctrodo negativo estar frio, é necessário “pintá-lo” com a solução colorida (chá) anteriormente preparada.
- b) Coloque o eléctrodo na solução colorida de forma a cobrir completamente o eléctrodo.

- c) Depois de 5 minutos retire o eléctrodo da solução. O eléctrodo deverá ficar com uma cor vermelho/violeta.
- d) Limpe com muito cuidado o eléctrodo da solução colorida que se encontra nos bordos da lamela.
- e) Seque com o secador o eléctrodo. O eléctrodo está seco, quando a intensidade da cor ficar mais fraca.

### Passo nº 4: Montagem da célula fotovoltaica

- a) Junte os dois eléctrodos como indicado na figura 6, utilizando um clip. A camada de  $\text{TiO}_2$  activada com o corante tem que estar em contacto com a camada de grafite. Para mais tarde ligar os cabos eléctricos à célula fotovoltaica, é necessário montar os eléctrodos desfasados.
- b) Para “activar” a célula fotovoltaica, coloque uma gota de electrólito na célula fotovoltaica (ver figura 7).

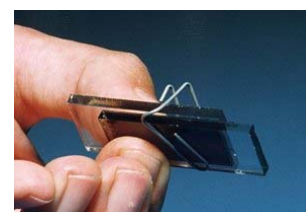


Figura 6: Montagem final da célula.

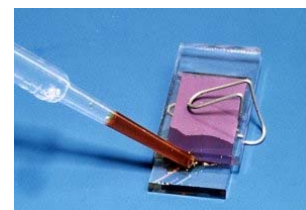


Figura 7: Activar a célula.

- c) Para observar o funcionamento da célula, ligue a célula ao multímetro e meça a corrente eléctrica. Vai observar que a tensão vai aumentar lentamente. Para esta configuração deverá medir uma tensão em circuito aberto de cerca 0,3V.

## Estudos a realizar com a célula fotovoltaica na sala de aula (clubes de ciência e ambiente)

Não foi “fácil” fazer a sua célula fotovoltaica?

Partindo desta experiência pode fazer um conjunto de medidas e interessantes investigações, no âmbito da disciplina de Físico-Química ou em Clubes de Física. Em seguida apresentamos alguns dos tópicos que podem realizar.

1. Determinação da curva I-V da célula fotovoltaica.
2. Determinação da potência em função da resistência de carga.
3. Influência do tipo de corante para os valores característicos da célula. Como outros corantes podem ser usados por exemplo: vinho tinto, sumo, outros tipos de chá, etc.
4. Influência da camada catalisadora (grafite) para o funcionamento da célula.

## Exemplos de estudos

### Determinação da curve I-V da célula fotovoltaica.

A caracterização de uma célula fotovoltaica é realizada através da medida da curva corrente-tensão (I-V). A curva I-V pode ser determinada medindo a tensão e a corrente da célula fotovoltaica para diferentes valores da resistência de carga. Na tabela seguinte encontram-se os dados experimentais de corrente, tensão e resistência obtidos numa das células fotovoltaicas de Grätzel.

I( $\mu$ A)	U(V)	R( $\Omega$ )
374	0.0017	5
373	0.0037	10.4
372	0.007	20
370	0.011	31.2
367	0.019	54
356	0.061	170
352	0.073	207
353	0.095	266
355	0.106	300
346	0.132	380
343	0.142	413
333	0.168	505
324	0.182	556
307	0.201	652
248	0.248	1000
149	0.3	2000
106	0.32	3000
82	0.33	4000
67	0.336	5000
56	0.34	6000

No gráfico em baixo, representa-se a curva corrente-tensão.

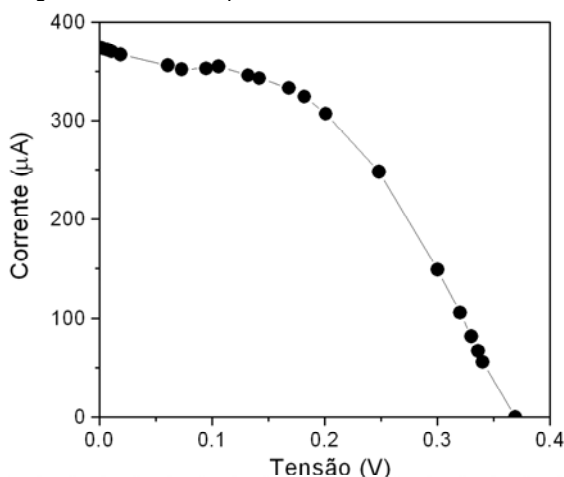


Figura 8: Curva corrente-tensão.

A forma da curva corrente-tensão é semelhante à de uma junção semicondutora *p-n* (diodo). A célula fotovoltaica comporta-se para baixos valores de tensão como uma fonte de corrente ( $V < 0,5V$ ). Da representação gráfico podemos obter os parâmetros da célula:

Tensão em circuito aberto:  $V_{OC} = 0.369 V$   
 Corrente máxima:  $I_{max} = 374 \mu A$

### Determinação da potência da célula fotovoltaica (em função da resistência de carga).

Um dado importante para a aplicação das células fotovoltaicas como fonte de alimentação, é a potência eléctrica que estas podem fornecer em função da carga eléctrica (resistência). Para obtemos esse dado teremos que calcular a potência da célula para cada valor da resistência da carga ( $P = U \times I$ ).

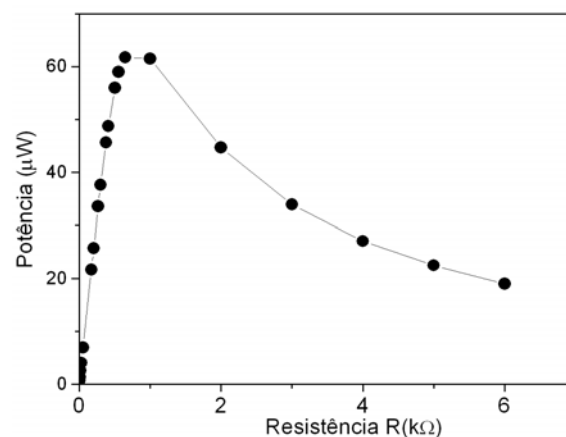


Figura 9: Curva potência fornecida pela célula em função da carga.

Da representação da potência em função da resistência de carga, podemos verificar que só para um valor específico da resistência de carga é que a célula fotovoltaica fornece a sua máxima potência. Para o caso da célula aqui estudada, obtemos um potência máxima de  $P_{max.} = 60 \mu W$  para uma resistência de carga de  $R_{carga} = 700 \Omega$ .

## Bibliografia

1. B. O'Regan, M. Grätzel, Nature 353, 737-739 (1991).
2. A. Kay, M. Grätzel, J. Phys. Chem. 97, 6272 (1993).
3. G.P. Smestad, M. Grätzel, J. Chem. Educ. 75, 752 (1998).



# Validação Experimental de Modelos de Células Fotovoltaicas

Nuno Mota<sup>1</sup>, VitalVilarinho<sup>1</sup>, Nuno Cláudio<sup>1</sup>, E. Margato<sup>1,2,3</sup>, F. Sales Rodrigues<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa  
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 – 1950 – 062 Lisboa, Portugal  
Tel: +351 218 317 010, Fax: +351 218 317 009

<sup>2</sup> Centro de Electrotecnia e Electrónica Industrial, Centro de Instrumentação e Controlo – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa,

R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 – 1950 – 062 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup> Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais – 1049-001 Lisboa, Portugal  
Tel: +351-21-8417215, Fax: +351-21-8417167

**E-mail:** [nmota@deea.isel.ipl.pt](mailto:nmota@deea.isel.ipl.pt), [vvilarinho@deea.isel.ipl.pt](mailto:vvilarinho@deea.isel.ipl.pt), [nclaudio@deea.isel.ipl.pt](mailto:nclaudio@deea.isel.ipl.pt),  
[fmargato@deea.isel.ipl.pt](mailto:fmargato@deea.isel.ipl.pt), [ferdrigues@deea.isel.ipl.pt](mailto:ferdrigues@deea.isel.ipl.pt)

**Abstract** In this paper, beginning with an introduction about photovoltaic conversion in solar cells, are presented results of measurements in photovoltaic panels that allow to obtain curves traducing panels performance.

It is also presented two models that permit characterize the behaviour of panels in solar energy conversion to electrical energy.

Conclusions are presented about the similarity between simulation based on models and experimental results.

**Keywords** Solar cells, Photovoltaic models, Incident radiation, Short-circuit current, Open circuit voltage.

## 1. Introdução

Células solares são dispositivos semicondutores que convertem a energia solar em energia eléctrica, utilizando a energia dos fotões na geração de pares electrão-lacuna.

Actualmente é possível encontrar, no mercado, células solares com eficiência de 15% a 18%, a custos compatíveis com os objectivos desejados. No entanto, a eficiência da conversão energia solar/energia eléctrica em painéis fotovoltaicos comerciais, que é o caso em análise, é da ordem de 10 a 15%, devido a perdas inerentes aos materiais envolvidos e aos circuitos eléctricos associados aos sistemas.

O espectro da radiação solar é constituído por diversas frequências, que vão desde os infravermelhos até às altas frequências (ultravioletas). No entanto, sabe-se que há uma quantidade considerável desta energia que não chega a atingir a superfície da terra, devido a diversos fenómenos de reflexão e atenuação pela camada de ozono e à absorção de raios infravermelhos pelas moléculas de H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Devido aos fenómenos referidos, a radiação que chega à

superfície da terra é constituída por três componentes, a radiação directa, que vem directamente do sol, a radiação difusa, proveniente de todo o céu excepto do disco solar e a radiação reflectida, proveniente da reflexão no solo e em objectos circundantes.

## 2. Células fotovoltaicas

No processo de conversão de energia que ocorre numa célula fotovoltaica, a radiação luminosa incidente origina partículas móveis carregadas, no semicondutor, que são separadas da sua estrutura produzindo corrente eléctrica.

As células fotovoltaicas são constituídas por silício, que é um material semicondutor, com características intermédias entre um condutor e um isolante.

### A. Tipo de células

O silício monocristalino é o material mais usado na constituição das células fotovoltaicas, atingindo cerca de 60% do mercado. A sua eficiência na conversão de radiação solar em energia eléctrica é cerca de 15%.

O silício policristalino, constituído por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um cabelo humano, dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%. As descontinuidades da estrutura molecular dificultam o movimento de electrões e facilitam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída. Por este motivo o seu rendimento ronda os 12%. Em contrapartida, o processo de fabricação é mais barato do que o do silício monocristalino.

A figura 1 mostra a superfície activa de uma célula fotovoltaica típica de silício cristalino. Tem a forma de um quadrado com cerca de 10 cm de lado e pesa aproximadamente 10 gramas.



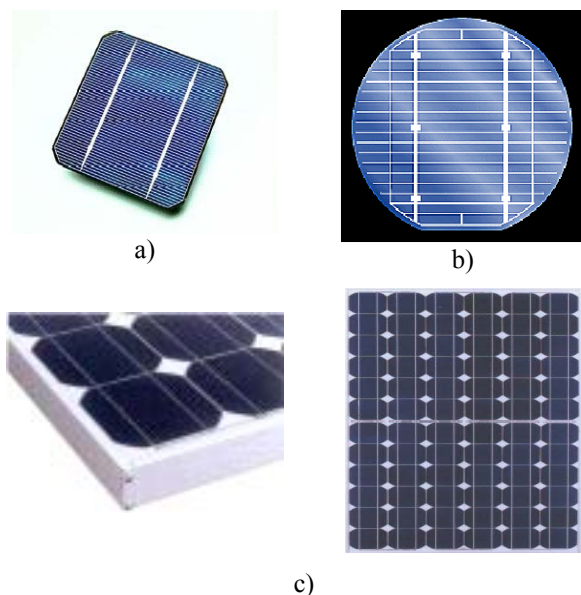


Figura 1 – a) Superfície activa de uma célula fotovoltaica típica;  
 b) Pormenor da grelha colectora metálica na superfície;  
 c) Aspecto exterior da célula utilizada

O silício amorfo não tem estrutura cristalina, apresentando defeitos estruturais que, em princípio, impediriam a sua utilização em células fotovoltaicas, uma vez que aqueles defeitos potenciam a recombinação dos pares electrão-lacuna. No entanto, se ao silício amorfo for adicionada uma pequena quantidade de hidrogénio, por um processo designado por hidrogenização, os átomos de hidrogénio combinam-se quimicamente de forma a minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais.

O silício amorfo absorve a radiação solar de uma maneira muito mais eficiente do que o silício cristalino, pelo que é possível depositar uma fina película de silício amorfo sobre um substrato (vidro ou metal). Este processo de fabrico é ainda mais barato do que o do silício policristalino. Os equipamentos solares domésticos (calculadoras, relógios) são habitualmente feitos com células de silício amorfo, representando cerca de 4% do mercado. A sua eficiência na conversão da radiação solar em energia eléctrica é de cerca de 6%.

#### B. Novos materiais

Na área dos novos materiais para fabrico de células, os desenvolvimentos são constantes. O silício, material cuja utilização era consensual, começa a ser, cada vez mais, substituído por outros materiais. Uma das razões desta substituição é o custo da sua transformação, tarefa “suja” e tecnologicamente complexa e também o facto de a sua performance se degradar consideravelmente com a idade.

O futuro passa pela descoberta de novos materiais, mais baratos e eficientes. Prova disso é o facto de todos os grandes fabricantes de células fotovoltaicas terem já entrado no desenvolvimento de novos materiais.

Os materiais mais promissores são o Disselénio de Índio e Cobre e o Telúrio de Cádmio.

A BP®, líder mundial no fabrico de células fotovoltaicas, optou pelo Telúrio de Cádmio, que, embora não seja o material mais promissor, é bastante mais fácil de utilizar e tem menos problemas associados.

### 3. Apresentação e descrição dos ensaios do módulo fotovoltaico BP Solar® BP 2150 S

Pretende-se verificar, com os ensaios realizados, as diversas características eléctricas do sistema fotovoltaico estudado, constituído por 4 módulos (BP Solar® – BP 2150 S). Cada módulo apresenta as características constantes do catálogo do fabricante, que se indicam na tabela 1.

Tabela 1 – Característica do módulo fotovoltaico BP Solar® BP 2150 S

<i>Silício monocristalino</i>		
Potência máxima	$P_{max}$	150 W
Tensão máxima	$V_{max}$	34 V
Corrente máxima	$I_{max}$	4,45 A
Corrente de curto-circuito	$I_{cc}$	4,75 A
Tensão em circuito aberto	$V_{ca}$	42,8 V
Coefficiente de temperatura de $I_{cc}$	$\mu I_{cc}$	$65E^{-03} A/^{\circ}C$
Coefficiente de temperatura de $V_{ca}$	$\mu V_{ca}$	$-160E^{-03} V/^{\circ}C$
Coefficiente de temperatura de $P_{max}$	$\mu P_{max}$	$-0,5 W/^{\circ}C$
Temperatura normal de funcionamento	NOCT	47°C
Comprimento	C	1,590 m
Largura	L	0,79 m
Área	A	1,256 m <sup>2</sup>
Número de células em série	$N_s$	72

Com os ensaios realizados pretendeu-se atingir os seguintes objectivos:

- Obtenção da curva característica tensão-corrente;
- Determinação da variação da tensão em circuito aberto,  $V_{ca}$ , e da corrente de curto-circuito,  $I_{cc}$ , com a temperatura e com a intensidade da radiação incidente;
- Obtenção do ângulo de inclinação ideal, de acordo com a intensidade de radiação recolhida numa determinada época do ano;
- Verificação da relação existente entre a potência máxima, a radiação incidente e a temperatura.

As curvas características registadas, foram obtidas com a utilização de resistências variáveis, as quais simulam a carga introduzida no sistema.

Face a estes objectivos, foi executado um ensaio experimental com o esquema de ligações da figura 2.

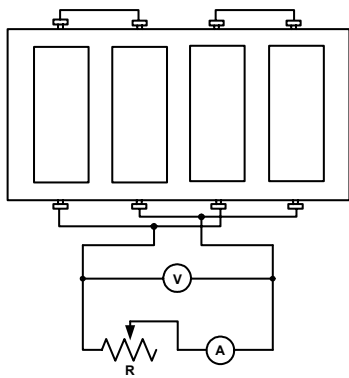


Figura 2 – Ligações efectuadas no ensaio

### A. Descrição dos ensaios

Para diferentes graus de inclinação, são apresentados na tabela 2 valores de radiação solar incidente no piranómetro (aparelho utilizado para medir a intensidade da radiação solar incidente).

Tabela 2 – Valores de radiação solar/inclinação (Março e Setembro de 2003, em Lisboa)

Ângulo de inclinação (graus)	Radiação Solar (W/m <sup>2</sup> ) (Março)	Radiação Solar (W/m <sup>2</sup> ) (Setembro)
90	581.63	429.11
80	747.83	493.24
70	822.67	551.61
60	877.46	594.46
50	914.24	623.43
40	920.91	630.02
30	928.46	626.43
20	896.37	610.46
10	841.73	582.97
0	790.04	535.70

Como se pode constatar da tabela 2, as inclinações mais vantajosas para os meses de Março e Setembro são, respectivamente, 30° e 40° em relação ao solo.

Assim, o painel foi colocado com a inclinação de 30° e seguidamente foram retirados valores para a característica corrente-tensão. O ensaio consistiu na ligação em paralelo de duas séries de dois módulos, como se representa na figura 2.

As características I-V e P-V registadas são apresentadas na figura 3, tendo sido obtidas para um ângulo de 30 graus, uma radiação incidente de 650 W/m<sup>2</sup> e uma temperatura de 27,5°C, em Março de 2003.

Na figura 4 ilustra-se a variação da curva I-V com a radiação incidente, para a unidade que tem vindo a ser analisada.

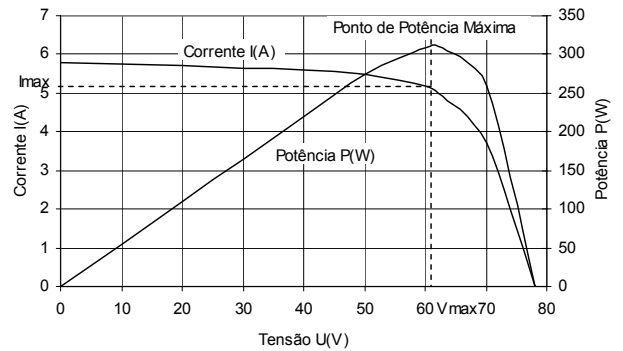


Figura 3 – Curvas características I-V e P-V

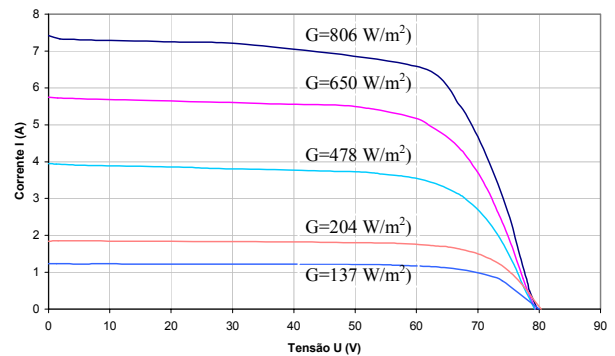


Figura 4 – Curva I-V com variação da radiação incidente; resultados experimentais (Março 2003)

Esta figura mostra que :

- A potência de saída aumenta com o aumento da radiação incidente, numa relação de 600(W)/1000(W/m<sup>2</sup>);
- A corrente de curto-circuito varia linearmente com a radiação incidente;
- A tensão em circuito aberto varia pouco com a radiação incidente, sendo esta variação mais significativa para valores baixos de radiação incidente.

Na figura 5 ilustra-se a variação da potência e da temperatura, para a unidade que tem vindo a ser analisada, ao longo de um dia.

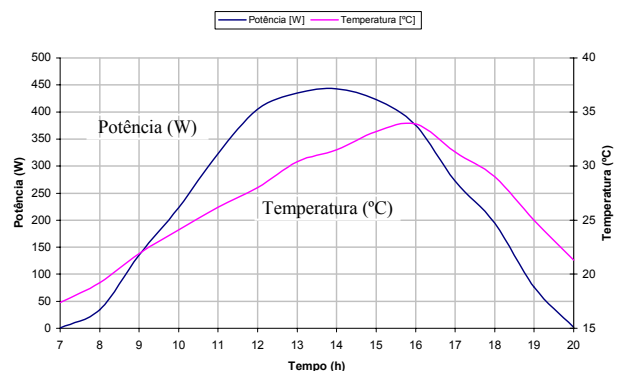


Figura 5 – Variação da potência e da temperatura ao longo do dia; resultados experimentais (Julho 2003)

Pode observar-se que:

- A potência de saída evolui ao longo do dia e apresenta o valor máximo às 14h ;
- A influência da temperatura na potência de saída é baixa.

Na figura 6 ilustra-se a variação da curva I-V com a temperatura para um módulo da unidade que tem vindo a ser analisada.

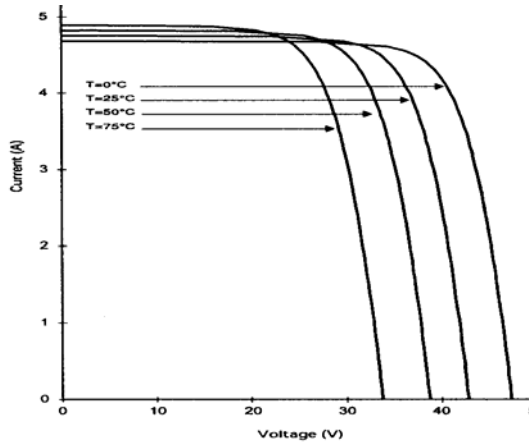


Figura 6 – Variação da curva I-V com a temperatura para um módulo; Fonte: BP Solar® (Fabricante)

Desta figura pode constatar-se que:

- A potência de saída decresce com o aumento da temperatura;
- A tensão em circuito aberto decresce com a temperatura ( aproximadamente  $0,2V/^{\circ}C$ );
- A corrente de curto-circuito varia muito pouco com a temperatura.

As figuras 7 e 8 mostram os resultados obtidos para a variação da potência máxima com a radiação incidente e com a temperatura.

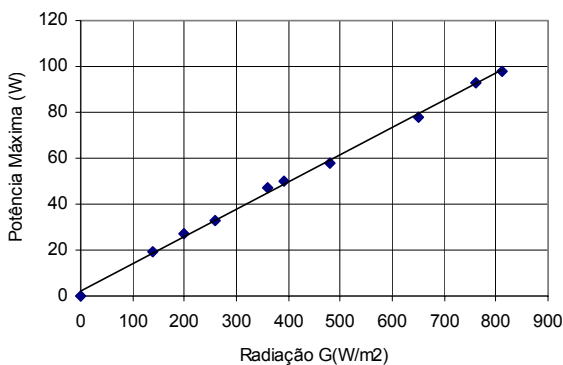


Figura 7 – Variação da potência máxima com a radiação incidente; Valores prático retirados do ensaio referentes a um módulo BP Solar® BP 2150 S

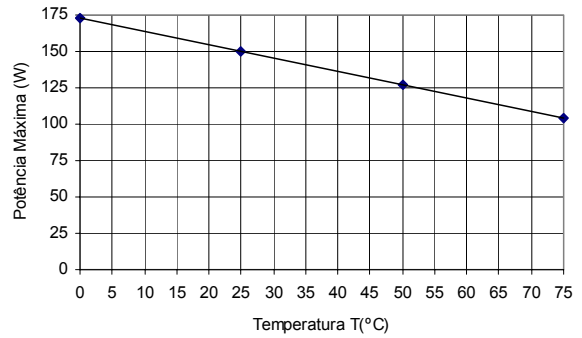


Figura 8 – Variação da potência máxima com a temperatura;  $G=1.000\text{ W/m}^2$ , com base na figura 6, dada pelo fabricante

Pode comprovar-se a acentuada diminuição da potência máxima quando a radiação solar incidente baixa; a diminuição da potência máxima com o aumento da temperatura é menos acentuada.

#### 4. Modelos fotovoltaicos

Em qualquer simulação que envolva sistemas fotovoltaicos, uma escolha importante é a selecção do modelo a utilizar. Este modelo deve permitir a obtenção das características I-V, em função da temperatura ambiente e das condições de radiação incidente.

O primeiro modelo apresentado é um modelo extensamente usado como uma base semifísica, que trata um sistema FV como uma fonte de corrente dependente em paralelo com um diodo e com uma resistência em série.

Os quatro parâmetros que aparecem nas equações são respectivamente  $I_s$ , corrente gerada pela fonte de corrente,  $R_s$ , resistência em série e as característica do diodo  $I_0$  e  $m$ . Estes parâmetros, geralmente, não são incluídos nos dados fornecidos pelos fabricantes, pelo que devem ser determinados analiticamente com base nesses dados.

O segundo modelo que se apresenta é um modelo de cinco parâmetros, que corresponde a acrescentar uma resistência em paralelo,  $R_p$ , ao esquema inicial de quatro parâmetros. Este último modelo tem uma vantagem significativa, que é ser aplicável a sistema FV tanto com células cristalinas, como amorfas.

##### A. Modelo fotovoltaico de quatro parâmetros

Em termos de modelo simplificado, uma célula solar pode ser descrita através do circuito eléctrico equivalente apresentado na figura 9, que permite traduzir os diversos fenómenos que podem ocorrer no seu funcionamento.

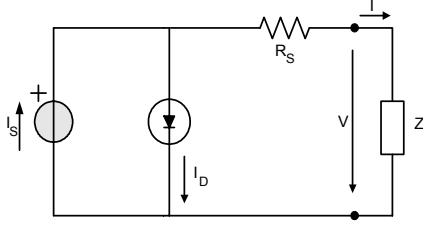


Figura 9 – Circuito eléctrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z

A fonte de corrente,  $I_s$ , representa a corrente eléctrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fotões, ao atingir a superfície activa da célula (efeito fotovoltaico); esta corrente unidireccional é constante para uma dada radiação incidente. A junção p-n funciona como um díodo que é atravessado por uma corrente interna unidireccional  $I_D$ , que depende da tensão  $V$  aos terminais da célula.

A resistência em série  $R_s$  é um parâmetros de ajuste, que dá conta da queda de tensão interna que se observa numa célula.

A corrente  $I$  que percorre a carga é dada por:

$$I = I_s - I_D \quad (1)$$

A corrente no díodo  $I_D$  pode ser traduzida pela equação

$$I_D = I_0 \times \left( e^{\frac{V}{m \times V_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

em que:

- $I_0$  – corrente inversa máxima de saturação do díodo;
- $V$  – tensão aos terminais da célula;
- $m$  – factor de idealidade do díodo (díodo ideal:  $m=1$ ; díodo real:  $m>1$ ); para um módulo constituído por  $N_s$  células em série,  $m \geq N_s$ ;
- $V_T$  – designado por potencial térmico

$$V_T = \frac{k \times T}{q}$$

Com:

- $k$ : constante de Boltzmann ( $1,3806 \times 10^{-23}$  J/K);
- $T$ : temperatura absoluta da célula em K
- $q$ : carga eléctrica do electrão ( $1,6022 \times 10^{-19}$  C).

Pelo desenvolvimento das expressões anteriores e utilizando a expressão 1 como base, fica então :

$$I = I_s - I_D = I_s - I_0 \left( e^{\frac{V + R_s \times I}{m \times V_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

Esta expressão define as características I-V para este modelo de quatro-parâmetros. Note-se que a corrente inversa máxima de saturação do díodo pode ser escrita em termos de características do material e temperatura:

$$I_0 = D \times T^3 \times e^{\left( \frac{-q \times \varepsilon}{A \times k \times T} \right)} \quad (4)$$

A constante  $A$  corresponde ao quociente de  $m$  pelo número de células integradas em série no módulo,  $N_s$ :

$$A = \frac{m}{N_s} \quad (5)$$

$D$  é uma constante e  $\varepsilon$  é a energia (barreira de potencial) do semiconductor, 1,12 eV para o silício. Dois dos parâmetros do modelo,  $R_s$  e  $m$ , são considerados como constantes. O parâmetro  $A$  tem o valor 1, porque considerámos o díodo ideal. Porém, os outros dois parâmetros são função das condições operacionais do sistema FV.  $I_0$  altera-se com a temperatura ( $T$ ) e  $I_s$  é função da radiação incidente ( $G$ ).

Face a valores de referência, com temperatura  $T = 298$  K e radiação  $G = 1000$  W/m<sup>2</sup>,  $I_0$  e  $I_s$  são determinados como se segue:

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \quad (6)$$

$$I_s = I_{s,ref} \times \frac{G}{G_{ref}} \quad (7)$$

As equações 6 e 7 podem ser usadas para caracterizar o comportamento corrente-tensão do modelo em qualquer condição de temperatura e radiação incidente, assumindo que os valores dos quatro parâmetros  $I_{s,ref}$ ,  $I_{0,ref}$ ,  $m$  e  $R_s$  são conhecidos. Porém, estes não são facilmente medidos, e também não são fornecidos pelo fabricante. Então devem ser determinados de outra forma, podendo ser obtidos facilmente a partir de dados do fabricante.

Para tal recorre-se a um sistema de três equações, provenientes da expressão (3), que correspondem, respectivamente, ao circuito em vazio, à condição de curto-circuito e à potência máxima :

$$0 = I_{s,ref} - I_{0,ref} \times \left[ e^{\left( \frac{q \times V_{ca,ref}}{m \times k \times T_{ref}} \right)} - 1 \right] \quad (8)$$

$$I_{cc,ref} = I_{s,ref} - I_{0,ref} \times \left[ e^{\left( \frac{q \times I_{cc,ref} \times R_s}{m \times k \times T_{ref}} \right)} - 1 \right] \quad (9)$$

$$I_{max,ref} = I_{s,ref} - I_{0,ref} \times \left[ e^{\left( \frac{q \times (V_{max,ref} + I_{max,ref} \times R_s)}{m \times k \times T_{ref}} \right)} - 1 \right] \quad (10)$$

A corrente inversa de saturação do díodo tem um valor muito reduzido, na ordem de  $10^{-5}$  ou  $10^{-6}$  A, pelo que minimiza o termo exponencial na equação (9). Assim

pode-se assumir seguramente que a corrente  $I_S$  iguala a corrente de curto-circuito :

$$I_{S,ref} \approx I_{cc,ref} \quad (11)$$

Através da equação (8), retira-se o valor de  $I_0$ . Com este valor e com  $I_S$  retirado da equação (11), substitui-se na equação (10) e retira-se o valor de  $R_S$ .

Os valores de  $I_S$ ,  $R_S$ ,  $I_0$  e  $m$  são características das células de cada módulo fotovoltaico e podem ser encontrados a partir das equações anteriores e de dados fornecidos pelo fabricante do módulo (tabela 3).

Tabela 3 – Características calculadas para o módulo

Resistência série	$R_S$	0,011 $\Omega$
Factor de idealidade do diodo ideal	$m$	1
Corrente fotovoltaica	$I_S$	4,75A
Corrente inversa de saturação do diodo	$I_0$	0,5087E <sup>-5</sup> A

### B. Comparação com os resultados experimentais

Tem interesse avaliar o desempenho do modelo apresentado, por comparação com os resultados experimentais. Na figura 3 apresentaram-se os resultados experimentais obtidos para as características I-V e P-V do conjunto de módulos ligados como se apresenta na figura 2, constituídos por células fotovoltaicas de silício monocristalino de alta eficiência. As condições de teste experimental estão indicadas na tabela 4.

Na simulação, a temperatura da célula é calculado através da expressão

$$\theta_c = \theta_a + \frac{G(NOCT - 20)}{800} \quad (12)$$

em que :

- $\theta_c$  – temperatura da célula (°C);
- $\theta_a$  – temperatura ambiente (°C);
- $G$  – radiação solar incidente (W/m<sup>2</sup>);
- $NOCT$  – temperatura normal de funcionamento da célula (*Nominal Operating Cell Temperature*); este valor é dado pelo fabricante e representa a temperatura atingida pela célula em condições normais de funcionamento, definidas como  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$  (temperatura ambiente) e  $G = 800 \text{ W/m}^2$  (radiação solar)

Tabela 4 – Condições de teste experimental e de simulação

	Teste prático (módulos)	Teste Prático (1 célula)	Simulação
$G \text{ (W/m}^2\text{)}$	650	650	650
$I_{cc} \text{ (A)}$	5,746	2,873	2,92
$V_{ca} \text{ (V)}$	79,34	0,55	0,547
<b>Temp (°C)</b>	27,5 (ambiente)	49,4 (célula)	49,4

O valor de  $I_0$  é calculado pela expressão 6. Pela expressão 7 é calculado o valor de  $I_S$  que é igual a  $I_{cc}$ . Obtém-se um valor superior ao apresentado no tabela 4,

mas devido às perdas no circuito o valor utilizado é o valor encontrado na prática.

Na figura 10 mostra-se os resultados experimentais e os resultados da simulação para a característica I-V.

Pode verificar-se que o modelo de quatro parâmetros, considerando o diodo ideal, conduz a uma aproximação dos resultados experimentais que se caracteriza por alguns desvios relativos. Na realidade o diodo nunca é ideal, pelo que a simulação com  $m=2$ , caracteriza um diodo real e com resultados que, em termos comparativos, melhoram substancialmente.

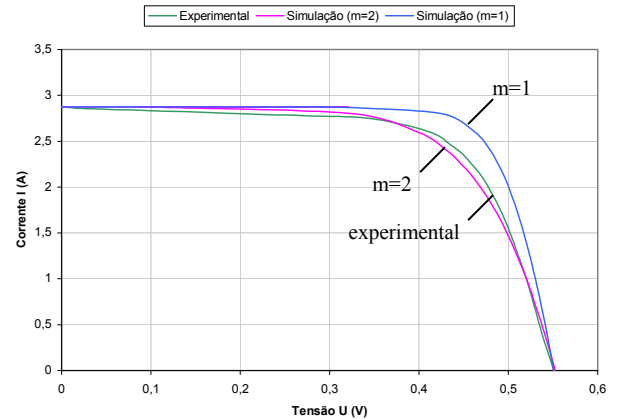


Figura 10 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica; comparação com resultados experimentais

### C. Influência da temperatura e da radiação

A validade do modelo de quatro parâmetros pode ser testada, analisando o seu comportamento com variações de temperatura e de radiação. Para o efeito, a corrente inversa de saturação pode ser traduzida em termos da temperatura, através da equação (4).

A corrente de curto-circuito é função da radiação incidente, podendo o seu valor ser calculado pela equação (7).

Os resultados da simulação da influência da temperatura e da radiação incidente na curva I-V da célula são representados, respectivamente, nas figuras (11) e (12).

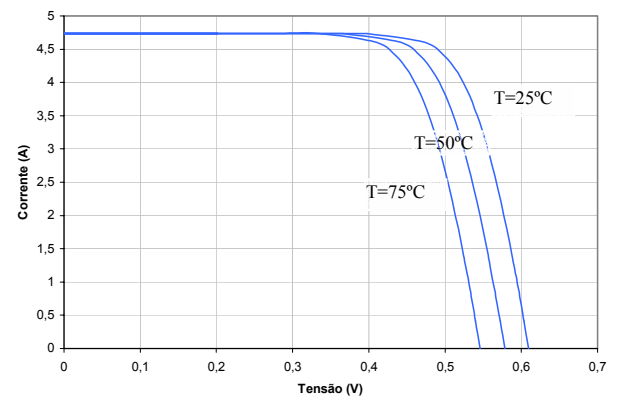


Figura 11 – Simulação da curva I-V com a variação da temperatura;  $G = G^r$

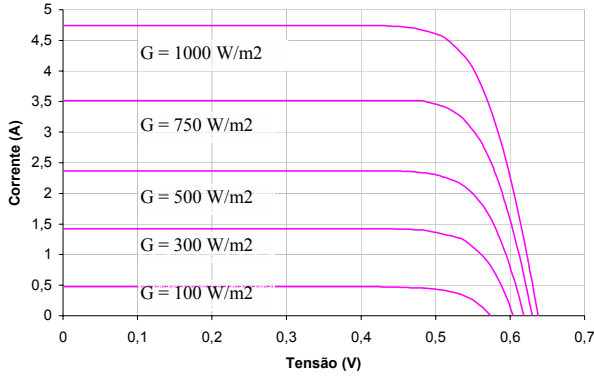


Figura 12 – Simulação da curva I-V com a variação da radiação incidente;  $T = T_r$

A observação destas figuras permite constatar o bom desempenho do modelo na reprodução das curvas I-V. É de comparar, respectivamente, com as figuras 6 e 4.

A partir das simulações realizadas pode-se calcular a variação da potência máxima com a temperatura e com a radiação incidente. Os resultados obtidos são apresentados, respectivamente, nas figuras 13 e 14.

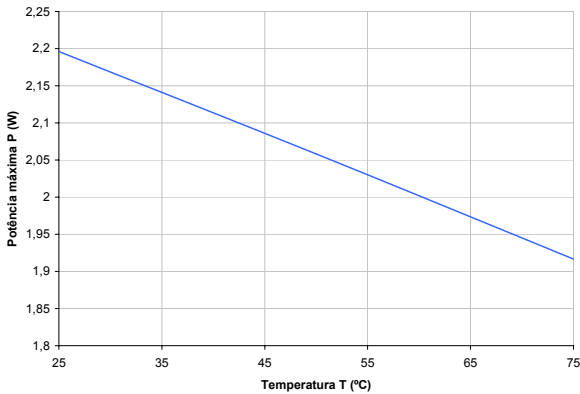


Figura 13 – Simulação da variação da potência máxima com a temperatura de uma célula;  $G = G^r$

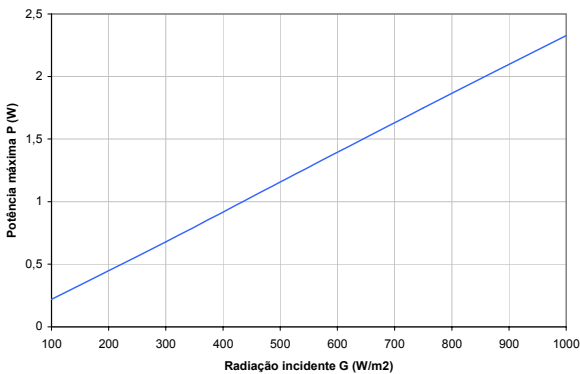


Figura 14 – Simulação da variação da potência máxima com a radiação incidente de uma célula; modelo de quatro parâmetros;  $T = T^r$

A principal conclusão é a acentuada dependência da potência máxima relativamente à radiação incidente, o que tem um impacto notório na energia produzida.

#### D. Modelo fotovoltaico – cinco parâmetros

O modelo de quatro parâmetros não é uma representação rigorosa da célula fotovoltaica. Nas células reais observa-se uma queda de tensão no circuito até aos contactos exteriores, a qual é representada por uma resistência série,  $R_S$ , que se inclui no modelo de quatro parâmetros.

Do mesmo modo, também existem correntes de fuga, que podem ser descritas por uma resistência em paralelo,  $R_P$ , e que está discriminada no modelo de cinco parâmetros que se apresenta na figura 15.

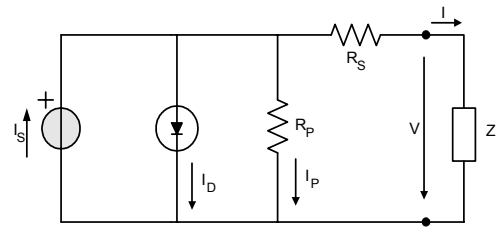


Figura 15 – Circuito eléctrico equivalente detalhado de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z; modelo de cinco parâmetros

A corrente  $I_P$  que circula através da resistência  $R_P$  é dada por:

$$I_P = \frac{V + R_S \times I}{R_P} \quad (16)$$

A corrente que circula pela carga é

$$I = I_S - I_D - I_P = I_S - I_0 \left( e^{\frac{V + R_S \times I}{m \times V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_S \times I}{R_P} \quad (17)$$

A equação (17) é uma equação transcendente, implícita em  $I$ , que sem os dados proporcionados pelo modelo de quatro parâmetros, teria que ser resolvida com recursos a métodos iterativos.

De acordo com o tipo da equação, que implica um sistema de equações não lineares, os métodos iterativos do ponto fixo e de Newton Generalizado são adequados para resolução do problema.

No modelo de quatro parâmetros são fornecidos alguns dados fundamentais para a resolução da equação. Esses dados estão representados na tabela 5.

Tabela 5 – Características do modelo de quatro parâmetros calculadas para uma célula fotovoltaica BP Solar® BP 2150 S

<b>m</b>	1
<b>V<sub>T</sub></b>	0,0257 V
<b>R<sub>S</sub></b>	0,011 Ω
<b>I<sub>S</sub></b>	4,75 A
<b>I<sub>max</sub></b>	4,45 A
<b>V<sub>max</sub></b>	0,47 V

Através da equação 17 e das grandezas apresentadas na tabela 5 podemos determinar o valor de  $R_p$ . O valor obtido foi  $R_p = 670 \Omega$ .

## 5. Conclusões

Partindo-se da abordagem de alguns aspectos físicos sobre a constituição de um sistema fotovoltaico, após a recolha de dados experimentais que permitem caracterizar o seu funcionamento, foram apresentados dois modelos fotovoltaicos. Por simulação, com base nestes modelos, obtiveram-se as respostas dos mesmos, as quais foram comparadas com os dados experimentais, por forma a testar a validade daqueles.

No modelo de quatro parâmetros, o desempenho é bastante aceitável, apresentando uma grande semelhança em relação aos valores obtidos experimentalmente.

O modelo de quatro parâmetros desenvolvido e implementado, consiste numa fonte de corrente, um diodo e uma única resistência. Todos estes componentes têm características e parâmetros não mensuráveis que não podem ser obtidos directamente do fabricante. Podem, porém, ser determinados analiticamente, a partir dos dados disponíveis e de algum formalismo matemático.

O modelo de cinco parâmetros é baseado num circuito equivalente igual ao modelo de quatro parâmetros, apenas com a introdução de uma resistência em paralelo. Se se desconhecem as características fornecidas pelo modelo de quatro parâmetros, o modelo de cinco parâmetros origina um sistema de equações não lineares que é resolvido através de métodos iterativos.

Alguns autores como Fry [3], consideram o modelo de quatro parâmetros como o modelo correcto para células de silício monocristalino e policristalino, como é o caso do módulo fotovoltaico a que se refere este estudo. Pelo contrário, para células de silício amorfo, o modelo de cinco parâmetros apresenta melhor desempenho.

## Referências

- [1] Andreev, V. M.; Grilikhes, V. A. e Romyantsev, V. D., “Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight”, Wiley, 1997.
- [2] Castro, Rui, “Introdução à Energia Fotovoltaica”, Energias Renováveis e Produção Descentralizada, DEEC / Secção de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2002.
- [3] B, Fry, “Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems”, University of Wisconsin – Madison, College of Engineering’s Solar Energy, Lab (SEL), Msc Thesis, 1998.
- [4] Asch, George, “Les Capteurs en Instrumentation Industrielle”, Dunod, Paris, 1998.