

Células solares “caseiras” (“Homemade” solar cells)

Reginaldo da Silva¹, Adenilson J. Chiquito, Marcelo G. de Souza e Rodrigo P. Macedo

Laboratório de Semicondutores, Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil
Recebido em 28/06/2004; Aceito em 22/09/2004

Usando alguns transistores de potência comerciais construímos uma bateria solar para uso como demonstração ou para o fornecimento de energia para pequenos projetos. Além disso, foi realizado um estudo destas células, medindo suas curvas características para diferentes fontes de luz.

Palavras-chave: energia solar, dispositivos de silício.

Using some power transistors, it was developed a solar battery which can be used in science demonstrations or as a power supply for simple experiments. We study also the characteristic curves of these cells using different light sources.

Keywords: solar energy, silicon devices.

1. Introdução

Muito tempo antes da atual e necessária procura por novas tecnologias de geração de energia, mais limpas, eficazes e de menor custo ambiental, as células solares já haviam mostrado sua potencialidade neste campo. Por volta de 1950, foi desenvolvida a primeira célula solar usando uma junção p-n de silício [1] e logo em seguida outros materiais semicondutores começaram a ser usados na produção de células. Inicialmente, foram usadas com um enorme sucesso no fornecimento de energia para satélites e veículos espaciais (décadas de 60 e 70), e em seguida em pequenas aplicações “terrestres”. Atualmente com a escassez de fontes renováveis de energia, as células solares vêm ganhando espaço devido a seu custo de produção ter diminuído graças às novas tecnologias de fabricação.

Do ponto de vista de funcionamento, uma célula solar é um fotodiodo com uma grande área que pode ser exposta à luz, seja solar ou não. Desta forma, qualquer diodo (junção p-n) cuja área ativa possa ser exposta à luz tornar-se-á uma célula solar! Obviamente, queremos dizer que o diodo irá se comportar como

uma célula solar mas não produzirá energia suficiente para uma aplicação comercial, como fonte de energia, embora seja de fácil utilização como equipamento didático em demonstrações práticas.

Alguns transistores comerciais fabricados em invólucros de metal (como o 2N3055) possuem uma pastilha de um material semicondutor (silício) relativamente grande e que pode ser usada diretamente como uma célula solar. Isto é possível porque um transistor basicamente possui duas junções p-n (o 2N3055 é do tipo n-p-n) as quais funcionam como diodos. Se expostas à luz, comportam-se como fotodiodos ou células solares.

Partindo desta idéia, realizamos uma série de experimentos com estas células solares que podemos chamar de caseiras, procurando entender de um modo geral, o funcionamento de tais fontes alternativas de energia. A seguir é apresentada uma descrição da teoria básica de uma junção p-n, importante para a compreensão de como é gerada a corrente em uma célula solar; em seguida, são descritos alguns experimentos que usam o transistor acima citado como fonte de energia.

¹Enviar correspondência para Reginaldo da Silva. E-mail: perna@polvo.ufscar.br.

2. As células solares

Uma célula solar convencional é geralmente composta de uma junção semicondutora p-n. Os materiais semicondutores, dopados ou não, são caracterizados por uma faixa de energia proibida ou *gap* de energia (E_g)². Na Fig. 1(a) temos a representação esquemática do perfil das bandas de energia em uma junção p-n [2]. Unindo dois semicondutores de mesma energia de *gap* mas com dopagem diferente (tipo p - excesso de cargas positivas, ou buracos e tipo n - excesso de cargas negativas, ou elétrons), surge um campo elétrico na região da interface como consequência do desequilíbrio de cargas de cada lado da junção. Alcançado o equilíbrio, as bandas de energia são curvadas como aparece na Fig. 1(a), dando origem a uma região conhecida como região de depleção, cuja principal característica é a falta de portadores de carga livres, elétrons ou buracos. A carga elétrica desta região é dada apenas pela carga das impurezas que foram ionizadas por ação do campo elétrico na região da interface.

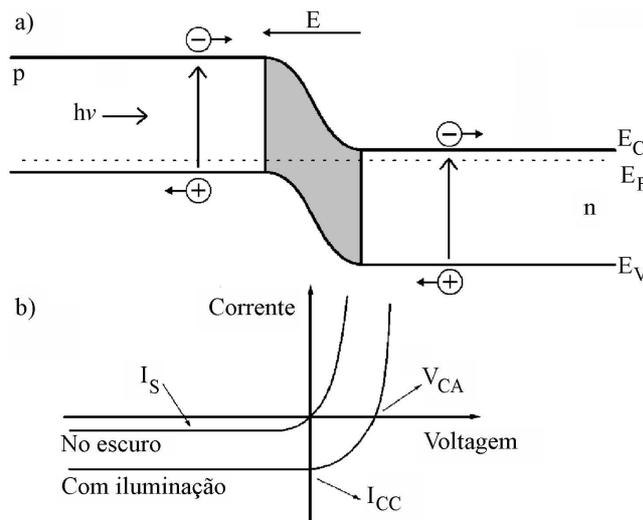


Figura 1 - (a) junção p-n, onde E_g representa o *gap* de energias proibidas, $E_{C,V}$ são o fundo da banda de condução e o topo da de valência, respectivamente e E representa o campo elétrico na junção; (b) corrente em uma junção p-n sem e com iluminação: I_S é a corrente de saturação e I_L é a corrente foto-gerada, I_{CC} é a corrente de curto circuito ($V = 0$), V_{CA} é a voltagem em circuito aberto ($I = 0$). A curva característica de uma célula solar sob iluminação permite determinar a potência máxima fornecida, a qual é representada pela área hachurada. I_m e V_m são as voltagem e corrente máximas que podem ser fornecidas para uma dada potência de iluminação.

Vamos agora discutir algumas características de

uma junção semicondutora como a da Fig. 1 e como são influenciadas pela luz. Como mencionado acima, uma célula solar ou um fotodiodo referem-se à mesma estrutura e se polarizados externamente, apresentam as características de corrente-voltagem de uma junção p-n, seguindo uma expressão simples, dada a seguir [3]:

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

onde I_S é a corrente de saturação, V é a polarização externa aplicada à junção e os outros símbolos têm seus significados usuais. A equação acima mostra qual é a corrente líquida na junção p-n (elétrons e buracos) se a ela aplicar-se uma polarização V .

Quando uma junção for iluminada por uma radiação (luz) de energia $h\nu$, elétrons da banda de valência podem ser excitados para a banda de condução, deixando um buraco (portador de carga positiva) na banda de valência. Este sistema é conhecido como par elétron-buraco. Quando a iluminação é retirada, ocorre a recombinação do par elétron-buraco, com os elétrons excitados retornando para a banda de valência. Para que este processo ocorra, somente uma radiação com energia $h\nu > E_g$ será efetivamente aproveitada: energias menores que a energia do *gap* não conseguem excitar elétrons da banda de valência para a de condução e como não existem estados eletrônicos entre as duas bandas de energia não haverá excitação. Para fixação de conceitos, o processo de conversão da radiação em corrente elétrica é baseado fundamentalmente na criação de pares elétron-buraco pela absorção dos fótons da radiação incidente.

Sob iluminação, buracos e elétrons que foram fotoexcitados no material podem deslocar-se até a região de depleção antes de se recombinarem, sendo acelerados pelo campo elétrico na interface (Fig. 1) de um para outro lado da junção, contribuindo com uma corrente I_L que terá o mesmo sentido da corrente de saturação I_S . Assim, levando em conta fotoexcitação, a corrente total será

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - I_L. \quad (2)$$

A corrente I_L está ligada a um propriedade chamada eficiência quântica que mede a “habilidade” do material usado em converter fótons em pares

²Dopagem refere-se ao processo de incorporação de impurezas na rede cristalina do semicondutor, fornecendo cargas elétricas adicionais úteis para o desenvolvimento de dispositivos. E_g é o intervalo de energia que separa as bandas de condução e de valência de um semicondutor. Neste intervalo não existem níveis de energia acessíveis aos portadores de carga, sejam elétrons ou buracos.

elétron-buraco e depende do comprimento de onda usado. A noção simples de que quanto maior for a intensidade da luz incidente na célula maior será a corrente produzida, esbarra no valor da eficiência quântica que é um fator limitante da corrente final produzida pela célula solar. Na seção seguinte iremos trabalhar com esta propriedade. Além disso, deve-se lembrar também que ao penetrar em um determinado material a radiação incidente pode excitar outros processos (espalhamento elásticos ou inelásticos com a rede cristalina, por exemplo) e ser absorvida. Tais processos também limitam a faixa de operação de uma célula solar (alteram também a eficiência quântica), mas não serão discutidos aqui. Para um tratamento mais geral ver a Ref. [3] e suas referências.

Como uma fonte de energia, precisamos determinar a potência total útil entregue pela célula solar a uma carga R_L , quando iluminada. A potência é escrita como o produto da voltagem pela corrente produzida pela célula, ou seja [3],

$$P = IV = VI_S \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - VI_L, \quad (3)$$

e a potência máxima [$P_m = I_m V_m$], com I_m e V_m indicados na Fig. 1(c), será obtida quando

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{V_m, I_m} = 0.$$

Assim, fazendo a derivada acima e resolvendo para $V = V_m$, obtemos

$$\frac{qV_m}{kT} = \ln \left[\frac{1 + \frac{I_L}{I_S}}{1 + \frac{qV_m}{kT}} \right]. \quad (4)$$

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (2), encontramos facilmente a corrente máxima I_m :

$$I_m = I_S \frac{qV_m}{kT} \exp\left(\frac{qV_m}{kT}\right), \quad (5)$$

e o produto $I_m V_m$ fica determinado. Para calcular o valor deste produto falta encontrar uma solução para a Eq. (4) a qual é uma equação transcendental e não admite soluções analíticas. Para isso, podemos inicialmente reescrever a Eq. (2) supondo que $I = 0$, ou seja, iremos determinar a voltagem em circuito aberto (V_{CA}) fornecida pela célula solar. Desta forma a Eq. (2) torna-se

$$0 = I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)_{V_{CA}} - 1 \right] - I_L,$$

ou

$$\exp\left(\frac{qV_{CA}}{kT}\right) = \frac{I_L}{I_S} + 1.$$

Substituindo na Eq. (4), obtemos:

$$V_m = V_{CA} - \frac{kT}{q} \ln \left[1 + \frac{qV_m}{kT} \right]. \quad (6)$$

A Eq. (6) continua sem solução analítica, mas permite uma estimativa do valor da voltagem máxima que pode ser fornecida pela célula solar. Com este parâmetro inicial podemos encontrar o valor de V_m numericamente, calcular I_m e determinar a potência máxima fornecida pela célula quando iluminada. É importante destacar que a aplicação de uma polarização externa como descrito acima serve para caracterização da célula solar como dispositivo eletrônico (esse modo de operação é conhecido como fotocondutivo e basicamente usado em fotodiodos). Após determinar as características e o funcionamento da célula, esta é normalmente operada no modo fotovoltaico, no qual os terminais da célula disponibilizam uma tensão e corrente úteis e dentro dos limites encontrados na caracterização.

3. Aquisição, preparação e caracterização das células solares

Como mencionado na Introdução, os transistores do tipo 2N3055 apresentam uma pastilha de silício que tem dimensões razoáveis para ser usada como uma célula solar de demonstração. Esta idéia não é nova, e o leitor interessado pode procurar, usando uma ferramenta de busca na Internet, outras informações e transistores que podem ser usados. Algumas publicações técnicas destinadas ao público em geral também têm repetidos artigos sobre este assunto (ver por exemplo, Eletrônica Total, Saber Eletrônica, entre muitas outras). Nossa intenção principal aqui é caracterizar este transistor como célula solar, tentando entender como se processa a conversão luz/corrente elétrica em uma junção semicondutora, e após isso, propor experimentos que possam ser usados até mesmo em salas de aula.

O transistor 2N3055 é facilmente encontrado no comércio de componentes eletrônicos a um custo médio de R\$ 5,00 ou mesmo em sucatas. Este tipo de transistor é muito usado em sistemas de potência de equipamentos de som e TV e também em sistemas de

regulagem de corrente/tensão. O aspecto deste componente e a identificação de sua pinagem estão na Fig. 2(a) e Fig. 2(b). A blindagem externa serve tanto para proteção mecânica da pastilha de silício como também evita a penetração de luz. Para usá-lo em nossas experiências, inicialmente retiramos a parte superior do transistor como mostra a Fig. 2(c). Note que ficam expostos a pastilha de silício e os contatos elétricos como mostrado em detalhe na mesma figura. Dependendo do fabricante do transistor, a pastilha vem coberta por uma resina plástica esbranquiçada (como em nosso caso) que limita a quantidade de luz que chega à junção. Esta resina pode ser retirada utilizando-se um solvente orgânico como o tetracloreto de carbono ou o tricloetileno. Entretanto dada a alta toxicidade destes dois solventes resolvemos manter a resina³.

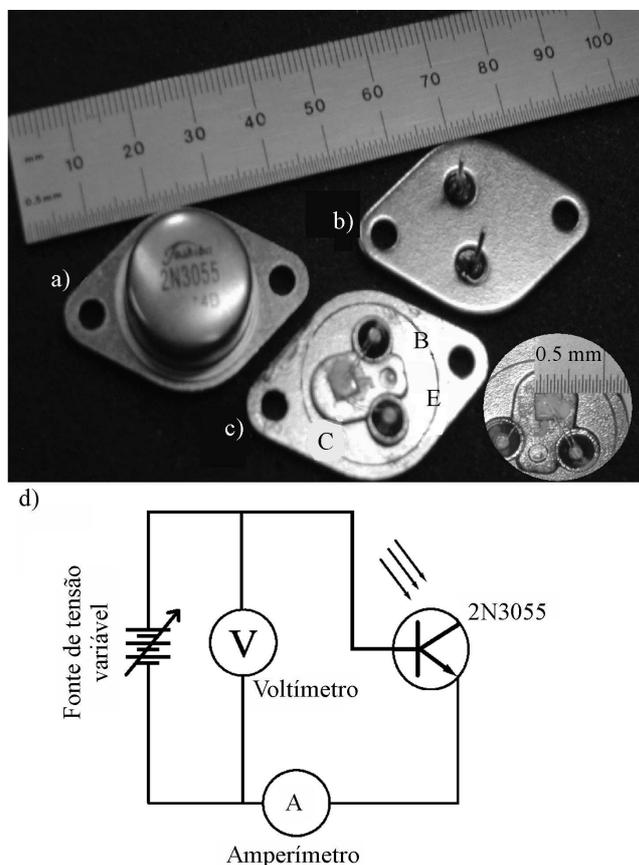


Figura 2 - (a) aspecto de um transistor de potência 2N3055 (topo); (b) mesmo transistor, agora visto por baixo; (c) sem o invólucro superior de proteção. Neste caso vê-se a pastilha de silício (colocada também no detalhe) e o contatos elétricos de base (B) e emissor (E). A terceira conexão elétrica (coletor, C) é feita no dissipador de calor sobre o qual está colada a pastilha; (d) esquema elétrico usado para a caracterização da célula solar.

³Usando os solventes indicados, retirou-se a resina de um transistor para comparar sua sensibilidade ao de outro, ainda com resina. Os dois transistores mostraram praticamente o mesmo comportamento, não justificando a retirada da resina.

Retirada a proteção, efetuamos as ligações elétricas no transistor. Usualmente, uma célula solar é construída com apenas uma junção p-n; logo, precisamos utilizar dois dos três terminais presente no transistor (lembre-se que o 2N3055 tem duas junções p-n) e desta forma, mesmo transistores “queimados” podem servir para nossas experiências, pois podemos aproveitar a junção que não esteja estragada. Com isso, temos uma célula solar caseira e como ilustrado na Fig. 2(d) montamos um circuito elétrico simples usado para a obtenção das curvas de corrente por voltagem sob diferentes condições de iluminação. Usando este circuito, foram levantadas curvas de corrente por voltagem para diferentes condições, como descrito a seguir.

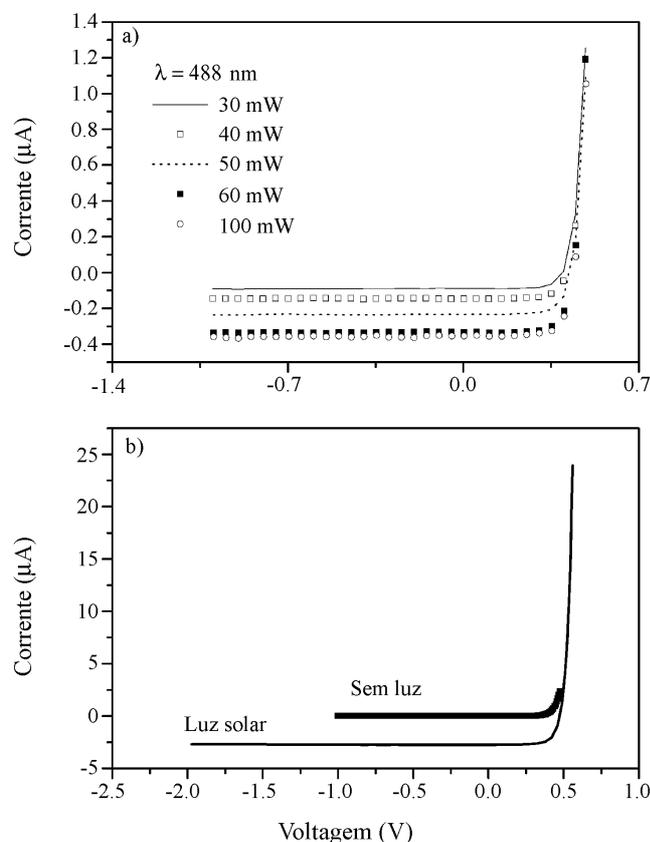


Figura 3 - (a) curvas de corrente por voltagem características da célula solar usada, quando sob iluminação (laser, $\lambda = 488$ nm) em várias potências; (b) resposta da célula solar quando iluminada com luz solar. Note que a corrente obtida é bastante maior que a obtida com a iluminação pelo laser.

Na Fig. 3(a) apresentamos as curvas citadas acima usando como fonte de luz um laser de íons de Argônio com um comprimento de onda fixo em $\lambda = 488$ nm

mas com potência variável entre 30 mW e 100 mW⁴. Através da observação destas curvas podemos verificar o efeito produzido pela potência da luz incidente sobre a célula solar, fator não levado em conta *explicitamente* na Eq. (2). Aumentando a potência incidente sobre a área da célula houve um aumento expressivo da corrente. No entanto, o aumento da corrente mostrou uma tendência à saturação, ou seja, a corrente tende a um valor máximo em função da potência aplicada na célula. Este efeito fica bem evidente nas duas últimas curvas, obtidas para potências de 80 e 100 mW, as quais mostram um aumento relativo de corrente muito menor em comparação com as outras curvas. Este comportamento está basicamente ligado à natureza do sistema, e de maneira simples podemos entender o resultado observando a dependência da corrente fotogerada com o comprimento de onda da luz incidente, a chamada eficiência quântica e a área sob iluminação. A corrente I_L pode ser escrita em termos microscópicos como [4]

$$I_L = \frac{\eta q P_L \lambda}{hc}, \quad (7)$$

onde η é a eficiência quântica, q a carga eletrônica, P_L é a potência da luz incidente, λ é o comprimento de onda, h a constante de Planck e c a velocidade da luz. Para o material (silício) e o comprimento de onda usados, a eficiência quântica é relativamente baixa ou aproximadamente 20 % de conversão. Voltando à Eq. (7), dados η e λ , a corrente I_L irá depender da intensidade de luz incidente, como observado. Dessa forma, quanto maior a potência da luz incidente, maior seria a corrente fotogerada. Mas não foi isso o observado em nossos experimentos: lembrando que a área sob iluminação não se altera, aumentando a intensidade da luz aumentamos o número de fótons incidentes mas nem todos os fótons são aproveitados para a criação de pares elétron-buraco: a corrente observada satura.

Finalmente, para concluir a caracterização de nossa célula solar precisamos usá-la de fato, ou seja, como conversora de luz em corrente elétrica. Para isso a célula foi exposta à luz solar, com incidência normal e os experimentos foram realizados no dia 22 de abril de 2004 entre 12:00 e 12:30 horário oficial de Brasília. As curvas obtidas sem e com exposição ao Sol estão na Fig. 3(b). Usando a Eq. (6), obtivemos $V_m = 0.404$ V, visto que $V_{CA} = 0.473$ V [Fig. 3(b)]. Usando agora a Eq. (5), a corrente máxima encontrada

foi $I_m = 0.031$ A e portanto a potência máxima que nossa célula pode fornecer é $P_m = V_m I_m = 12$ mW. É interessante comparar as correntes máximas fornecidas pela célula para iluminação com o laser ($\lambda = 488$ nm, $P_L = 100$ mW) e com luz solar: esta última produziu uma corrente (I_L) cinco vezes maior que a proporcionada pelo laser. Lembrando que a eficiência quântica do silício aproxima-se de 80 % na região do infravermelho e que o Sol emite uma potência elevada de radiação nesta faixa de comprimento de onda, fica fácil entender a diferença.

4. Alguns experimentos com a célula - Geração de corrente e fotodetector

Com o intuito de mostrar possíveis aplicações destas células solares, buscamos usar fontes de luz do dia-a-dia para verificar a potência que as células poderiam disponibilizar. Na Fig. 4(a) apresentamos uma série de fontes de luz que foram usadas e as respectivas potências máximas fornecidas pela célula solar. Neste caso, como a maioria das fontes de luz são policromáticas e têm intensidades máximas muito diferentes, preocupamo-nos apenas em manter um parâmetro sob controle que foi a distância entre a célula e a fonte de luz. Ao optar por este procedimento fica algo difícil apresentar resultados quantitativos como os da seção anterior. Mas o intuito aqui é exatamente este: através de resultados qualitativos observar o funcionamento de uma célula solar.

Continuando com as experiências, tomemos como exemplo a fonte de luz “Sol”, da seção anterior: a célula conseguiu uma corrente máxima de 31 mW, o que é suficiente fazer girar um pequeno motor. Apesar disso, a corrente medida é bastante pequena para que a célula possa ser utilizada como fonte de alimentação em dispositivos eletrônicos; por outro lado, sendo basicamente uma bateria, nada nos impede de conectar vários transistores em série (para aumentar a voltagem) e em paralelo (para aumentar a corrente) para assim conseguirmos uma bateria solar. Ligando seis células numa configuração onde três conjuntos de duas células em série estão em paralelo, obtivemos $P_m \simeq 82$ mW para iluminação solar. Para pequenos projetos ou para demonstração do conceito de célula solar esta “bateria solar” é bastante útil.

⁴Estas energia e potência foram escolhidas em virtude do sistema disponível quando da realização do experimento. Obviamente a disponibilidade de outros valores seria de grande utilidade, mas o usado já é suficiente para explorar algumas das propriedades das células solares.

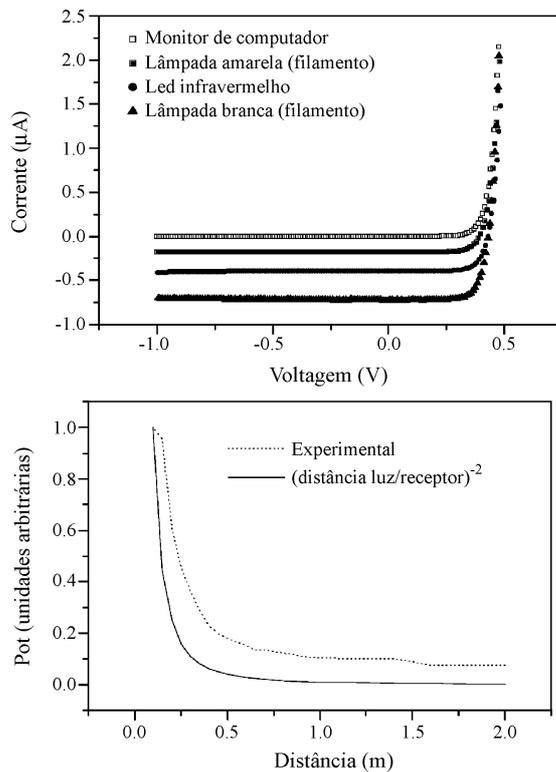


Figura 4 - (a) curvas de corrente por voltagem obtidas com diferentes fontes de iluminação; (b) dependência da potência luminosa com a distância da fonte de luz.

Outra característica interessante da nossa célula solar e talvez mais útil do ponto de vista de aplicação é a sua utilização como um detector de luz, já que para diferentes fontes utilizadas a célula apresentou correntes de resposta bastante diferentes e razoavelmente intensas para este fim. Como um exemplo, a célula solar construída pode servir para uma experiência bastante instrutiva, na qual podemos verificar que a potência de uma fonte luminosa decai com o inverso do quadrado da distância entre a fonte e ponto de observação [5], ou seja,

$$I \propto \frac{1}{d^2},$$

onde d é a distância entre fonte e ponto de observação. Na Fig. 4(b) estão os dados experimentais obtidos com nossa célula solar usada como detector. Usamos uma lâmpada incandescente comum (60 W) como fonte de luz e o experimento foi realizado em um ambiente escurecido. Note que os pontos experimentais seguem a tendência da curva teórica, representada na Fig. 4(b) como uma linha contínua. A não coincidência exata dos comportamentos teórico e experimental deve-se ao fato de que a lei do inverso do quadrado assume que a fonte de luz emite uniformemente em todas as direções, situação que pode não ser verdadeira para uma dada

fonte particular. Esta situação pode ser verificada experimentalmente usando-se um laser como fonte de luz.

Outro exemplo e que de fato foi um dos motivos que levou a este trabalho, foi a utilização deste transistor em nosso laboratório como um detector de luz para experimentos nos quais características elétricas de amostras semicondutoras estão sendo avaliadas em função da iluminação. A resposta fornecida por esta célula (tempo de resposta, intensidade de sinal e custo) deixou muitos outros detectores comerciais em clara desvantagem.

5. Conclusão

Neste trabalho, construímos uma célula solar “caseira”, utilizando um transistor de potência 2N3055, e observamos a resposta da célula quando submetida à diferentes iluminações, através de medidas de corrente por voltagem. Com isso, além de estudarmos o processo de conversão luz em corrente elétrica, pudemos também explorar experimentos simples utilizando a célula. É importante destacar que a pesquisa em células solares como uma fonte de energia mais limpa e inesgotável (pelo menos nos próximos bilhões de anos) deve ser incentivada em todo o planeta, principalmente em países tropicais como o nosso. Aliás, como disse Carl Sagan [6], “a vida na Terra ocorre quase que exclusivamente à luz solar. Os vegetais reúnem os fótons e convertem a energia solar em química. Os animais parasitam as plantas. A agricultura é simplesmente a colheita metódica da luz solar, utilizando plantas como intermediários forçados. Nós somos, quase todos, movidos a energia solar.” Porque não aplicar esta última idéia em todas as nossas atividades?

Referências

- [1] D.M. Chapin, C.S. Fuller, and G.L. Person, *J. Appl. Phys.* **25**, 676 (1954).
- [2] A.J. Chiquito, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **21**, 514 (1999).
- [3] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley and Sons, New York, 1981).
- [4] S.M. Rezende, *A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos* (Editora da UFPe, Recife, 1996).
- [5] D. Halliday e R. Resnick, *Física 4* (Livros Técnicos e Científicos LTDA, Rio de Janeiro, 1990).
- [6] Carl Sagan, *Cosmos* (Francisco Alves Editora S.A., Rio de Janeiro, 1992).