

Energia renovável: os fundamentos da energia solar

Renewable energy: the fundamentals of solar energy

Elizabeth Soares Vieira

Instituto Federal do Maranhão, Laboratório de Pesquisa, Imperatriz – MA – Brasil

João Pedro Lemos Moraes

Instituto Federal do Maranhão, Laboratório de Pesquisa, Imperatriz – MA – Brasil

Fernando José Figueiredo Agostinho D'Abreu Mendes

Politécnico de Coimbra – ESTeSC – UCPCBL, Coimbra – Portugal.

Ana Angélica Mathias Macêdo

Instituto Federal do Maranhão, Laboratório de Pesquisa, Imperatriz – MA – Brasil

DOI: 10.47573/aya.5379.2.84.7

RESUMO

Dentre as tecnologias empregadas na geração distribuída proveniente de fontes renováveis, o uso da geração solar tem crescido consideravelmente nos sistemas de geração de energia elétrica em todo o mundo. A energia solar apresenta um forte potencial como fonte energética por diversas razões, a principal pelo alto valor de irradiância solar incidente na Terra. O princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica consiste na conversão direta da luz solar incidente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Entretanto, a energia solar apresenta alto custo em comparação a métodos convencionais de geração de eletricidade, limitando o uso em larga escala. Considerando os benefícios da energia solar, é necessário expandir a acessibilidade e eficiência, e o desenvolvimento de novas tecnologias na área fotovoltaica requer, a princípio, uma análise do funcionamento e dos fundamentos do método de geração de energia elétrica. Neste sentido, apresenta-se as interações que permitem a geração e consumo da energia solar, compondo uma visão do uso da luz solar para a geração de energia elétrica por meio de células solares.

Palavras-chave: energia solar. eletricidade. energia renovável.

ABSTRACT

Among the technologies used in distributed generation from renewable sources, the use of solar generation has grown considerably in electric energy generation systems around the world. Solar energy presents a strong potential as an energy source for several reasons, the main one being the high solar irradiance value on Earth. The working principle of a photovoltaic cell consists in a direct conversion of incident solar light in electric energy via photovoltaic effect. However, solar energy still presents a high cost in comparison to conventional methods of electricity generation, limiting its use in large scale. Considering the benefits of solar energy, it's necessary to expand its accessibility and efficiency, and the development of new technologies in photovoltaics require, at first, an analysis of the fundamentals and working principles of this electric energy generation method. In this sense, the present paper presents, in detail, the interactions that allow the generation and consumption of solar energy, composing, at the end, an expanded vision on the usage of solar light to electric energy generation through solar cells.

Keywords: solar energy. electricity. renewable energy.

INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda energética mundial e o expressivo crescimento populacional, o uso de equipamentos que consomem energia elétrica aumentou drasticamente. Dada a natureza não renovável dos combustíveis fósseis, fez-se necessário a busca por fontes de energia sustentáveis para aumentar a capacidade energética (WU *et al.*, 2017). A energia solar apresenta um forte potencial como fonte de energia devido a irradiação solar anual sobre a Terra ser aproximadamente dez vezes maior que a energia total armazenada em combustíveis fósseis, sendo praticamente inesgotável e não poluente (PALZ, 2010).

A necessidade de explorar recursos renováveis que tragam flexibilidade e sustentabilida-

de para a geração de energia trouxe a energia solar para o centro das discussões e definições de política energética de diversos países desenvolvidos e emergentes, já que seu uso pode reduzir o consumo de combustíveis fósseis, as emissões de gases de efeito estufa, fomentar o desenvolvimento tecnológico, e contribuir com vetores da sustentabilidade ambiental, social e econômica (AHMADI *et al.*, 2018).

Entretanto, a energia solar possui alto custo em comparação aos métodos convencionais de produção de eletricidade, limitando o uso em larga escala (SETHI *et al.*, 2015), havendo necessidade de explorar os fundamentos para otimizar a eficiência.

Diante deste cenário, pretende-se abordar a energia solar a partir do princípio de funcionamento e dos fundamentos físico-químicos que a tornam possível.

FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR

Teoria das bandas

Devido à natureza dual da matéria, que se comporta simultaneamente como partícula e como onda a nível microscópico, não é possível determinar simultaneamente com exatidão a posição e o momento de partículas microscópicas. Entretanto, Erwin Schrödinger (1887 - 1961), após estudo matemático-estatístico, afirmou que há regiões do espaço que circunda o núcleo, denominadas orbitais, nas quais há uma maior probabilidade de se encontrar um elétron, levando ao surgimento do conceito de níveis e subníveis (BROWN, 2009).

Os elétrons tendem a ocupar posições de menor energia. A distribuição eletrônica se dá de forma crescente com base nos subníveis das camadas eletrônicas do átomo, conforme o diagrama de Linus Pauling (Figura 1).

Figura 1- Diagrama de Linus Pauling. Fonte: Autoral.

Camadas		Nível	Número máximo de elétrons por nível	Subníveis
K	1s ²	1	2	s
L	2s ² 2p ⁶	2	8	p d
M	3s ² 3p ⁶ 3d ¹⁰	3	18	f
N	4s ² 4p ⁶ 4d ¹⁰ 4f ¹⁴	4	32	
O	5s ² 5p ⁶ 5d ¹⁰ 5f ¹⁴	5	32	
P	6s ² 6p ⁶ 6d ¹⁰	6	18	
Q	7s ²	7	2	

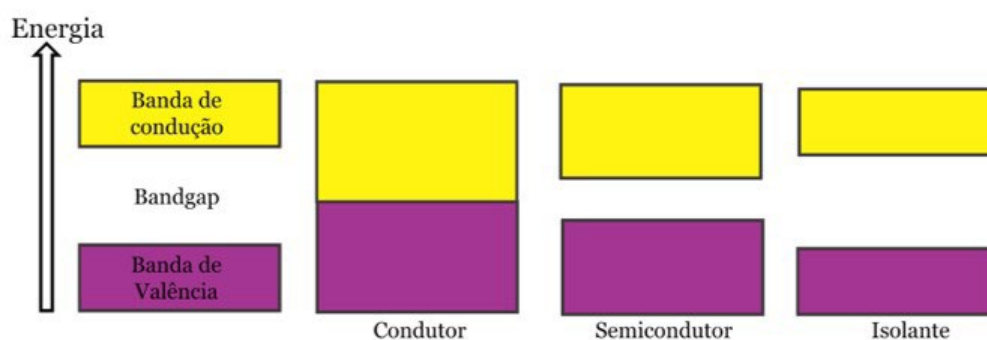
Independente do material, os elétrons ficam restritos aos orbitais no processo de união dos átomos e subsequente formação de moléculas. E, conforme o princípio da exclusão de Pauli, um orbital pode comportar até dois elétrons com spins contrários (isto é, momento angular intrínseco com sinais opostos), pois o spin dos elétrons gera um campo magnético que se opõe à repulsão eletrostática gerada por suas cargas elétricas (BROWN, 2009).

Em substâncias cristalinas (nas quais os átomos estão arranados de forma regular e

estruturada), os elétrons tendem a ocupar os menores níveis de energia, localizados próximos ao núcleo atômico (PETRUCCI, 2017). Quanto maior a distância do elétron ao núcleo atômico, maior o nível de energia. O orbital de energia mais baixa vazio é denominado LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*), enquanto o orbital de energia mais alto ocupado é denominado HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) (HAGBERG *et al.*, 2007).

No processo de união das moléculas para a formação da estrutura cristalina de um semiconductor, há sobreposição dos níveis de energia, gerando bandas de energia (Figura 2). Tais bandas se dividem em: banda de valência (BV), que contém a faixa de elétrons presos às ligações covalentes entre os átomos; a banda de condução (BC), que corresponde a faixa de elétrons de valência com livre movimento após o rompimento da ligação covalente; e o gap de energia (do inglês *bandgap*), conhecida como banda proibida e definida como a região que um elétron precisa saltar para transitar entre as bandas de valência e a de condução, pois ela não permite a presença de elétrons (BACCARO; GUTZ, 2018).

Figura 2 - Bandas de energia. Fonte: Autoral.



Os condutores apresentam uma banda de valência preenchida e uma banda de condução vazia. Por não haver um intervalo entre BV e BC, os materiais condutores facilitam a condução elétrica entre os átomos, devido à pequena quantidade de energia necessária para liberar elétrons em sua estrutura (PHILLIPS, 2012). Já os isolantes apresentam um *bandgap* largo, visto que os elétrons estão bem próximos do núcleo e presos em seus orbitais por uma ligação covalente que dificulta sua liberação para a banda de condução, exigindo o fornecimento de uma grande quantidade de energia capaz de fazê-los saltar a *bandgap* e chegar à banda de condução (BACCARO, GUTZ, 2018).

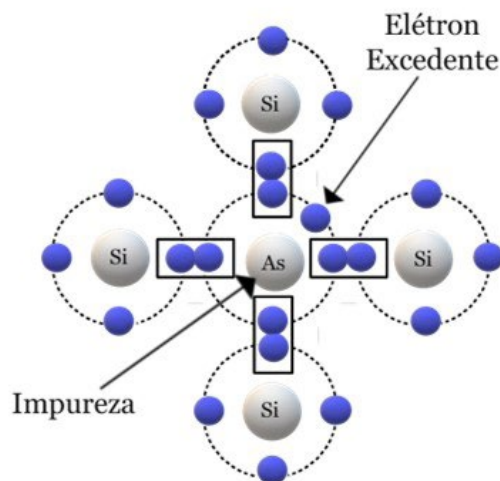
Nos semicondutores, há uma banda de valência completamente preenchida, uma banda de condução vazia e um gap entre elas. No entanto, esse *gap* é bem menor que nos isolantes. Desse modo, os semicondutores agem como isolantes em baixas temperaturas, pois os elétrons não possuem energia suficiente para se transportarem para a BC. Porém, em temperaturas mais altas, alguns elétrons obtêm energia suficiente para transpor a *bandgap* e chegar à banda de condução (LIU *et al.*, 2016).

Para que um elétron semiconductor saia da camada de valência, ultrapasse a *bandgap* e alcance a banda de condução, ele precisa absorver energia por meio de fótons. A quantidade de elétrons livres presentes na banda de condução deve ser igual a quantidade de vacâncias na banda de valência (CHAVES, 2001). Como o gap não permite a presença de elétrons, os fótons devem apresentar energia igual ou superior a ela para que os elétrons da banda de valência possam absorvê-los. Ao absorverem o fóton, os elétrons do semiconductor mudam de nível de energia, ganhando liberdade de locomoção na estrutura do semiconductor.

Quando um elétron absorve um fóton com energia suficiente e vai para a banda de condução, forma-se um par elétron-buraco entre o átomo doador e o átomo receptor. Materiais semicondutores intrínsecos, como o silício (Si), não são bons condutores devido à ausência de elétrons livres. Todavia, a adição de átomos de elementos diferentes do elemento principal do material semiconductor – denominada dopagem – permite aumentar sua condutividade. Os dopantes, adicionados como impurezas, alteram a condutividade do material por meio da alteração do nível de Fermi, que corresponde ao nível eletrônico mais alto que pode ser alcançado espontaneamente por um elétron da banda de valência com 50% de probabilidade na temperatura de 0 K, localizado no centro da bandgap em materiais semicondutores (LUKASIAK; JAKUBOWSKI, 2010).

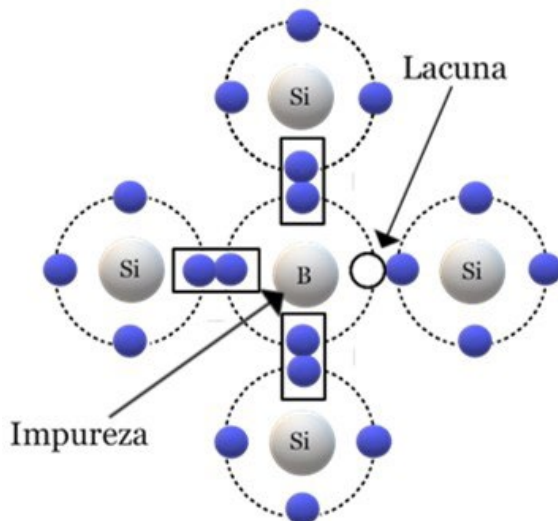
Um dos métodos de dopagem envolve a adição de elementos com cinco elétrons na camada de valência, gerando quatro ligações covalentes e resultando em um elétron dissociado fracamente ligado ao átomo, o qual pode se locomover até a banda de condução. Esta dopagem é tipo n, onde átomo pentavalente é denominado doador, por ceder um elétron para a banda de condução, resultando no aumento da quantidade de elétrons de valência (Figura 3).

Figura 3 - Dopagem tipo n com um átomo de impureza de arsênio (As). Fonte: Autoral.



Já a dopagem do tipo p é feita com elementos trivalentes (três elétrons na camada de valência), os quais formam três ligações covalentes com o elemento principal do semiconductor, resultando em uma lacuna causada pela ausência de um quarto elétron (Figura 4).

Figura 4 - Dopagem tipo p com um átomo de impureza de Boro (B). Fonte: Autoral.

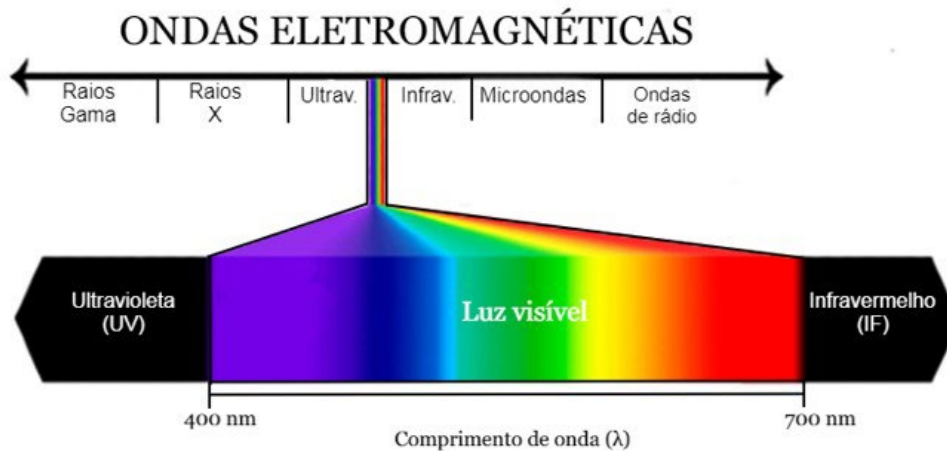


Nesta dopagem, o átomo trivalente é denominado receptor, pois recebe um elétron da banda de condução para preencher a lacuna. Enquanto na banda de condução, há aumento dos portadores negativos, na banda de valência há aumento da quantidade de lacunas, que se comportam como portadores positivos (WANG *et al.*, 2012).

Efeito fotovoltaico

A conversão da energia luminosa em energia elétrica de células fotovoltaicas em semicondutores é feita por meio do efeito fotovoltaico (YANG; KIM; ALEXE, 2018), que consiste na geração de uma corrente elétrica em um semicondutor quando exposto a luz (fótons) (FURCHI *et al.*, 2014). Tais fótons podem apresentar diversos valores de energia, correspondentes aos diversos comprimentos de onda do espectro solar (Figura 5).

Figura 5 - Espectro de radiação eletromagnético. Fonte: Autoral.



As células fotovoltaicas de silício são formadas pela junção de dois materiais semicondutores com dopagens p e n (junção p-n), nas quais os níveis de Fermi se igualam, gerando uma barreira de potencial entre o semicondutor com dopagem tipo n e com dopagem tipo p (FONASH, 2012). Diante disso, a saída de um elétron da banda de condução do lado n para banda de valência do lado p requer a inserção de uma energia adicional.

O efeito fotovoltaico é gerado conforme fótons atingem a célula fotovoltaica e são absorvidos internamente pelos elétrons, gerando pares elétron-buracos. Neste processo, a barreira de potencial impede a união entre elétron e buraco, transportando-os em direções opostas na célula.

Quando se conecta uma carga elétrica entre os dois terminais da célula, ocorre a movimentação dos elétrons ao longo do circuito formado, originando uma corrente elétrica (SHARMA, 2015). Em síntese, quando há incidência de luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons com energia menor que a energia do bandgap não são absorvidos pelos elétrons no dispositivo fotovoltaico, enquanto os que possuem energia igual ou superior são absorvidos e geram corrente elétrica.

Cada elétron livre deixa um buraco no seu lugar, que se comporta como um portador de carga positiva e possui liberdade de locomoção na estrutura do cristal (SZE *et al.*, 2001). O campo elétrico resultante da junção p-n transporta os elétrons para o lado n e os buracos para o lado p. Ao ligar os terminais da célula a um circuito externo, o efeito fotovoltaico gera uma corrente elétrica capaz de fornecer energia elétrica.

Efeito fotoeletroquímico

O efeito fotoeletroquímico se baseia na habilidade de materiais absorverem fótons e desencadear processos químicos em interfaces por meio da excitação eletrônica subsequente. Neste efeito, a energia solar atua como a força eletromotriz agindo no intuito de promover reações eletroquímicas (SIVULA; VAN DE KROL, 2016).

Este processo funciona de forma análoga a uma pilha fornecendo energia a partir das descargas elétricas de seus reagentes químicos. Em células solares sensibilizadas por corante, os sensibilizadores adsorvidos sobre a superfície de um semicondutor absorvem luz, gerando elétrons excitados que são transferidos para o semicondutor (GRATZEL, 2011).

Em suma, no processo de conversão de energia, a luz incidente absorvida pelo sensibilizador promove elétrons do nível de mais baixa energia para o mais alto e os elétrons são transferidos para a banda de condução do semicondutor, nos quais se movem em direção a um eletrodo coletor, onde são utilizados para gerar energia elétrica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde a descoberta da possibilidade de geração de energia elétrica através da energia solar, diversas tecnologias foram desenvolvidas com o intuito de aumentar a escala e a eficiência desse método de geração de energia. O aumento do consumo de energia elétrica e dos problemas ambientais causados principalmente pela queima de combustíveis fósseis implica em uma maior necessidade de inserir fontes renováveis de energia na matriz energética mundial

Deste modo, a conversão de energia solar em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas, tornou-se uma alternativa promissora. Ao analisar o funcionamento e os fundamentos desse método de geração é possível observar que, aumentando a acessibilidade, a tecnologia pode compor grande parte da matriz energética, de forma sustentável.

REFERÊNCIAS

- AHMADI, M. H.; GHAZVINI, M.; SADEGHZADEH, M.; ALHUYI NAZARI, M., KUMAR, R., NAEIMI, A.; MING, T. Utilization of hybrid nanofluids in solar energy applications: a review. In: Nano-structures & nano-objects, v. 20, p. 100386, 2019.
- BACCARO, A. L. B.; GUTZ, I. G. R. Photoelectrocatalysis on semiconductors: from the fundamentals to its conformation at the nanoscale level. In: Química nova, v. 41, n. 3, p. 326-339, 2018.
- BROWN, T. L. Chemistry: the central science. Pearson Education, 2009.
- CHAVES, A. Física. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso, v. 4, 2001.
- FONASH, S. Solar cell device physics. Elsevier, 2012.
- FURCHI, M. M.; POSPISCHIL, A.; LIBISCH, F.; BURGDÖRFER, J.; MUELLER, T. Photovoltaic effect in an electrically tunable van der Waals heterojunction. In: Nano letters, v. 14, n. 8, p. 4785-4791, 2014.

- GHANN, W.; KANG, H.; SHEIKH, T.; YADAV, S.; CHAVEZ-GIL, T.; NESBITT, F.; UDDIN, J. Fabrication, optimization and characterization of natural dye sensitized solar cell. In: Scientific reports, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2017.
- GRÄTZEL, M. Photoelectrochemical cells. In: Materials for sustainable energy: a collection of peer-reviewed research and review articles from nature publishing group, p. 26-32, 2011.
- HAGBERG, D. P.; MARINADO, T.; KARLSSON, K. M.; NONOMURA, K.; QIN, P.; BOSCHLOO, G.; SUN, L. Tuning the HOMO and LUMO energy levels of organic chromophores for dye sensitized solar cells. In: The journal of organic chemistry, v. 72, n. 25, p. 9550-9556, 2007.
- LIU, Q.; ZHANG, X.; WAUGH, J. A.; DESSAU, D. S.; ZUNGER, A. Orbital mapping of energy bands and the truncated spin polarization in three-dimensional Rashba semiconductors. In: Physical review B, v. 94, n. 12, p. 125207, 2016.
- LUKASIAK, L.; JAKUBOWSKI, A. History of semiconductors. In: Journal of telecommunications and information technology, p. 3-9, 2010.
- PALZ, W. Power for the world: the emergence of electricity from the Sun. Pan Stanford Publishing, 2010.
- PETRUCCI, R. H. General chemistry: principles and modern applications. Pearson, 2017.
- PHILLIPS, J. Bonds and bands in semiconductors. Elsevier, 2012.
- SETHI, V. K.; PANDEY, Mukesh; SHUKLA, Priti. Cost Boundary in Silicon Solar Panel. In: International journal of chemical engineering and applications, v. 2, n. 5, p. 372, 2011.
- SHARMA, S., SIWACH, B., GHOSHAL, S. K., & MOHAN, D. Dye sensitized solar cells: from genesis to recent drifts. In: Renewable and sustainable energy reviews, v. 70, p. 529-537, 2017.
- SHARMA, B. L.; PUROHIT, R. K. Semiconductor heterojunctions. Elsevier, 2015.
- SIVULA, K.; VAN DE KROL, R. Semiconducting materials for photoelectrochemical energy conversion. In: Nature reviews materials, v. 1, n. 2, p. 1-16, 2016.
- WANG, J.; CHEN, X.; ZHU, B. F.; ZHANG, S. C. Topological p-n junction. In: Physical review B, v. 85, n. 23, p. 235131, 2012.
- WU, J.; LAN, Z.; LIN, J.; HUANG, M.; HUANG, Y.; FAN, L.; WEI, Y. Counter electrodes in dye-sensitized solar cells. In: Chemical society reviews, v. 46, n. 19, p. 5975-6023, 2017.
- YANG, M.; KIM, D. J.; ALEXE, M. Flexo-photovoltaic effect. In: Science, v. 360, n. 6391, p. 904-907, 2018.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPEMA.