

ESTUDO DIAGNÓSTICO DO ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO DA PRODUÇÃO DE CÉLULAS FOTOELÉTRICAS E DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM ESSA MATRIZ NO BRASIL.

**Ulderico José de Freitas Melo Filho
Victor Racy Abdalla**

IFG-GO/Campus Jataí/Bacharelado em Engenharia Elétrica – PIBIC, iaruru@gmail.com
IFG-GO/Campus Jataí/Coordenação de Licenciatura – PIBIC, vra2027@gmail.com

Resumo

Com a crescente demanda por energia elétrica e com a necessidade de se encontrar fontes de energia limpa observa-se um crescente esforço no desenvolvimento da tecnologia de produção de energia elétrica através de células fotovoltaicas. O presente artigo é uma breve introdução ao universo fotovoltaico orientado para estudantes e principalmente professores do ensino médio. Aborda-se o tema partindo da descoberta do efeito fotoelétrico para posteriormente definir alguns aspectos técnicos e históricos elementares da geração fotovoltaica.

Palavras-chave: Efeito fotoelétrico, matriz solar, célula fotovoltaica, Ensino Médio.

“Energia Solar”

Ao interrogar uma pessoa comum na rua a fim de preencher um questionário sobre o tema “Energia Solar” o que essa pessoa diria a respeito? Qual imagem viria à mente dele ao tocar no assunto? Se essa pessoa nunca nutriu interesse pelo tema, ela provavelmente diria que sabe pouco e, acredita-se ainda que ela pensasse que não haveria futuro para esse tipo de energia, talvez porque a tecnologia contemporânea não permita um bom aproveitamento do potencial solar. O papel da ciência é desmistificar, desconstruir o senso comum, e estabelecer uma rede viva de conhecimento e curiosidade. Quando alguém diz sobre algum tema sem a autoridade do conhecimento e da experiência ele está utilizando o senso comum. Portanto as respostas obtidas para o questionário fictício serão fundadas também no senso comum.

O que o senso comum diz sobre a energia solar? Que é uma fonte de energia renovável e limpa, que a tecnologia não é eficiente para o abastecimento de uma cidade, entre outras coisas. Lembrando que o senso comum muitas vezes pode se basear na própria ciência, mas sem o rigor científico. Ou melhor, ciência sem rigor científico é senso comum. Desse modo surge a vocação da ciência e a ideia geral deste trabalho que é justamente apresentar o mundo da energia solar fotovoltaica com rigor científico para pessoas que vivem fora do mundo científico ou com conhecimento científico incipiente.

Primeiramente deve-se diferenciar e definir energia solar. Energia solar é energia que vem do Sol enquanto luz. A luz pode se propagar como partícula ou onda, isso dependerá exclusivamente do referencial usado para análise, a princípio é preciso saber que a luz é uma onda eletromagnética, e também é composta de partículas chamadas fôtons ou quanta; essas partículas são blocos de energia encapsulados. Assim, chega-se a uma definição útil de luz para a energia solar: *Luz é energia encapsulada.*

A luz visível representa uma pequena parcela do espectro de radiação emitido pelo Sol, todo o espectro de radiação solar está relacionado a níveis de energia. Não há como prosseguir sem informações básicas a respeito da principal fonte de energia do sistema solar: o Sol.

O Sol é a estrela no centro do sistema solar, a Terra e outros corpos celestes (como planetas, asteroides, cometas e poeira) orbitam o Sol. Somente o Sol representa cerca de 99,8% da massa do sistema solar. Ele é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente com diâmetro de $1,39 \times 10^9$ metros, ou seja, o maior membro do sistema solar. Considerado um reator de fusão contínuo, sua energia é irradiada como radiação ultravioleta, infravermelha e luz visível. Sendo a maior parte de sua energia contida na região visível e infravermelha do espectro de radiação. A energia proveniente do Sol, em forma de luz, sustenta quase toda a vida na Terra por meio da fotossíntese e também controla o clima e o tempo na Terra.

Se a radiação solar contém energia e o Sol é fonte praticamente infinita de radiação, como é possível aproveitar a luz do Sol enquanto fonte inesgotável de energia? As respostas a essa pergunta definirão os rumos deste trabalho.

Há três tipos mais comuns de conversão da energia solar: térmica, termoelétrica e fotovoltaica. A conversão térmica é feita a partir da transformação da radiação solar diretamente para energia térmica, ou seja, a radiação solar é convertida diretamente em calor. Esse tipo de geração¹ é muito utilizado em residências para fazer o aquecimento da água. A conversão termoelétrica é feita concentrando a luz solar em um líquido que entra em ponto de ebulição, seu vapor é utilizado para acionar uma turbina que gera eletricidade. Já a conversão fotovoltaica é quando a luz solar é convertida diretamente em eletricidade pelo efeito fotovoltaico.

Os tipos mais comuns de conversão são a térmica e a fotovoltaica. O foco deste trabalho é a geração de energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico.

Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico, constatado experimentalmente no final do século XIX, representava uma incompatibilidade com a Teoria de Maxwell. A primeira observação relacionada com esse fenômeno foi feita por físico Alexander Stoletov em 1872 e esse fenômeno também seria observado por Heinrich Hertz em 1887. A incompatibilidade com a Teoria de Maxwell seria resolvida em 1905 por Albert Einstein a partir de investigações feitas por Philipp Von Lennard em 1902.

O fenômeno foi interpretado inicialmente dessa maneira:

“Quando radiações eletromagnéticas incidem em uma placa metálica, cargas elétricas podem absorver energia suficiente para escaparem dela: a esse fato se dá o nome de efeito fotoelétrico.”

Os resultados experimentais obtidos não podiam ser explicados pela Teoria Eletromagnética de Maxwell :

¹

Ao falar em geração de energia há um equívoco no uso desse vocabulário. Pode-se erroneamente pensar que a energia gerada surgiu do nada. Por isso deixa-se claro aqui, ao usar a palavra geração há uma referência direta à conversão. Pois quase nada é novo no universo, tudo está em movimento e em contínua transformação.

- As energias cinéticas dos fotoelétrons não dependem da intensidade da radiação incidente. Em contrapartida maior intensidade de radiação incidente produzirá maior quantidade de fotoelétrons.

- Por menor que seja a intensidade da radiação causadora do efeito fotoelétrico, o intervalo de tempo de espera para que elétrons sejam ejetados é totalmente desprezível.

- As energias cinéticas dos fotoelétrons dependem da frequência da radiação incidente. Quanto maior for essa frequência, maiores serão as energias cinéticas dos fotoelétrons.

- O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da radiação incidente estiver acima de certo valor mínimo, que depende do metal utilizado. Se isso não for respeitado, o efeito não ocorrerá, por mais intensa que seja a radiação.

Em 1905, Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico estendendo a Teoria de Planck às radiações eletromagnéticas, considerando que a energia dessas radiações também poderia ser quantizada. Desse modo uma radiação eletromagnética passou a ser tratada como um feixe de partículas, denominadas fôtons, se propagando.

Einstein supôs que a energia de um fóton é dada por:

$$E = h \cdot f$$

Em que h é a Constante de Planck e f é a frequência de radiação. A Constante de Planck tem o seguinte valor no S.I. :

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Quando uma radiação eletromagnética de frequência f incide em uma placa metálica, ocorrem colisões entre fôtons da radiação e elétrons do metal. Em cada uma dessas colisões, um fóton pode fornecer toda a sua energia ($h \cdot f$) a um único elétron. Absorvendo o fóton, o elétron será extraído se a energia $h \cdot f$, que depende da frequência da radiação, e não de sua intensidade, for suficiente. Caso contrário, o elétron permanecerá no metal.

No efeito fotoelétrico, parte da energia do fóton absorvido por um elétron é usada para livrá-lo dos cátions do metal na extração. A energia que resta é a energia cinética do fotoelétron.

A energia cinética do fotoelétron relaciona-se com a energia do fóton por meio da equação:

$$E = E_{Cmáx} + A$$

Onde E é a energia do fóton absorvido pelo elétron e A é uma característica do metal, denominada função trabalho. Essa grandeza significa a energia mínima necessária para extrair um elétron situado na superfície do metal. Se um elétron absorver um fóton com apenas essa energia A , ele sairá do metal, porém, com energia cinética igual a zero. Ao fóton de energia igual a A está associada uma frequência mínima, f_{min} tal que $A = h \cdot f_{min}$.

E $E_{Cmáx}$ é a energia cinética máxima dos fotoelétrons ($E_{Cmáx} = \frac{m \cdot v_{máx}^2}{2}$).

Matriz solar

A matriz solar é um sistema completo de extração de energia solar fotovoltaica. Uma matriz solar é composta pelos painéis fotovoltaicos (ou módulos) e pelos mecanismos de apoio (em inglês BoS – Balance of System). Os painéis são compostos por células fotovoltaicas. Os mecanismos de apoio podem ser compostos por: unidade de controle, inversores, baterias recarregáveis, estrutura mecânica, concentrador, cabeamento, fusíveis, haste de aterramento, entre outros conforme as exigências da instalação.

O concentrador é um jogo de lentes ajustáveis que concentra a luz solar diretamente sobre o painel aumentando assim a intensidade da luz e consequentemente a eficiência da célula e a energia gerada. Concentradores são muito utilizados em matrizes solares espaciais.

A unidade de controle é também conhecida como regulador de carga, ela controla as ligações entre os módulos, a bateria e o inversor, impedindo que a bateria descarregue totalmente em períodos longos sem insolação e de grande consumo ou mesmo em períodos de grande insolação e pequeno consumo a unidade de controle evita que a bateria se carregue em excesso, aumentando assim a sua vida útil.

As baterias utilizadas em um sistema fotovoltaico são baterias secundárias, ou seja, baterias que podem ser recarregadas. Entre os tipos mais comuns de baterias secundárias estão as baterias de Chumbo-Ácido e de Níquel-Cádmio. A função das baterias no sistema vai além de simplesmente armazenar a energia gerada pelos módulos, elas também são responsáveis por estabilizar a corrente e a tensão no momento de alimentar cargas elétricas, suprindo transitórios que possam ocorrer na geração, outra função é a de prover uma intensidade de corrente superior àquela que o módulo fotovoltaico pode entregar.

A necessidade de um inversor ligado ao painel ou à unidade de controle se dá, pois, como citado anteriormente, a energia é gerada pelo efeito fotovoltaico na forma de corrente contínua (DC – Direct Current), no cotidiano o funcionamento de diversos aparelhos e a própria transmissão de energia elétrica se dá por corrente alternada (AC – Alternate Current).

Em 1958 o satélite Vanguard da NASA foi lançado com uma matriz solar de apoio composta por silício. No espaço é muito comum a utilização de matrizes solares, pois se baseiam em fonte perpétua de energia e são de fácil manutenção. As matrizes solares utilizadas no espaço são construídas para obterem o máximo de eficiência na conversão de energia, portanto são investimentos caros demais ainda inacessíveis ao uso doméstico.

Células

O menor e, ao mesmo tempo, mais importante elemento de uma matriz solar é a célula fotovoltaica. As células são agrupadas para formarem os painéis. Se uma célula é responsável pela geração de uma corrente ou uma tensão, um painel com cem células gerará uma corrente cem vezes maior ou uma tensão cem vezes maior, dependendo do arranjo das células.

Como cada célula possui baixa tensão e corrente de saída se faz necessário o seu arranjo em um módulo. O tipo de arranjo utilizado dependerá da tensão ou da corrente de saída desejada. Ao arranjar as células em uma *associação em paralelo* a tensão do módulo será igual a tensão de uma célula individual, mas a corrente total de saída será igual à soma das correntes individuais de cada célula.

Ao arranjar as células em uma *associação em série* a corrente final do módulo será igual a corrente individual da célula mas a tensão total será igual ao resultado do somatório das tensões de cada célula utilizada no arranjo.

É interessante pensar que assim como as células obedecem à estas regras de arranjos, também os módulos deverão obedecer, uma vez verificada a compatibilidade do equipamento utilizado. Todas as células contêm elementos semicondutores em sua composição. As composições mais comuns de células fotovoltaicas são:

Si (silício):

c-Si – Silício Cristalino;

Filme-fino:

a-Si – Silício Amorfo;

Cu(InGa)Se₂ – Disseleneto de Cobre Índio Gálio;

CdTe – Telureto de Cádmio;

Filme-fino com concentrador:

GaAs – Gálio Arsênio;

GaInP – Gálio Índio Fósforo.

A célula mais popular e mais utilizada é a célula de Silício Cristalino (c-Si), ela se baseia no posicionamento regular dos átomos no espaço, formando assim uma rede perfeitamente periódica (cristal). Para chegar a esse tipo de perfeição estrutural o material utilizado exige níveis altos de pureza química, assim o processo de fabricação das células c-Si é caro, a formação dos cristais é lenta e no final do processo obtém-se uma célula com eficiência limitada. Outro ponto negativo das células de c-Si é a espessura, cada pastilha tem cerca de 300µm de espessura. Desse modo o elétron precisará fazer uma viagem mais longa entre bandas, precisando de mais energia para ser excitado e limitando ainda mais a eficiência desta célula.

Há dois tipos de células c-Si, a célula de Silício Monocristalino e a célula de Silício Policristalino. A produção de células de Silício Monocristalino é cara embora as células obtidas tenham eficiência maior do que as de Silício Policristalino. Uma alternativa barata às células c-Si é a célula de Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si), na qual os defeitos na estrutura imperfeita são compensados com átomos de hidrogênio. Seu processo de produção é muito mais barato e simples se comparado ao processo das células de c-Si. Outra vantagem é a possibilidade de fabricação de células com grandes áreas e o baixo consumo de energia na sua produção.

Porém as células de Silício Amorfo apresentam certas desvantagens, como a sua baixa eficiência de conversão e também a sujeição a um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo de sua vida útil.

As células ditas de filme fino podem ser depositadas diretamente em um substrato, tal como uma lâmina de vidro ou metal, barateando assim o seu custo frente às pastilhas de Silício. Apesar de baixo custo se comparada às células de Silício e a possibilidade de criação de células multijunção, que é a disposição das várias células de filme fino em pilha para obter maior eficiência, as células de Silício são mais comuns comercialmente. Isso se deve a imensos investimentos governamentais e industriais para o estudo das propriedades químicas e eletrônicas do silício para a criação de circuitos integrados complexos na década de 1960.

Há alguns fatores que afetam diretamente o desempenho de um módulo fotovoltaico, a saber: a intensidade luminosa e a temperatura das células. Com relação à intensidade luminosa sabe-se que a corrente gerada pelo módulo aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. Ou seja, na instalação e posicionamento dos módulos é fundamental determinar a melhor inclinação para cada região em função da latitude local e das características da demanda. Esse fator pode ser reparado com o uso de concentradores, mas ainda sim a eficiência de um módulo terrestre está sujeita à dias nublados.

O outro fator de fundamental importância e relevância no campo de pesquisas é a influência da temperatura das células na eficiência do módulo. O aumento de temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia, baixando desse modo os pontos de operação para a potência máxima gerada. A célula de Silício Amorfo apresenta menor influência da temperatura na potência de pico.

Histórico e Conjecturas:

Segundo Hegedus e Luque (2003, p. 12) estes são alguns dos eventos notáveis na história da energia solar:

- 1839 Becquerel (FR) descobriu o efeito foto-galvânico em eletrólitos líquidos.
- 1954 Primeiras células solares com 6% de eficiência: Si (Bell Lab, USA) Cu₂S/CdS (Air Force, USA).
 - 1958 O satélite Vanguard da NASA com matriz solar de apoio composta por Si.
 - 1960 Relação teórica entre diferença de banda (band gap), espectro incidente, temperatura, termodinâmica e eficiência.
 - 1963 Sharp Corp (JP) produz os primeiros módulos de silício comercial.
 - 1966 NASA Observatório Astronômico Orbital da NASA lançado com matriz de 1kW
 - 1970 Primeiras células solares compostas por heteroestruturas de GaAs por Alferov, Andreev et al. na antiga USSR.
 - 1972 Primeira conferência Fotovoltaica a incluir uma sessão sobre aplicações terrestres (IEEE).
 - 1973 Crise mundial do petróleo estimula muitas nações a considerarem as fontes de energia renovável incluindo a tecnologia fotovoltaica; a Conferência de Cherry Hill nos EUA (estabeleceu o potencial fotovoltaico e o legitimou para o fundo governamental de pesquisas); Primeira residência no mundo abastecida totalmente por energia solar (University of Delaware, USA) construída com módulos solares de Cu₂S (não o c-Si).
 - 1974 Projeto Sunshine iniciado no Japão para promover o crescimento da indústria e das aplicações da tecnologia fotovoltaica; Tyco (USA) cresce faixa de Silício com extensão de 2.5 cm, primeira alternativa às pastilhas de silício.
 - 1981 Matriz solar, com concentrador, de 350 kW instalada na Arábia Saudita.
 - 1986 Primeiro módulo comercial de filme fino, o a-Si G4000 da Arco Solar (USA).
 - 1987 Catorze carros abastecidos por energia solar completaram a corrida Desafio Mundial Solar de 3200km (Australia) com o ganhador tendo uma média de 70 kph.

- 1995 “1000 telhados” demonstração de projeto alemão para instalar fotovoltaicas em casa, o que desencadeou a favorável e atual legislação fotovoltaica na Alemanha, no Japão e outros países.
 - 1997 Produção mundial de energia solar alcança 100 MW por ano.
 - 1999 Instalações mundiais cumulativas alcançam 1000 MW.
 - 2000 Olimpíadas na Austrália ressaltam o amplo campo de aplicações fotovoltaicas, e o recebimento da primeira graduação de Bacharel de Engenharia em Engenharia Solar e Fotovoltaica(UNSW, Australia).
 - 2002 Instalações mundiais cumulativas alcançam 2000 MW. Levou 25 anos para alcançar os primeiros 1000MW e apenas 3 anos para dobrar; produção de células de Si cristalino excede 100MW por ano na Sharp Corp. (Japan). BP Solar cessa Pesquisa & Desenvolvimento e as produções de módulos de filme-fino de a-Si e CdTe encerrando >20 anos de esforço.

Principais Linhas de Pesquisa Desenvolvidas no Brasil

De acordo com Di Lascio (2011, p. 127) há treze instituições brasileiras em que suas pesquisas aplicadas são dirigidas para o aquecimento solar térmico e para a energia fotovoltaica. As linhas de pesquisa relacionadas à energia fotovoltaica e suas respectivas instituições são:

- Dispositivos Concentradores de Energia Solar: PUC/RN, UFC, UFPB e UFSC/Mecânica.
- Eletrificação Rural e Bombeamento d'Água com Sistemas Fotovoltaicos: HELIODINÂMICA, UEFS, UFPB, UFSC/Mecânica e USP/IEE.
- Energia Solar Fotovoltaica: HELIODINÂMICA, PUC/Minas, PUC/RN, UFPB, USP/IEE.
- Sistemas Fotovoltaicos Híbridos para Geração de Eletricidade: USP/IEE.
- Tecnologia de Células Fotovoltaicas: HELIODINÂMICA, PUC/RJ, PUC/RN, UNICAMP/Física e UNICAMP/Química.
- Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Energéticos Fotovoltaicos: HELIODINÂMICA, PUC/Minas, UFSC/Mecânica e USP/IEE

É notada a importância do conhecimento do efeito fotovoltaico para a história da humanidade. A mudança de mentalidade com a crise energética de 1973 desencadeou um processo de produção tecnológica baseada no efeito fotovoltaico. A opção por uma fonte de energia limpa e inesgotável é inteligente e promissora, mas por enquanto enfrenta um pequeno conflito entre eficiência e custo. Pode-se observar o barateamento dos custos e o aprimoramento da eficiência investigando os preços no decorrer da história dessa tecnologia. Essa situação conflitante entre preço e eficiência caracteriza-se um trade-off econômico.

A cada ano que passa fala-se cada vez mais na importância da diversificação da matriz energética; um sistema elétrico estável não pode depender apenas de um tipo de fonte de energia.

Em um país como o Brasil deve-se valorizar pequenas ideias como o uso de sistemas fotovoltaicos na alimentação de bombas d'água em regiões ermas onde não há rede elétrica, e na eletrificação rural ou mesmo na iluminação pública. O conhecimento adquirido no decorrer do desenvolvimento deste trabalho possibilitou pensar em questões importantes para o aprimoramento da tecnologia fotovoltaica como, por exemplo, o levantamento da quantidade de impostos embutidos na produção de células e módulos fotovoltaicos. Ao conhecer o preço real de tal tecnologia pode-se pensar em soluções para a redução de custos na produção dos dispositivos fotovoltaicos a partir de incentivos fiscais.

REFERÊNCIAS

BISCUOLA, Gualter José; NEWTON, Villas Bôas; HELOU, Ricardo Doca. **Física:** Vol. 3. 1^a ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

BRAGA, Rena Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica:** Fundamentos e Aplicações. 2008. 80 f.. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

COOLEY, William C. Solar Direct-Conversion Power Systems. **IRE Transactions On Military Electronics**, Washington DC, p.91-98, janeiro, 1962.

DI LASCIO, Marco Alfredo. **Quem é Quem em Energia:** competências e pesquisas desenvolvidas no Brasil. 1^a ed. Brasília: IBICT, 2011.

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física Quântica:** Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Tradução de Paulo Costa Ribeiro, Enio Frota da Silveira e Marta Feijó Barroso. 4^a edição. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1986.

GÓMEZ-GIL, Francis Javier; WANG, Xiaoting; BARNETT, Allen. Energy Production Of Photovoltaic Systems: Fixe, Tracking, And Concentrating. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], Vol. 16, p.306-313, 2012.

KITTEL, Charles. Introdução à Física do Estado Sólido. Tradução de Adir M. Luiz. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1978.

KLEIN, W. A.; LEHR, S. N. Reliability of Solar Arrays. **IRE Transactions On Reliability And Quality Control**, Los Angeles, California, p.71-80, outubro, 1962.

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. Status, Trends, Challenges and the Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. 1^a Ed. Great Britain, Wiley. 2003.

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. Status, Trends, Challenges and the Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. 2^a Ed. Great Britain, Wiley. 2011.

MARQUES, Derivan Dutra; BRITO, Alaen Ubaiara; CUNHA, Alan Cavalcanti da; SOUZA, Leandro Rodrigues de. Variação Da Radiação Solar No Estado Do Amapá: Estudo De Caso Em

Macapá, Pacuí, Serra Do Navio e Oiapoque No Período de 2006 a 2008. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], Vol. 27, nº2, p.127-138, 2012.

PENTEADO, Paulo Cesar M.; TORRES, Carlos Magno A. **Física – Ciência e Tecnologia**: Vol. 3. 1^a ed. São Paulo: Moderna, 2005.

PÉREZ, E. J.; DEL VALLE, J. L. Prospects For Photovoltaics In Latin America: The Mexican Case. **Solar Cells**, [S.L.], vol. 6, p.281-293, 1982.

SAMPAIO, José Luiz; CALÇADA, Caio Sérgio. **Universo da Física**: Vol. 3. 2^a ed. São Paulo: Atual, 2005.

SILVA, Djalma Nunes (Paraná). **Física**. 6^a ed. São Paulo: Ática, 2005.

SINGH, G. K. Solar Power Generation by PV (Photovoltaic) Technology: A Review. **Energy**., <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.057>, 2013.

TIWARI, G. N.; DUBEY, Swapnil. **Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Applications**. United Kingdom: Cambridge, RSC. 2010.

TORRES, Carlos Magno A.; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. **Física – Ciência e Tecnologia**: Vol. 3. 2^a ed. São Paulo: Moderna, 2010.

TYAGI, V.V; RAHIM, Nurul A. A.; RAHIM, N. A.; SELVARAJ, A.L. Jeyraj. **Progress In Solar PV Technology: Research And Achievement. Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], Vol. 20, p.443-461, 2013.

VÈRIÉ, Ch.; SALÈTES, A. The Present State And Future Prospects Of High Efficiency Photovoltaic Cells For Solar Power Systems. **Acta Astronautica**, Great Britain, Vol. 24, p.171-179,1991.

XAVIER, Claudio; BARRETO, Benigno. **Coleção Física Aula Por Aula**: Vol. 3. 1^a Ed. São Paulo: FTD, 2010.

YAMAMOTO, Kazuhito; FUKE, Luiz Felipe. **Física Para o Ensino Médio**: Vol. 3. 1^a Ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

YOUNG, Hugh D. **Física IV**: ótica e física moderna/ Young & Freedman; [colaborador A. Lewis Ford]. Tradução de Cláudia Martins; Rio de Janeiro: LTC, 2009.