

Terceira geração de células solares: uma abordagem sobre as frentes de pesquisa

de Souza e Silva, Felipe, Autor. Marchesan, Gustavo, Autor.

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 97105-900
BRA (Tel: (55) 3220-8000; e-mail: felipesilva@ieee.org, gutomarchesan@gmail.com).

Abstract: Exploring renewable energies sources has increasingly grown past last decades, considering the world exponential demands for electrical energy and the environmental body pressure for clean alternatives. Thus, solar cells, which converts energy proveniente from sun in electrical energy through photovoltaic effect has been getting attention. There is three solar cells generations, as explained in this article. However a special attention is given for the in third generation solar cells. A significant effort has been made to develop organic solar cells, which are already 300% more efficient than their predecessors, from importance of modern physics principals, especially quantum physics, applied to nanotechnology. Lastly, knowing national power generation low diversity and the demand for clean power, renewable, this work introduces the challenges of research in development of new materials, as well as how effective those efforts could transform solar cells industries, in global scales.

Resumo: A exploração de fontes de energias renováveis tem crescido muito nas ultimas décadas, dada a exponencial demanda mundial de energia elétrica e a pressão de órgãos ambientais por alternativas limpas. Dessa forma, células solares, que convertem energia proveniente do sol em energia elétrica através do efeito fotoelétrico tem chamado atenção. Existem três gerações de células solares, todas explicitadas ao decorrer do artigo. No entanto, esse trabalho foi baseado nas majoritárias frentes de pesquisa no que diz respeito à terceira geração de células fotovoltaicas, em que foi possível verificar desde avanços significativos para células orgânicas, sendo já 300% mais eficientes que seus predecessores, até a importância de principio da física moderna, em especial a quântica, aplicados à nanotecnologia. Por fim, haja vista a baixa diversificação da matriz energética nacional e a demanda por energias mais limpas, renováveis, esse trabalho introduz os desafios da pesquisa no desenvolvimento de novos materiais, bem como os efeitos que tais avanços causariam na indústria de células solares, em escalas globais.

Keywords: demands; solar cells; third generation; efforts; modern physics; materials.

Palavras-chaves: demanda; células solares; terceira geração; avanços; física moderna; materiais.

1. INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial, humanidade tem liberado mais de 1.5 trilhões toneladas de Dióxido de Carbono na atmosfera. Só no ano de 2019 foram 37 bilhões (Ritchie et al., 2017). Tais dados estatísticos pressionam grandes empresas a se conscientizarem, a buscar formas de energias renováveis. Não obstante, a disponibilidade de recursos energéticos e, em particular, a potencial escassez de óleo combustível no segundo quarto do século, seguida pela de gás natural em seguida, irá transformar o sistema. O Sol, por sua vez, dispõe enormes quantidades de energia, que em escalas de proporção, um terremoto com magnitude de 7.8 na escala Richter (estimado em liberar 10^{17} J de energia) seria repostos por 1s de atividade solar; A humanidade anualmente consome cerca de 4.6×10^{20} J, que é fornecido pelo sol em uma hora (Padmanabhan, 2008). A intersecção da necessidade energética, que se projeta dobrando para 2050 e triplicando para o fim do século, justaposta ao poderio solar, muito maior que qualquer outra forma de energia renovável ou não renovável, constituem um cenário propenso ao investimento e desenvolvimento tecnológico no setor de

energia solar, em um contexto que preza cada vez mais por alternativas limpas, simples, aplicáveis.

Atualmente, a exploração direta dessa forma de energia se dá através de sistemas fotovoltaicos (FV) – uma indústria de \$7.5 bilhões crescendo com taxas anuais de 30%-40%, com potencial de inserção em todo o globo (Lewis, 2005). As células FV dependem intimamente da absorção de luz solar, da consequente formação e separação espacial de elétrons e buracos, e de seu potencial elétrico. A eficiência com que os elétrons se arranjam determina a fotocorrente (relacionada à densidade de corrente de curto-circuito J_{cc}) e a diferença de energia entre os mesmos, a fototensão (ligada a tensão de circuito-aberto V_{ca}). O produto entre os dois resulta na energia elétrica gerada. Esse resultado, dividido por fatores como, taxa de irradiação (E_{solar}) e um fator de preenchimento (FP) determina a eficiência de conversão (EC) da célula FV (conceito estudado também por Yan et al. 2014).

$$EC = \frac{J_{cc} V_{ca} FP}{E_{solar}} \quad (1)$$

O conceito de dispersão dos elétrons, por sua vez, está intimamente associado com o conceito de entropia. Quanto mais significativa à desordem e maior a dispersão, maior a entropia (Valêra, 2008). Esse conceito é fundamental para situações mais precisas, em que adota-se o Limite de Landsberg, considerando também os fluxos de calor e de entropia associados ao conversor. Em condições laboratoriais, a eficiência de uma FV chega aos 93,3% (dado extraído de Green), próximo aos valores proposto por Carnot.

A figura 01 ilustra as quatro etapas consideradas no ciclo de Carnot para uma célula solar padrão. Embora a nova geração não se utilize do mesmo ciclo na determinação de perdas, algumas etapas ainda são similares e abordadas ao decorrer deste trabalho. A etapa 1 se faz presente em portadores quentes e a 4 em células tandem.

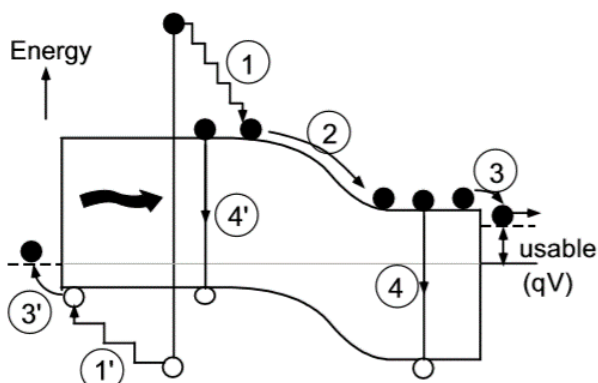


Figura 01. Processo de perda energética em célula solar padrão: (1) perda por termalização; (2) e (3) junção e contato por perda de tensão; (4) perda por recombinação – Fonte: Green (2020).

Por esse motivo, a busca de novas tecnologias visando atingir melhores eficiências, em sintonia com a redução de custos, tem aberto espaço para a terceira geração de sistemas FV. Ela é definida pelo IEEE como: Células que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar que as células baseadas em um único band-gap eletrônico. A terceira geração deve ser altamente eficiente, possuir baixo custo/watt e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade (Ely, 2014). De fato, os dispositivos têm como objetivo mitigar as perdas por não absorção de fótons com nível energético inferior ao nível do energético de células de única junção e as perdas devido a não compatibilidade dos parâmetros de rede, isto é, a não compatibilidade níveis energético como veremos em portadores quentes, ou até a incompatibilidade nos níveis de banda. Conibeer (2009) afirma que as duas melhorias juntas reduzem mais de 50% das perdas totais numa célula solar de junção simples.

Nesse trabalho será feita uma análise crítica-comparativa de alguns dos ramos de pesquisa e desenvolvimento de células solares na terceira geração, majoritariamente em escala laboratorial.

Na seção 2 há a diferenciação da terceira geração para com as antecessoras, definida sucintamente. A seção 3 introduz o cenário nacional atuando na área, bem como a definição de um cenário favorável a investimentos futuros.

2. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE TERCEIRA GERAÇÃO

A primeira geração de células FV dominou a produção comercial, com cerca de 89,7% dos painéis fotovoltaicos presentes no mercado na década passada (Padmanabhan, 2008). A construção destas células é baseada em uma junção p-n simples de silício, em um painel coletor montado numa estrutura metálica e apresentam rendimentos de conversão que rondam os 20%. São os painéis utilizados na geração fotovoltaica residencial. A segunda geração, por sua vez, tem consigo o desenvolvimento dos filmes finos angariados. São utilizados materiais que abrangem do Silício microcristalino (μ Si) ao Telúrio de Cádmio (CdTe). Esta tecnologia se difere da antecessora pela diminuição do peso do produto final, e como consequência os custos inerentes ao suporte de toda estrutura. Ainda assim a tecnologia de filmes finos tarda a impor-se no mercado muito por causa do rendimento de conversão ser muito baixo. Já a terceira geração está ligada a Nanotecnologia, a Células Orgânicas (CO), e a Células de Portadores Quentes (CPQ). Os materiais de utilização são considerados não tóxicos e abundantes, permitindo a produção em larga escala. A figura 02 apresenta uma tabela de alguns materiais na relação custo por potencial de geração de energia.

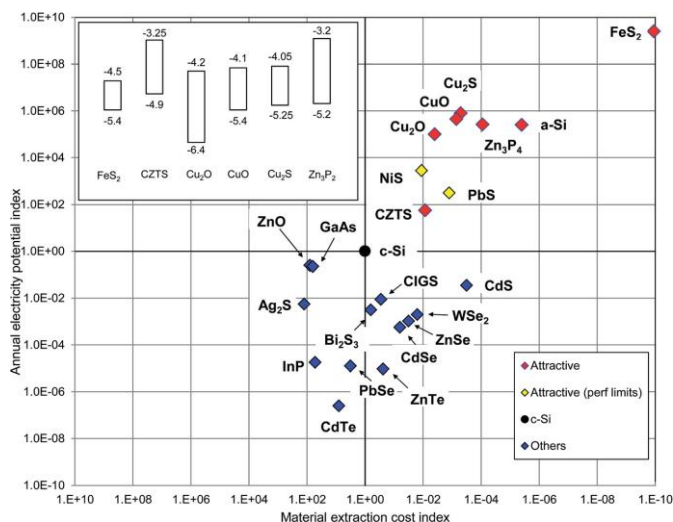


Figura 02. Relação do custo padrão de extração de alguns materiais da terceira geração em relação ao seu potencial de geração de energia – Fonte: Yan & Saunders (2014).

Note que alguns materiais de pesquisa, como o FeS₂ e o CuO, possuem potenciais muito mais elevados em relação ao Si cristalino (c-Si), altamente explorado nas outras gerações.

Essas células se baseiam em uma única banda eletrônica, possuem potencial de ultrapassar o limite de Shockley-Queisser (determinado na pesquisa de Shockley et al. 1961), que designa à máxima eficiência teórica de uma célula fotovoltaica baseada numa união p-n, normalmente em torno dos 31-41%.

Na figura 3 é apresentado um comparativo da eficiência das células fotovoltaicas com relação a sua geração. Observa-se que o coeficiente angular, isto é, a tendência no aumento da eficiência na terceira geração é

muito mais promissora que o da primeira geração. Tal fator se deve a uma vasta gama de materiais orgânicos que podem ser explorados, muito deles a baixo custo, e por conta da inserção da física quântica nos estudos, que permite a aplicação de novas propriedades dos materiais.

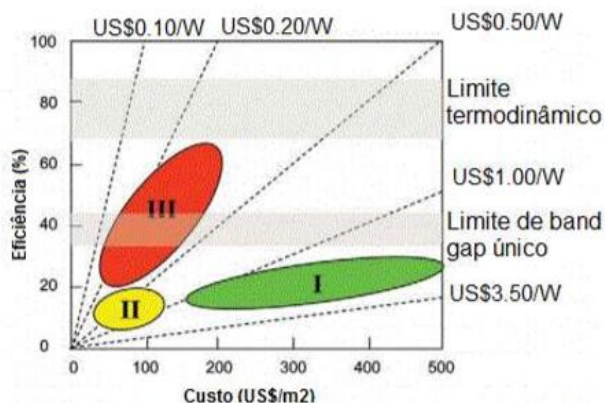


Figura 03. Eficiência das gerações, em que “I” se lê “primeira”; “II”, “segunda” e “III”, “terceira” – Fonte: Ely & Swart, IEEE (2014).

2.1 Células de Portadores Quentes

Conforme a pesquisa de Silva et al. (2018), uma Célula de Portadores Quentes (CPQ) é um dispositivo que apresenta grandes eficiências (limitado em 65% para iluminação não concentrada) com uma estrutura considerada simples comparada com outras tecnologias da terceira geração como, por exemplo, células de multijunções monolíticas Tandem. O princípio de funcionamento de células de multijunção se baseia em múltiplas camadas com diferentes níveis energéticos de materiais semicondutores. Devido à natureza de multijunção da célula, cada junção p-n composta condutora atua sob diferentes valores do espectro eletromagnético, aumentando a eficiência de absorção da energia fotônica no espectro da luz solar. Outro ponto relevante na eficiência de CPQ é a coleta de carregadores (fótons) fotogerados antes que sejam termalizados, resfriados. Evitar o termalização, retardando sua taxa de resfriamento do carregador fotoexcitado, causada por uma interação de fônons (fótons de comportamento vibracional, como definido por Ross et al. 1982) na malha, permite que haja a coleta desses carregadores em níveis maiores de energia (térmica). A figura 04 ilustra como é uma CPQ: primeiramente, os carregadores adentram num túnel estreito de ressonância que possui uma espécie de filtro, uma barreira seletiva.

Essa barreira estreita permite a extração rápida de carregadores do dispositivo através do contato, aceitando apenas níveis seletivos de energia, determinado por um potencial ($\mu = qV$) associado com a interação dos carregadores com elétrons e buracos no túnel.

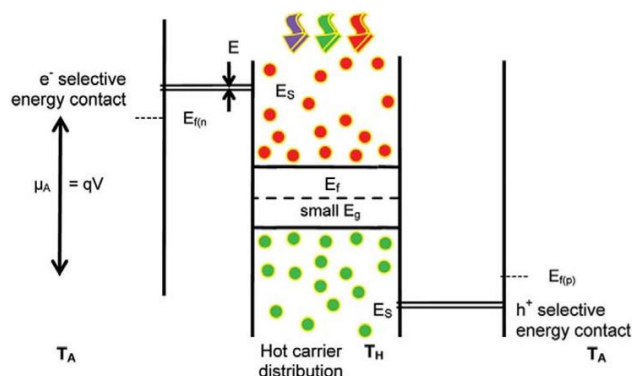


Figura 04. Funcionamento de uma célula de portadores quentes – Fonte: (Silva, 2018).

Progressos nessa área têm sido feitos com a utilização de barreiras duplas de estrutura túnica ressonante, com um layer simples de pontos quânticos (QD) de silício que providência o nível ressonante. No entanto, retardar o resfriamento tem se mostrado trabalhoso. Fora observado que, em altos níveis de intensidade luminosa, via efeito de estrangulamento do fônon, os mecanismos de decaimento energético são restritos. Compostos com expressiva diferença mássica entre seus cátions e ânions possuem uma lacuna na liberação de modos fônicos que diminuem esses mecanismos de decaimentos e aumentem o efeito estrangulador. O caminho da pesquisa migra rumo replicações desse efeito, modificando a banda de estrutura fônica da malha nanoestrutural de QD. No entanto, CPQ's estão longe do campo físico.

2.2 Células Orgânicas

Células orgânicas fotovoltaicas são baseadas na multijunção entre dois materiais orgânicos, que podem ser do tipo molecular ou polimérico. A pesquisa de Silva et al. (2018) também apresenta que o interesse comercial na produção dessas células é alto, porém as eficiências alcançadas ainda são baixas para que possam ser competitivas.

Pesquisas voltadas para o ramo da orgânica aplicada em sistemas fotovoltaicos começaram em 1950, em que através de trabalhos que utilizaram camadas finas de moléculas orgânicas foi possível observar a presença do efeito fotovoltaico com eficiências muito baixas (da ordem de 0,1%). Além dos avanços nas estruturas das células, estudos voltados para os materiais utilizados foram essenciais para o progresso nos níveis de eficiência. As questões de eficiência, tempo de vida útil e preço de construção são de suma importância para que possam competir no mercado.

A estrutura típica de células orgânicas é uma camada fina composta de moléculas orgânicas ou polímeros, podendo estar misturadas ou em múltiplas camadas, confinadas nos materiais condutores entre dois eletrodos. Pelo menos um desses eletrodos deve ser transparente, enquanto o segundo é geralmente formado de uma estrutura reflexiva metálica. O elemento mais importante de uma célula orgânica fotovoltaica é a camada óptica, cujo objetivo é a entrega da corrente fotogerada e da tensão.

Os fulerenos, descobertos em 1985, são alvos de diversas pesquisas na aplicação nos aceptores das células solares orgânicas, cujo alcance nas eficiências é relativamente bom. Como resultado de extensos estudos, uma grande quantidade desse material foi sintetizada, e suas estruturas e propriedades relatadas. Já os nanotubos de carbono surgem também como um material a ser empregado nas células orgânicas fotovoltaicas, promissor com sua propriedade mecânica. No entanto, o melhor resultado reportado por Ren et al. (2011) foi de 0.72%, quando semicondutores puros de nanotubo carbono foram incorporados à camada ativa. O departamento de física da Humboldt-Universität Berlin, vem trabalhando no desenvolvimento de materiais orgânicos e híbridos (orgânicos e inorgânicos), visando atingir melhores resultados que viabilizem a tecnologia. O relato mais promissor é apresentado por Bella et al. (2015), que atinge 2.06% de eficiência advento de um biopolímero.

Por fim, Lee et al (2013). descobriu que a inserção de corante orgânico melhora a resposta de absorção do espectro solar, embora não seja uma solução interessante por se tratar de gases nobres, caros e escassos, como matéria prima.

2.3 Nanotecnologia

Pontos Quânticos destoa como a representação da terceira geração quando se trata de nanotecnologia. Em 1990, a primeira célula solar sensibilizada a pontos quânticos foi construída por Weller. Ao utilizar uma célula eletroquímica de pontos quânticos de CdS - ele demonstrou que uma corrente era gerada a partir da exposição à luz solar. Desde então, tais células são reconhecidas pelas suas características de múltipla geração de fótons excitados, pela sua estabilidade, e pela sua possibilidade de controle da energia de banda através do ajuste do tamanho dos pontos quânticos, tornando possível a absorção do espectro solar do visível ao infravermelho.

A abordagem para nanotecnologia é exemplificada por pesquisas de Conibeer et al. (2009). Esta abordagem retém tanto as vantagens de materiais cristalinos quanto a de deposição de filmes-fino através da cristalização por uma película de pós crescimento na fase sólida. Tal junção simples de células já está agora em produção, atingindo eficiências pouco abaixo de 10%.

Para impulsiona-la em uma célula tandem e reter as outras vantagens da abordagem de terceira geração, pesquisas estão em curso na engenharia de bandas largas para materiais baseados em Si utilizando confinamento quântico em nanoestruturas, vide Conibeer (2007). Essa engenharia de bandas pode ser feita usando tanto poços quânticos (QW) ou QD de Si multijuntadas entre layers de base dielétrica em componentes de Si como SiO₂, Si₃N₄ ou SiC. Poços quânticos já foi tema de pesquisa de Rohr et al. (2002), que define que QWs são layers finos de materiais de banda menores presentes em materiais com bandas maiores. Dispositivos primitivos colocavam as QWs em regiões dopadas para um dispositivo p-n, mas coleções de portadores superiores são obtidas quando um campo elétrico está presente em torno dos QWs. Eles vieram como alternativa,

outrora complementar, na busca de abranger todo o espectro numa célula, impulsionando assim sua eficiência. Para espaçamentos suficientes de QD e QW, uma minibanda é formada criando uma larga banda efetiva. Para QD de 2nm (ou QW de 1nm) uma banda efetiva de 1.7eV é resultada – ideal para um elemento de célula tandem no topo do Si. Esses layers crescem pela deposição de filmes-fino. A matriz resultante é amorfa, embora evite alguns dos problemas de erros na malha.

Muito trabalho resta na passivação de defeitos, formação de junções e conexões para a célula de Si, mas a abordagem possui grande potencial, embora ainda, como uma série Tandem, isso sofre do problema de sensibilidade espectral. O design conceitual de um dispositivo completo é mostrado na figura 5.

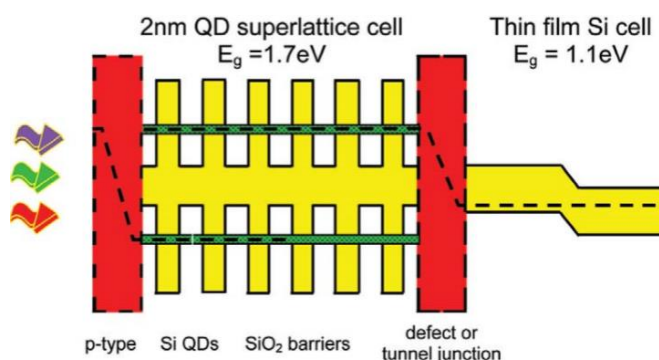


Figura 05. Célula tandem de Si – Fonte: Conibeer (2009)

A nanoestrutura da célula ilustrada acima consiste em QWs ou QDs em uma matriz dielétrica amórfica conectada por um túnel de recombinação para uma célula de filme-fino de Si. Há uma perda de 64.7% de energia causada pela recombinação da malha para o filme-fino, o que confirma a demanda de trabalhos na passivação de defeitos.

2.4 Células solares de Perovskite

Avanços marcantes na eficiência de Células de Perovskite (CP) ocorrem desde 2008 e com pesquisas de Yan et al. (2014). Suas propriedades têm se tornado mais claras desde então. Células de Perovskite são a tendência que apresenta grandes chances de contribuição em larga escala na produção de energia solar baseando-se na sua alta eficiência e compatibilidade com a produção em larga escala, (Docampo et al. 2013).

Seu princípio de funcionamento apresenta princípios de operação únicos. Por conta da baixa excitação vinculada, as cargas fotoexcitadas são do tipo Wannier. Excitações dessa forma são tipicamente encontradas em semicondutores cristalinos com baixas lacunas de energia e altas constantes dielétricas que reduzem a interação coulumbiana entre elétrons e buracos, acrescenta Wannier et al. (1937).

A compensação de energia entre a banda de valência de Perovskite e a banda de valência de vazio transportador é responsável pela transferência de carga seletiva. Tem sido notado que essa difusão de excitação pode ocorrer tanto dentro do bulk como nas interfaces.

Um benefício adicional característico, mostrado por Liang et al. (2014), de CPs é que não há requerimento de heterojunções bulk por conta da baixa excitação de energia vinculada. Uma heterojunção bulk é uma espécie de célula solar que consiste de materiais doados e não rejeitados intermisturados através do dispositivo.

Com algumas definições apresentadas foi possível observar que o sistema, embora ofereça avanços marcantes na indústria de energia solar, demanda uma alta complexidade embarcada em sua pesquisa e desenvolvimento. Por esse motivo, esse exemplo também não foi para o campo físico.

3. CENÁRIO POLÍTICO-ECONÔMICO

A Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012, a qual regulamenta a geração de energia através de Gerações Distribuídas utilizando regime de compensação (ANEEL, 2012), enfatiza a importância da geração fotovoltaica energética em âmbito nacional. A grande incidência de radiação solar no território brasileiro é o motivo pelo qual a tecnologia avança e os incentivos aumentam. A maior parte do continente nacional atinge médias anuais superiores a 12 Mj/m².dia, atingindo relevantes 22 Mj/m².dia na região de sertão nordestina, veja figura 06.

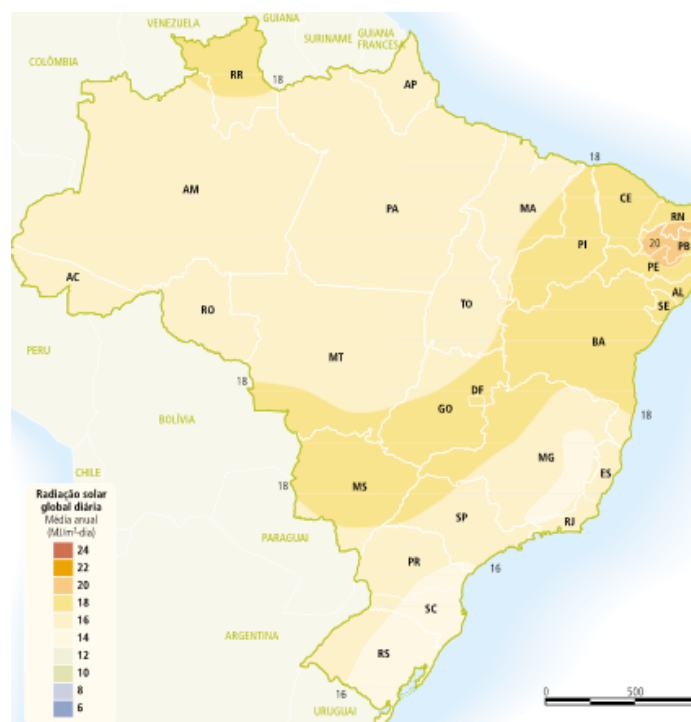


Figura 06. Radiação solar global diária em média anual típica (Mj/m².dia) – Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil: Editora Universitária da UFPE (2000).

Segundo a German Solar Industry Association (2015), o cenário mundial de produção de energia através dos módulos solares fotovoltaicos mostra que, anualmente, permite-se alcançar uma capacidade instalada de 100 GW, e ainda evitar a emissão de 70 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera (Lana et al. 2015). Estes, demonstram a ordem de grandeza que os projetos solares fotovoltaicos podem alcançar de acordo com a tecnologia disponível atualmente.

O Brasil conta com sua inserção no mercado da terceira geração. A produção das células fotovoltaicas orgânicas (OPV) é feita pelo CSEM Brasil (*Centre Suisse d'Électronique e Microtechnique*), resultado da associação entre a gestora de capitais brasileira, FIR Capital, e do CSEM. A mesma empresa que, em janeiro de 2019, assinou com a Petrobras uma parceria P&D de 30 meses com, com investimento de \$6.5 milhões, para desenvolver formulas de tinta a base de perovskite para filmes solar impressos.

Desde a década de 70 a indústria FV tem continuamente reduzindo os custos da energia solar. Nas últimas três décadas, o custo de módulos FV reduziram numa taxa de 20%. Isso se traduz de \$70/Wp em 1976 para \$3.50/Wp no início do século, e já atinge médias de \$0.50/Wp (em cotações atuais). Considerando tanto os módulos quanto o custeio de instalação, manutenção, junto com a presente eficiência da célula, o custo total da energia solar decaiu de \$3.65/kWh em 1976 para \$0.3/kWh em 2003. A terceira geração busca atingir valores menores ainda, com perspectivas previstas por Lewis et al. (2005) de \$0.02/kWh, fazendo com que esta tenha grande penetração. O fornecimento de material é a chave para eventual produção em larga escala. Wadia et al. (2009) investigou 23 diferentes materiais semi-condutores para a produção em larga escala. Desses materiais, 9 foram identificados por terem a capacidade de atenderem (ou até mesmo excederem) o consumo anual de energia em escala global (algo em torno dos 17 000 TWh).

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como premissa investigar o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a produção de energia elétrica. Novas soluções, que possuam melhores custos-benefícios, tornam mais atrativas economicamente para que as empresas mudem a forma de produção de energia, que atualmente degrada o meio ambiente. O trabalho visa tornar acessível pesquisas complexas do ramo, com uma abordagem direta, sem perder o rigor técnico necessário. Células solares de perovskite, embora complexas em âmbito científico, já apresentam aplicações em estruturas menos elaboradas, como em filmes impressos. Células orgânicas se apropriam da química laboratorial na confecção de incontáveis materiais artificiais que, ao passo da evolução tecnológica, aceleram o desenvolvimento da terceira geração, a um custo reduzido. A abordagem para portadores quentes se estende tanto para sua própria geração como para as outras, com as propriedades ofertadas por multijunções. Há avanços na área de enriquecimento de plasmões (fótons com características oscilatórias), dos quais não foram mencionados nesse artigo, que embora tenha suas similaridades com os fônons apresentados, exigem uma análise mais aprofundada e ficam como indicação para trabalhos futuros.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por sempre estar ao meu lado, nos altos e baixos, renovando minhas energias.

Agradeço também aos meus amigos, Millena e Miguel, que me apoiaram quando eu precisei e aos meus familiares, que a mim depositam afeto nesses tempos de quarentena.

6. REFERÊNCIAS

- Bella, Federico; Mobarakc, Nadhratun; Jumaah, Fatihah; Ahmadc, Azizan, “From seaweeds to biopolymeric electrolytes for third generation solar cells: An intriguing approach”. *Electrochimica Acta*, pg. 306-311, Janeiro de 2015.
- Conibeer, Gavin, “Third-generation photovoltaics: Gavin Conibeer ARC Photovoltaics”. *Materialstoday*, pg 42-50, Novembro de 2007.
- Conibeer, Gavin, “Third Generation Photovoltaics”, 2nd. *Electronics Symposium*, Apresentação, 2009
- CSEM Brasil, “Petrobras and CSEM Brasil join forces to deliver next generation of solar energy using printed photovoltaic films (2019). Publicado online em csembrasil.com.br. Extraído de ”<https://csembrasil.com.br/petrobras-and-csem-brasil-join-forces-to-deliver-next-generation-of-solar-energy-using-printed-photovoltaic-films/>” (Online Resource)..
- Docampo, P.; Ball, J.; Darwich, M.; Eperon G.; Snaith, H., “*Nat. Commun.*”. 2013, 4, 2761.
- Ely, Fernando e Swart, Jacobus, “Energia solar fotovoltaica de terceira geração”, *Espaço IEEE - O Setor Elétrico*, Outubro de 2014.
- Green, Martin, “Third Generation Photovoltaics Advanced Solar Energy Conversion”, 2006.
- Green, Martin, “Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond”, *Special Research Centre for Third Generation Photovoltaics*, University of New South Wales, Sydney-Australia.
- Lana, Luana; Almeida, Eliane; Dias, Fernanda; Rosa, Anna; Santo, Olívia; Sacramento, Thays; Braz, Kathlen, “Energia Solar Fotovoltaica: revisão bibliográfica”, FUMEC, 2015.
- Lee, Che-Lung; Lee, Wen-Hsi; Yang, Cheng-Hsien, “Triazoloisoquinoline-based/ruthenium-hybrid sensitizer for efficient dye-sensitized solar cells”. *International Journal of Photoenergy*, v. 2013, 2013.
- Lewis, Nathan; Crabtree, George, ”Report of the basics energy Science workshop on SEU (2005)”. 10.2172/899136.
- Liang, Chunjun; Wang, Yongsheng; Li, Dan; Ji, Xingchen; Zhang, Fujun; He, Zhiqun, “Modeling and simulation of bulk heterojunction polymer solar cells”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, pg. 67-86, Agosto de 2014.
- Padmanabhan, Balaji “Modeling of Solar Cells”, *Dissertação de Mestrado*, USA State University, Novembro de 2008.
- Ren, Shenqiang et al. “Toward efficient carbon nanotube/P3HT solar cells: Active layer morphology, electrical, and optical properties”. *Nano letters*, v. 11, n. 12, p. 53165321, 2011.
- Ritchie, Hannah e Roser, Max "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions (2017)". Publicado online em [OurWorldInData.org](https://ourworldindata.org). Extraído de: '<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>' (Online Resource).
- Rohr, C.; Abbott, P.; Ballard, I.; Bushnell, D.; Connolly, J.; Ekinsdaukes, N.; Barnham, K., “Experimental Solid State Physics”. *Imperial College London-U.K.*, 2002.
- Ross, R. T., e Nozik, A. J., J. “*Applied Physics*”. (1982) 53, 3813.
- Shockley, William; Queisser, Hans, “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells”. *Journal of applied physics*, v. 32, n. 3, p. 510-519, 1961.
- Silva, Izanilde; Pinheiro, Raoni; Americano, Iuri; Thomas, Habila; Oliveira, Kleber, “Materiais aplicados à geração de energia solar em edificações”, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.
- Valêra, António, “A Energia Solar Fotovoltaica”, *Gazeta de Física*, pp. 37 – 39, 2008.
- Wadia, C.; Alivisatos, A.; Kammen, D., “*Environ. Sci. Technol.*”. 2009, 43, 2072–2077.
- Wannier, Gregory (1937). "The Structure of Electronic Excitation Levels in Insulating Crystals". *Physical Review*.
- Yan, Junfeng e Saunders, Brian, “Third-generation solar cells: a review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells”, *RCS Advances*, 2014.