

Perspectivas de Novos Materiais Alternativos ao Silício para a produção de Células Solares Fotovoltaicas: Uma Revisão Sistemática da Literatura

Marco Antonio Casadei Teixeira

Doutorando no PPG em Administração, UNINOVE – Universidade Nove de Julho, Brasil.
Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, UNINOVE – Universidade Nove de Julho, Brasil.
mteixe01@uni9.org.br

Heidy Rodriguez Ramos

Professora Doutora, PPG-CIS e PPGA, UNINOVE – Universidade Nove de Julho, Brasil.
heidyrr@uni9.pro.br

Alexandre de Oliveira e Aguiar

Professor Doutor, Invento Consultoria, Treinamento e Serviços, Brasil.
alexandre@aguiar.eng.br

RESUMO

Muito se tem estudado sobre a energia solar como uma energia renovável, pois pode ser transformada em eletricidade por meio de painéis solares. Inovar em tecnologias fotovoltaicas é muito importante, pois essa tecnologia apresenta vantagens como baixo custo de instalação e manutenção e nenhum impacto ambiental durante a fase de operação. O mercado de produtos fotovoltaicos é dominado pela tecnologia do silício, mas novas tecnologias de células de segunda e terceira gerações estão sendo desenvolvidas. A pesquisa mostra que *Perovskite solar cell* e a *Multijunction solar cell*, tem potencial de conseguir eficiências mais altas e custos de produção mais baixos num prazo mais curto. Os materiais *Dye-sensitized solar cell (DSSC)*, *Organic photovoltaic (OPV)*, *Quantum dot sensitized solar cell (QDSSC)*, *Singlejunction solar cell* e *Heterojunction solar cell*, tem potencial para um futuro mais distante, pois dependem de superar limites de eficiência e de custos. Sob este ponto de vista, o objetivo geral da pesquisa foi analisar os materiais com potencial estratégico para competir com o silício na composição de células solares fotovoltaicas. Para tanto realizou-se uma revisão sistemática da literatura, que permitiu recuperar 112 artigos sobre os materiais mais estudados, concluiu-se que muitas pesquisas estão sendo conduzidas com bons resultados. Alguns resultados obtidos ainda não são aceitáveis tecnologicamente em termos de eficiência, mas em um futuro próximo talvez seja possível a utilização da energia solar de forma mais ampla e barata.

PALAVRAS-CHAVE: Células Fotovoltaicas; Energia Solar Fotovoltaica; Inovação; Silício.

1 Introdução

A ampliação do gasto energético no mundo contemporâneo resulta numa necessidade de pesquisa e desenvolvimento constante sobre novas fontes de geração de energia que completem a alta demanda e também sejam menos agressivas ao meio ambiente (MACHADO; MIRANDA, 2015). Neste sentido, a energia solar é uma boa alternativa de fonte para geração de energia renovável, porém ainda representa uma pequena parcela em relação a toda a energia gerada no mundo. O Brasil apresenta bom nível de irradiação solar, com uma média anual entre 1200 e 2400 kWh/m²/ano para a geração de energia solar se comparado a países europeus, como por exemplo, a Alemanha que recebe entre 900 e 1250 kWh/m²/ano (MACHADO; MIRANDA, 2015).

O desenvolvimento da indústria eletrônica permitiu um enorme salto no aproveitamento da energia solar fotovoltaica relacionada aos processos que envolvem a transformação do silício, matéria-prima essencial na composição das células fotovoltaicas. O silício utilizado na indústria solar fotovoltaica é purificado até atingir um alto grau de pureza necessário para sua utilização (DAVIES; FRISSE; BRANDAO, 2018).

Não é possível desconsiderar os materiais utilizados na produção de células fotovoltaicas. O silício é uma das matérias-primas básicas mais utilizadas na fabricação de células solares fotovoltaicas e dependendo de seu emprego os custos e as eficiências se alteram significativamente. Existem três tipos de silício empregados na indústria fotovoltaica, o silício policristalino, o silício monocristalino e o silício amorfo. O silício monocristalino tem uma estrutura molecular bem definida com maior grau de pureza atingindo maiores eficiências, porém seu custo é mais elevado. Ao contrário do silício monocristalino, o silício policristalino tem uma estrutura menos homogênea e suas eficiências e custos também são menores. Por fim, o silício amorfo, não possui uma estrutura cristalina definida e apresenta baixas eficiências para utilização na produção de células e painéis fotovoltaicos.

Do ponto de vista dos impactos ambientais, há dois aspectos a se considerar. O primeiro é a questão das mudanças climáticas, uma vez que a emissão de gases de efeito

estufa na produção dos módulos fotovoltaicos está na faixa de 30 a 45 gCO₂/kWh (ALSEMA; DE WILD-SCHOLTEN, 2006), o que é relativamente baixo se comparado com outras fontes. Chen et al. (2016) identificaram estudos mostrando uma faixa entre 30 e 110 gCO₂/kWh considerando ciclos de vida de 20 a 30 anos. Esse dado mostra que do ponto de vista das mudanças climáticas a energia fotovoltaica apresenta uma clara vantagem. Por outro lado, há uma grande preocupação com os impactos ambientais da fase da purificação do silício, mas materiais alternativos como Perovskita/Si tem menor potencial de causar toxicidade humana (efeitos associados ou não ao câncer) e menor potencial de ecotoxicidade para água quando considerado o ciclo de vida de 20 anos (LUNARDI et al., 2017).

Adicionalmente, a maioria dos módulos fotovoltaicos comerciais tem uma eficiência na transformação de energia solar em eletricidade da ordem de no máximo 20%. Teixeira (2019) identificou diversos estudos mostrando que materiais alternativos como poliméricos ou multijunção tem potencial para eficiência de conversão mais alta (como 30 ou 50%), para viabilizar do ponto de vista econômico o uso da energia de origem fotovoltaica. Por isso a redução da quantidade de material, a energia e a toxicidade utilizados nos processos de fabricação devem ser considerados (DAVIES; FRISSE; BRANDAO, 2018).

Com base no que foi apresentado sobre a necessidade de pesquisas de novas fontes de energia com menos impacto para o meio ambiente, a pergunta de pesquisa do estudo é: “Quais são os principais materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas, baseado na produção acadêmica científica?”. Para tanto, o objetivo do estudo é, a partir de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) identificar e classificar os materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas, considerando as dimensões ambiental, de eficiência e de custo.

2 Referencial Teórico

2.1 Tecnologias fotovoltaicas

A geração de energia elétrica, a partir da utilização das fontes renováveis, cresce rapidamente e chama atenção devido à sua sustentabilidade. O sol é uma fonte eterna de energia renovável na produção de eletricidade usando dispositivos fotovoltaicos, o que gera menos impactos ao meio ambiente (MITRA et al., 2018).

Segundo Pereira et al. (2017) o Brasil apresenta bons níveis de irradiação global horizontal variando entre as regiões conforme o clima estudado. Em virtude da abundância de energia, a estrutura das células fotovoltaicas e a melhora da eficiência energética são alvos de estudos científicos contínuos na transformação da energia solar. A eficiência de conversão de energia cresce de maneira sucessiva e as células fotovoltaicas de última geração são uma solução para a transformação da energia solar (OPWIS et al., 2016). Segundo House et al. (2015), as pesquisas para o desenvolvimento desta tecnologia fizeram os custos das células fotovoltaicas decrescerem e o tempo de uso ultrapassar os 25 anos. É uma solução viável para atender as questões energéticas mundiais por um futuro energético sustentável.

As características do efeito fotovoltaico foram descobertas pelo cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel, em 1839. Todavia, uma descoberta promissora para os estudos da energia solar fotovoltaica foi realizada pelos cientistas dos Laboratórios Bell em 1950, a

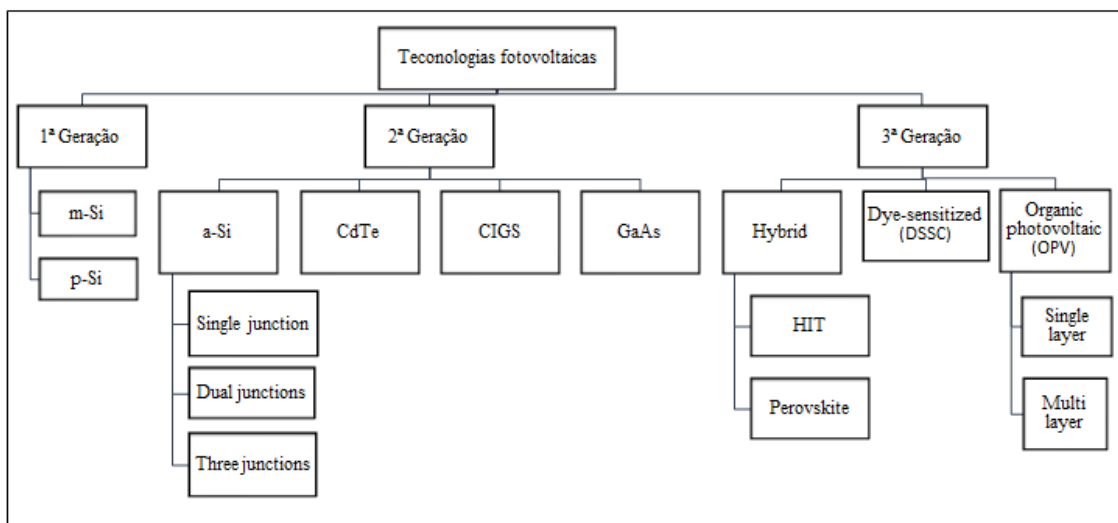
partir da identificação que o silício, tratado quimicamente com impurezas reagia à luz e gerava energia elétrica. Essa descoberta foi obtida por Calvin Fuller quem demonstrou a primeira célula solar feita de silício, que posteriormente seria o principal elemento dos chips de computador (VALLÉRA; BRITO, 2006).

O silício utilizado para as células solares originou-se da indústria de microeletrônica. A Sílica (SiO_2) é o principal material utilizado na obtenção do silício de alto teor de pureza e produzido em fornos elétricos que consomem muita energia (FERREIRA; FENATO, 2017).

2.2 Os principais materiais

As tecnologias fotovoltaicas em desenvolvimento dividem-se basicamente em três tipos, chamadas de "gerações" e que podem oferecer caminhos promissores quanto ao custo, a eficiência e a sustentabilidade (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018). Os mais diversos tipos de materiais que compõem as células fotovoltaicas são mostrados na Figura 1.

Figura 1 - Principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes.



Fonte: Adaptado de (KUMAR; KUMAR, 2017) e (OGBOMO et al., 2017)

A seguir são apresentadas as principais tecnologias fotovoltaicas para a fabricação de células solares existentes no mercado.

2.2.1 Células fotovoltaicas de 1ª geração

As células fotovoltaicas de primeira geração começaram a ser desenvolvidas a partir dos anos 50 e até hoje a tecnologia do silício é a que tem a maior participação no mercado internacional, em razão do custo baixo de produção e da eficiência na conversão da energia solar. São células baseadas em Wafer de silício de 100 a 200 μm de espessura e cortados em massa de silício de grau solar (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

Dependendo do processo de fabricação, as células fotovoltaicas podem ser de natureza: a) *Monocrystalline Silicon (m-Si)* é obtido a partir do crescimento de um único cristal com alto grau de pureza; e b) *Polycrystalline Silicon (p-Si)* são produzidas a partir da solidificação de um bloco de silício fundido, neste processo os cristais orientam-se na direção fixa produzindo lingotes quadrados fundidos de Multi-Si, são cortados em blocos e depois em *Wafer* (KUMAR; KUMAR, 2017).

2.2.2 Células fotovoltaicas de 2ª geração

A segunda geração das células fotovoltaicas é fabricada aplicando-se camadas de película fina de material fotovoltaico em uma base, por isso o nome *Thin-film* (filme fino). A base pode ser o vidro, o plástico, a cerâmica ou o metal. As camadas de *Thin-film* variam de nanômetros (nm) a micrômetros (μm) e desta maneira são leves e flexíveis. No processo de fabricação é utilizada pouca matéria prima, possibilitando que o produto final seja mais barato e pode ser feito camada sobre camada sendo depositada sequencialmente num substrato (OGBOMO et al., 2017).

2.2.3 Células fotovoltaicas de 3ª geração

As células fotovoltaicas de última geração ou terceira geração são assim chamadas porque estão sendo pesquisadas em laboratório e tem pouca participação no mercado. Várias substâncias orgânicas estão sendo estudadas, inclusive os materiais orgânico-metálicos. As substâncias pesquisadas mais comuns são: *Dye-sensitized solar cell* (DSSC), *Organic photovoltaic* (OPV), *Perovskite Solar Cell* (OGBOMO et al., 2017).

a) *Dye-sensitized solar cell* (DSSC) é composta por um ânodo foto-sensibilizado, fundamentado num material semicondutor, um eletrólito e um cátodo foto-eletroquímico. Combinam materiais orgânicos e inorgânicos, são mecanicamente resistentes, requerem matérias primas de baixo custo e são facilmente processadas. As células DSSCs são leves, podem ser produzidas em substratos flexíveis e podem ser coloridas de acordo com o corante utilizado se comparado às células de silício (O'REGAN; GRÄTZEL, 1991). As células solares sensibilizadas por corante possuem processo de fabricação simples, o custo é baixo e possuem um *energy conversion efficiency* de 8 a 14%. São sensíveis ao clima, possuem uma vida útil de 10 anos e podem ser corrosivas e tóxicas se utilizarem o chumbo (OGBOMO et al., 2017).

b) *Organic photovoltaic* (OPV), as células solares orgânicas ou células solares plásticas compostas de materiais orgânicos constituídas de materiais como polímeros, pentaceno, ftalocianina de Cobre, polifenileno vinileno e fulerenos de carbono, conhecidos como compostos de moléculas pequenas (100 nm) utilizam impressão no processo de fabricação e impactam menos o meio ambiente (KUMAR; KUMAR, 2017). Possui baixo custo de produção, são flexíveis e são baratas para as aplicações fotovoltaicas, mas não aguentam degradação ambiental, sem proteção eficaz (OGBOMO et al., 2017).

A *energy conversion efficiency* alcançado por estas células ultrapassa os 11% utilizando heterojunções, ou seja, são células constituídas de várias camadas de misturas de polímeros conjugados e derivados de fulereno solúveis. Estas células são sensíveis ao oxigênio e a água, pois estes elementos diminuem a eficiência de conversão de energia (KUMAR; KUMAR, 2017).

c) *Perovskite Solar Cell*, as células solares híbridas baseadas em perovskita são materiais propícios para produção de sistemas fotovoltaicos econômicos e eficientes. A estrutura da *perovskita* foi descoberta por Lev Aleksevich Von Perovski (1792–1856). Trata-se de uma classe de óxidos, nitretos, haletos e ternários que possuem propriedades físicas de magnetismo, supercondutividade e magnetorresistência (HERMES et al., 2015). A fabricação pode ser realizada por meio de processos químicos, e os custos são baixos, a máxima eficiência relatada é de 19,7% (BÜHLER; SANTOS; GABE, 2018).

O mercado de células fotovoltaicas tem predomínio do silício Mono (m-Si) e policristalino (p-Si) embora possuam processos de fabricação complexos, caros e tóxicos. As células solares de *Thin-film* são dispositivos que são implementados por meio de deposição de vapor físico ou processo de impressão, com apenas alguns microns de espessura e necessitam aproximadamente 100 vezes menos material corante do que C-Si. Se forem conseguidas eficiências suficientes, isso significaria uma redução nos custos, processos e materiais, assim como alcançar um uso mais extenso para estes materiais, para serem utilizados em áreas que requerem maior flexibilidade (HERMES et al., 2015).

3 Metodologia

A pesquisa relatada a seguir foi respaldada na Revisão Sistemática da Literatura (RSL), pois adota procedimentos transparentes e replicáveis, procura elucidar os objetivos de pesquisa, obtêm pesquisas pertinentes, coleta e avalia os estudos e apresenta os resultados e contribuições de seus achados (COOPER; SCHINDLER, 2011).

A pesquisa foi realizada na base SCOPUS, considerando artigos em inglês, com os seguintes termos de busca: "*solar energy*", "*sun power*", "*photovoltaic solar energy*" e "*photovoltaic cells*" e análise final de 112 artigos. A Figura 2 apresenta o protocolo da pesquisa.

Figura 2 - Resultados da pesquisa na base de dados SCOPUS Elsevier.

Identificação	Registros obtidos na base SCOPUS utilizando os filtros "Articles or Review" e período de 2014 a 2018, (n=488) TITLE-ABS-KEY ((solar AND energy) AND (sun AND power) AND (photovoltaic AND solar AND energy) AND (photovoltaic AND cells)) AND DOCTYPE (ar OR re) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2019
Triagem	Leitura do título e resumo dos artigos e confirmação do tema (n=138)
Elegibilidade	Leitura pormenorizada dos artigos restantes que constitui o material de pesquisa (n=112)
Incluídos	Artigos selecionados para a análise qualitativa na Revisão Sistemática da Literatura (RSL) (n=112)

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os artigos selecionados foram exportados em formato CSV para uma planilha eletrônica Excel, verificando um a um a confirmação da relação dos artigos com o tema escolhido, por meio da leitura do título, resumo e considerações finais. As informações foram sistematizadas em tabelas, permitindo a análise das informações e a classificação dos materiais por composição química, constituindo então classes de estudo.

4 Análise dos resultados

Dentre os 112 documentos selecionados, a partir do ano de 2014 quando foram publicados 14 artigos mantendo-se uma média de 18 publicações por ano até 2017. Observou-se um crescimento próximo de 140% no ano de 2018 com relação a 2017, com 38 artigos publicados.

Os três periódicos que publicaram mais de cinco artigos e que concentram 20 dos 112 artigos (63%), são: *Solar Energy* (SJR 1,59-2018) com 8 artigos, *Energy and Environment Science* (SJR 13,1-2018) com 7 artigos e *Electrochimica Acta* (SJR 1,37-2018) com 5 artigos. As publicações de artigos e revisões de pesquisas destes periódicos estão concentradas na área

de: a) o periódico *Solar Energy*, em ciência e tecnologia para aplicações de energia solar; b) o periódico *Energy and Environment Science* tem trabalhos voltados às disciplinas de bioquímica, biofísica e engenharia química; e c) o periódico *Electrochimica Acta*, divulga estudos sobre os aspectos da eletroquímica.

Destaca-se ainda que, dos 10 primeiros países reportados com mais de cinco publicações, os três primeiros são: China (37 artigos), Estados Unidos (26 artigos) e Suíça (13 artigos), representando mais de 45% (76 artigos) das pesquisas publicadas no período de 2014 a 2018.

Os artigos selecionados para leitura foram divididos nas seguintes categorias de material: *Dye-sensitized solar cell (DSSC)*, *Graphene film*, *Heterojunction solar cell*, *Homojunction solar cell*, *Hybridized solar cell*, *Multijunction solar cell*, *Organic photovoltaic (OPV)*, *Perovskite solar cell*, *Polymer solar cell (PSC)*, *Quantum dot sensitized solar cell (QDSSC)* e *Singlejunction solar cell*.

4.1 Análise da categoria de material Perovskite solar cell

Na Tabela 1 verificam-se os artigos recuperados para a categoria de material *Perovskite solar cell*. Dentre os 10 artigos com mais citações analisados de publicações referentes às *Perovskite solar cell*, temos em 2014 (2 artigos), 2015 (2 artigos), 2016 (4 artigos), 2017 (2 artigos) e em 2018 (0 artigos).

Tabela 1 – Categoria de material *Perovskite solar cell*.

Autores	Ano	Periódico	Citações	Eficiência de conversão energia	Custo	Disponibilidade	Impacto Ambiental
Noel N.K. et al.	2014	Energy and Environmental Science	806	6,00	NA	NA	ALTO
Tan H. et al	2017	Science	595	20,10	NA	NA	NA
Qin P. et al.	2014	Nature Communications	471	12,40	NA	NA	NA
Shin S.S. et al.	2017	Science	414	21,20	NA	NA	NA
Anaraki E.H. et al.	2016	Energy and Environmental Science	252	20,70	NA	NA	NA
Kazim S. et al.	2015	Energy and Environmental Science	116	11,80	NA	NA	NA
Molina-Ontoria A. et	2016	Angewandte Chemie - International Edition	94	18,20	NA	NA	NA
Zarazua I. et al.	2016	Journal of Physical Chemistry Letters	93	7,69	NA	NA	NA
Rao H.-S. et al.	2015	Advanced Functional Materials	87	14,69	NA	NA	NA
Agresti A. et al.	2016	Advanced Functional Materials	85	11,14	NA	NA	NA

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os artigos recuperados apresentam diferentes tipos de estudos sobre *Perovskite Solar Cell*, porém não fazem menção ao custo e à disponibilidade, mas informam alto impacto ambiental e concentram-se no desenvolvimento de: a) Classes de óxidos; b) Materiais com e sem chumbo; e c) Materiais para Hole transporting material (HTM).

Os 10 artigos possuem mais de 50 citações por artigo, com o *energy conversion efficiency* variando de 6% a 21,2%. O artigo mais citado é de autoria de Noel et al. (2014) com 806 citações e foi publicado no periódico *Energy and Environmental Science*. Este estudo foca no desenvolvimento de células solares de Halletos sem chumbo (*Lead-free*) com *Thin-film*. A eficiência energética relatada neste estudo é de 6%, bem abaixo de 19,7% relatada por Bülher et al. (2018) para este tipo de célula.

4.2 Análise da categoria de material Dye-sensitized solar cell (DSSC)

Na Tabela 2 verificam-se os artigos recuperados para a categoria de material *Dye-sensitized solar cell (DSSC)*. Dentre os 10 artigos com mais citações analisados, temos em 2014 (2 artigos), 2015 (4 artigos), 2016 (3 artigos), 2017 (1 artigos) e em 2018 (0 artigos).

Tabela 2 - Categoria de material *Dye-sensitized solar cell* (DSSC).

Autores	Ano	Periódico	Citações	Eficiência de conversão de energia	Custo	Disponibilidade	Impacto Ambiental
Joly D. et al.	2015	Energy and Environmental Science	67	10,25	NA	NA	NA
Tang R. et al.	2015	Journal of Materials Chemistry A	27	4,70	NA	NA	NA
Liu T. et al.	2014	Journal of Physical Chemistry C	25	4,10	NA	NA	NA
Li C. et al.	2016	ACS Photonics	21	35,00	NA	NA	NA
Lee D.K. et al.	2015	Dyes and Pigments	16	5,20	NA	NA	NA
Zhang W. et al.	2017	Chemical Science	13	11,12	NA	NA	NA
Feng Y. et al.	2014	RSC Advances	13	8,62	NA	NA	NA
Vekariya R.L. et al.	2016	ACS Omega	8	2,40	BAIXO	ALTA	BAIXO
Zhu G. et al.	2015	Journal of Colloid and Interface Science	5	7,65	NA	NA	NA
Yuan H. et al.	2018	Solar Energy	5	5,00	NA	NA	NA

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os artigos apresentam diferentes estudos sobre *Dye-sensitized solar cell* (DSSC), mas concentram-se no desenvolvimento de: a) materiais orgânicos (célula solar polimérica) para aplicação nos substratos; b) células solares metal-free; e c) nanopartículas de materiais inorgânico-orgânicos com corantes, indicando interesse no desenvolvimento de novos corantes para aplicação neste tipo de célula.

Nestes estudos sobre *Dye-sensitized solar cell* (DSSC), apenas sete artigos possuem mais de 10 citações, com o *energy conversion efficiency* variando de 4,1% a 35%. A pesquisa mais citada é de Joly et al. (2015) com 67 citações, publicada no periódico *Energy and Environmental Science*. Este estudo aborda o desenvolvimento de células solares *Metal-free organic dyes* com *Thin-film*. A eficiência energética relatada neste estudo é de 10,25%, dentro da faixa de eficiência relatada de 8 a 14% informada por Ogbomo et al. (2017).

4.3 Análise da categoria de material Quantum dot sensitized solar cell (QDSSC)

Verifica-se na Tabela 3 que foram recuperado 10 artigos sobre a categoria de material *Quantum dot sensitized solar cell* (QDSSC), considerando em 2014 (2 artigos), 2015 (4 artigos), 2016 (3 artigos), 2017 (1 artigos) e em 2018 (0 artigos).

Tabela 3 – Categoria de material *Quantum dot sensitized solar cell* (QDSSC).

Autores	Ano	Periódico	Citações	Eficiência de conversão de energia	Custo	Disponibilidade	Impacto Ambiental
Feng H.-L. et al.	2015	ACS Applied Materials and Interfaces	55	4,57	NA	NA	NA
Gopi C.V.V.M. et al.	2015	Dalton Transactions	37	2,85	NA	NA	NA
Firoozi N. et al.	2015	Journal of Power Sources	25	3,16	NA	NA	NA
Al-Hosiny N. et al.	2014	Materials Science in Semiconductor Processing	17	0,31	NA	NA	ALTO
Gopi C.V.V.M. et al.	2016	Dalton Transactions	15	3,11	NA	NA	NA
Yang S. et al.	2015	Journal of Materials Chemistry A	15	3,54	NA	NA	NA
Cao Y. et al.	2016	Electrochimica Acta	12	6,26	NA	NA	NA
Beattie N.S. et al.	2017	ACS Photonics	11	18,30	NA	NA	NA
Chang Y. et al.	2016	Journal of Power Sources	11	4,14	NA	BAIXA	NA
Sun H. et al.	2014	Journal of Colloid and Interface Science	11	1,22	NA	NA	NA

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Todos os artigos apresentam mais de 10 citações por artigo e possuem várias abordagens, tais como: a) múltiplas arquiteturas; e b) não metais, metais de transição e metais representativos. Estes diferentes materiais indicam que os pesquisadores e estudos relatados, testam materiais com eletropositividades diferentes para aperfeiçoar a eficiência de conversão de energia e desta maneira, aproveitar as múltiplas frequências do espectro solar. As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 0,31% a 18,30%, sendo a pesquisa mais citada de autoria de Feng et al. (2015) com 55 citações.

4.4 Análise da categoria de material Multijunction solar cell

Foram recuperados 11 artigos, conforme a Tabela 4, sobre *Multijunction solar cell*, considerando em 2014 (2 artigos), 2015 (1 artigo), 2016 (1 artigo), 2017 (0 artigo) e 2018 (6 artigos).

Dentre os artigos que apresentam mais de 10 citações somente o estudo de Kayes et al. (2014) tem 39 citações. Os artigos analisados abordam questões sobre múltiplas camadas ou múltiplas junções ou ainda células Tandem. Cada junção individual produzirá corrente elétrica em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Ao usar diferentes materiais semicondutores resulta na absorção de faixa mais ampla de comprimentos de onda, melhorando a eficiência da conversão de energia elétrica. As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 4,50% a 53,90% evidenciando um interesse no desenvolvimento de novas aplicações para este tipo de célula.

Tabela 4 - Categoria de material *Multijunction solar cell*.

Autores	Ano	Periódico	Citações	Eficiência de conversão de energia	Custo	Disponibilidade	Impacto Ambiental
Kayes B.M. et al.	2014	IEEE Journal of Photovoltaics	39	30,80	NA	NA	NA
Geisz J.F. et al.	2018	IEEE Journal of Photovoltaics	6	50,00	NA	NA	NA
Tiwari B. et al.	2016	Solar Energy	6	23,53	NA	NA	NA
Jain N. et al.	2018	Applied Physics Letters	4	34,00	NA	NA	NA
Zielony E. et al.	2014	Journal of Applied Physics	4	4,90	NA	NA	NA
Perl E.E. et al.	2018	IEEE Journal of Photovoltaics	3	16,40	NA	NA	NA
Huang Y. et al.	2015	Semiconductor Science and Technology	2	53,90	NA	NA	NA
Mitul A.F. et al.	2018	AIP Advances	1	4,50	NA	NA	NA
Routray S. et al.	2018	IEEE Transactions on Nanotechnology	0	9,82	BAIXO	NA	NA
Benlekhdim A. et al.	2018	Optik	0	18,55	NA	NA	NA

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

4.5 Análise da categoria de material Organic photovoltaic (OPV)

Foram recuperados nove artigos, conforme a Tabela 5, sobre *Organic photovoltaic (OPV)*, dos quais foram publicados em 2014 (3 artigos), 2015 (0 estudos), 2016 (2 artigos), 2017 (1 artigo) e em 2018 (3 artigos).

Tabela 5 - Categoria de material *Organic photovoltaic (OPV)*.

Autores	Ano	Periódico	Citações	Eficiência de conversão de energia	Custo	Disponibilidade	Impacto Ambiental
Mi D. et al.	2014	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	37	6,22	BAIXO	NA	NA
Lechêne B.P. et al.	2016	Nano Energy	34	6,20	NA	NA	NA
Peng Y. et al.	2014	Applied Physics Letters	17	2,20	BAIXO	NA	NA
Cao W. et al.	2014	Renewable Energy	11	3,00	BAIXO	ALTA	BAIXO
Burlingame Q. et al.	2016	Advanced Energy Materials	9	6,60	NA	NA	NA
Chiu K.Y. et al.	2017	Journal of Electroanalytical Chemistry	6	0,28	NA	NA	NA
Min J. et al.	2018	Organic Electronics: physics, materials, applica	2	6,19	NA	NA	NA
Cho K. et al.	2018	Macromolecular Rapid Communications	2	6,75	NA	NA	NA
Mitra K.Y. et al.	2018	Micromachines	0	0,18	BAIXO	ALTA	NA

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os artigos que apresentam estudos sobre *Organic photovoltaic solar cell (OPV)* abordam questões, tais como: (a) a utilização de substratos flexíveis para a construção de células orgânicas; e (b) a fabricação de células fotovoltaicas orgânicas impressas por jato de tinta, dentre outros. As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 0,18% a 6,75%. Dos nove estudos somente quatro apresentam mais de 10 citações, como destaque para a pesquisa de Mi et al. (2014) com um total de 37 citações.

4.6 Análise da categoria de material Hybridized solar cell

Foram recuperados oito artigos, conforme a Tabela 6, sobre *Hybridized solar cell*, considerando em 2014 (3 artigos), 2015 a 2017 (1 artigo) e em 2018 (2 artigos).

Tabela 6 - Categoria de material *Hybridized solar cell*.

Autores	Ano	Periódico	Citações	Eficiência de conversão de energia	Custo	Disponibilidade	Impacto Ambiental
Dutta P. et al.	2014	Polymer Chemistry	17	1,61	NA	NA	NA
Kim K. et al.	2014	Electrochimica Acta	12	1,63	NA	NA	NA
Duan J. et al.	2018	Journal of Energy Chemistry	3	6,51	NA	NA	NA
Wang Y. et al.	2017	Journal of Materials Chemistry A	3	9,50	NA	NA	NA
Mehrabian M. et al.	2015	Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics	3	3,48	NA	NA	NA
Acciari M. et al.	2018	Solar Energy	2	14,50	ALTO	BAIXA	NA
Sun J. et al.	2014	Macromolecular Chemistry and Physics	2	5,91	NA	NA	NA
Mehrabian M.	2016	Journal of Optical Technology	1	3,25	NA	NA	NA

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os artigos analisados abordam temas sobre: (a) método de evaporação por pulverização; (b) aplicações para energia solar, chuva e utilização de Nanocristais; e (c) síntese e caracterização de polímeros. As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 1,61% a 14,50% e a pesquisa mais citada é de Dutta et al. (2014) apresentando um total de 17 citações.

4.7 Análise da categoria de material Heterojunction solar cell

Foram recuperados seis artigos, conforme a Tabela 7, sobre *Heterojunction solar cell*, considerando em 2014 (0 artigos), 2015 (2 artigos), 2016 (3 artigos), 2017 (1 artigos) e em 2018 (0 artigos).

Tabela 7 - Categoria de material *Heterojunction solar cell*.

Autores	Ano	Periódico	Citações	Eficiência de conversão de energia	Custo	Disponibilidade	Impacto Ambiental
Chiang T. et al.	2015	ACS Applied Materials and Interfaces	18	15,17	NA	NA	NA
Chou C.-L. et al.	2016	Journal of the Electrochemical Society	8	1,47	NA	NA	NA
Xu Y. et al.	2017	Journal of Materials Science	5	0,68	BAIXO	ALTA	BAIXO
Lan D. et al.	2016	Applied Physics Letters	5	0,44	NA	NA	NA
Dagher S. et al.	2016	Journal of Materials Science: Materials in Electronics	4	5,04	NA	NA	NA
Balashangar K. et al.	2015	Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics	4	14,50	NA	NA	NA

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Esses artigos abordam os temas: (a) solução molecular metal orgânica; (b) efeito da rugosidade dos substratos; e (c) materiais absorventes de semicondutores. As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 0,44% a 15,17% e o estudo mais citado é de Chiang et al. (2015) com 18 citações.

4.8 Análises das categorias de materiais Singlejunction solar cell, Polymer solar cell (PSC), Homojunction solar cell e Graphene film.

Foram recuperados, conforme a Tabela 8, somente sete artigos sobre os seguintes materiais: *Singlejunction solar cell* 2018 (3 artigos), *Polymer solar cell* (PSC) 2016 (1 artigo) e 2018 (1 artigo), *Homojunction solar cell* 2017 (1 artigo) e *Graphene films* 2015 (1 artigo).

Tabela 8 - Categorias de materiais Singlejunction solar cell, Polymer solar cell (PSC), Homojunction solar cell e Graphene film.

Autores	Ano	Periódico	Citações	Eficiência de conversão de energia	Custo	Disponibilidade	Impacto Ambiental
Shastry T.A. et al.	2016	ACS Energy Letters	7	5,81	BAIXO	NA	NA
Wu H. et al.	2015	ACS Applied Materials and Interfaces	7	3,56	NA	NA	NA
Russo J. et al.	2017	Applied Energy	5	29,00	NA	NA	NA
Xiao Y.-J. et al.	2018	Acta Polymerica Sinica	3	8,60	NA	NA	NA
Chen H. et al.	2018	ACS Photonics	1	13,40	NA	NA	NA
Rios-Ramirez B. et al.	2018	Physica Status Solidi (A) Applications and Materials	0	5,93	BAIXO	ALTA	BAIXO
Ho W.-J. et al.	2018	Thin Solid Films	0	23,44	NA	NA	NA

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os artigos sobre *Singlejunction solar cell* abordam assuntos sobre: (a) Nanocristais; (b) Semicondutores de calcogenetos metálicos binários; e (C) o desempenho de células de GaAs. Para *Polymer solar cell* foram estudados: (a) os materiais de transporte de furos (HTM) (do inglês, *Hole transporting material*); e (b) Nanotubos de carbono. Para *Homojunction solar cell* foram estudados: (a) um semicondutor composto de índio, gálio e fósforo; e (b) também a eficiência do ânodo de grafeno modificado por óxido de molibdênio. A maior eficiência energética encontrada para *Singlejunction solar cells* é de 23,44%, para *Polymer solar cells* (PSCs) é de 8,6%, para *Homojunction solar cell* é de 29% e *Graphene films* 3,56%.

5 Resultados

Analisando os resultados percebeu-se que a maioria dos estudos recuperados não indicou ou não tiveram como foco principal estudar os custos, a disponibilidade e o impacto ambiental e sim o foco na síntese e fabricação do material mencionado.

A *Perovskite solar cell* tornou-se alvo de pesquisas utilizando diversas técnicas de síntese e fabricação, mas não foram encontradas menções quanto ao custo e a disponibilidade em nenhum estudo, apenas o estudo de Noel et al. (2014) relatou um alto impacto ambiental.

Quanto as *Dye-sensitized solar cell (DSSC)*, apenas o estudo de Vekarya et al. (2016) mencionou o custo baixo, a alta disponibilidade e o baixo impacto ambiental com o foco no desenvolvimento de materiais ambientalmente corretos, porém, o desenvolvimento da pesquisa ainda apresenta resultados com baixa eficiência energética.

No *Quantum dot sensitized solar cell (QDSSC)*, os pontos quânticos são usados para melhorar a eficiência das células solares multijunção aproveitando esta propriedade para a captação de faixas variadas do espectro eletromagnético, apenas escolhendo o material certo. O estudo de Chang et al. (2016) informou sobre a baixa disponibilidade e o estudo de Al-Hosiny et al. (2014) analisou o alto impacto ambiental no desenvolvimento destes materiais. Os demais estudos não informaram o custo, a disponibilidade e o impacto ambiental.

Uma *Multijunction solar cell* utiliza diferentes materiais semicondutores. Fazendo o uso de diferentes materiais é possível um aproveitamento maior dos diferentes comprimentos de onda, aumentando a eficiência de conversão de energia. O seu uso limita-se a projetos especiais, mais especificamente no setor aeroespacial e em sistemas fotovoltaicos concentradores (CPV) nas usinas fotovoltaicas. Somente o estudo de Routray et al. (2018) citou o custo baixo, mas não citou a disponibilidade ou impacto ambiental.

A *Organic photovoltaic (OPV)* utiliza polímeros orgânicos condutores para absorção e

transporte de cargas na produção de energia elétrica utilizando o efeito fotovoltaico. Também são chamadas de células solares poliméricas. As células solares orgânicas exibiram eficiência energética baixa, da ordem de 6% se comparadas às eficiências das células solares de silício cristalino (c-Si) com eficiências de conversão de energia de 20% a 25%. Apenas o estudo de Cao et al. (2014) relatou o baixo custo, a alta disponibilidade e o baixo impacto ambiental sendo um possível material ambientalmente correto.

A *Hybridized solar cell* possui características de semicondutores orgânicos e inorgânicos. São materiais orgânicos que consistem em polímeros que absorvem a luz do espectro eletromagnético e são usados como receptor e transportador de elétrons na estrutura. Estas células solares híbridas exibiram eficiências energéticas baixas, indicando que as pesquisas deste tipo de material necessitam aumentar para iniciar a fabricação em escala industrial.

A *Heterojunction solar cell* produz eletricidade por meio de polímeros semicondutores, com base em macromoléculas orgânicas de derivados de petróleo, cujos processos de fabricação gastam muito menos energia que a utilizada para as células baseadas em semicondutores minerais. Tem custo baixo, são flexíveis, mas a desvantagem é que seu tempo de vida é limitado pela degradação dos polímeros. Estas células poliméricas devem ter a sua eficiência melhorada em laboratório para que seja possível a produção em escala industrial. Somente o estudo de Xu et al. (2018) afirmou que estas células solares possuem custo baixo, o que somado a alta disponibilidade e o baixo impacto ambiental tornando estes materiais ambientalmente corretos e com potencial de uso.

Para as categorias de material tais como a *Singlejunction solar cell*, a *Homojunction solar cell*, a *Polymer solar cell* e o *Graphene film* apresentaram eficiências variadas e não há como determinar o desempenho das eficiências comparando às eficiências das células solares de silício cristalino (c-Si), pois foram recuperados poucos estudos sobre cada material.

6 Conclusão

O estudo teve como objetivo responder a seguinte questão de pesquisa: “Quais são os principais materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas nas dimensões ambiental, de eficiência e de custo baseados na produção acadêmica científica?”. A revisão sistemática da literatura a partir da classificação dos autores e respectivas categorias de estudo, mostrou que diversas tecnologias estão sendo pesquisadas atualmente para suprir a demanda de eletricidade, aproveitando as energias renováveis que são mais ambientalmente corretas. A pesquisa focou principalmente nos estudos sobre os novos materiais que estão sendo desenvolvidos, buscando as melhores eficiências e também menores custos, maior disponibilidade e menor toxicidade.

As pesquisas por novos materiais mais eficientes, com maior tempo de vida e ecologicamente melhores, devem se manter constantes e permanentes, contribuindo desta maneira para o desenvolvimento da economia e do meio ambiente. Novos materiais para energia fotovoltaica devem ser pesquisados e produzidos internamente no país, poderiam ajudar a desenvolver a indústria local, ampliando as cadeias produtivas, com impacto positivo para a economia gerando mais empregos para os governos federal, estadual e municipal, contribuindo também para ampliar o conhecimento científico. Além disso, o uso destes

materiais na elaboração de células e painéis solares pode melhorar e baratear os custos de produção se suas eficiências melhorarem.

O primeiro grupo de células de terceira geração mais significativo foi de *Perovskite solar cell* e a *Multijunction solar cell*, já que possuem potencial de conseguir eficiências mais altas e custos de produção mais baixos, tornando-as baratas e podendo vir a substituir o silício comercialmente no futuro. O segundo grupo representativo de células, a *Dye-sensitized solar cell (DSSC)*, a *Organic photovoltaic (OPV)* e a *Quantum dot sensitized solar cell (QDSSC)* aparecem como células da terceira geração com eficiências similares, mais baixas, com capacidade de substituir as células de silício num futuro um pouco mais longínquo se as eficiências de conversão de energia aumentarem. O terceiro grupo de células mais representativo de terceira geração inclui a *Singlejunction solar cell* e *Heterojunction solar cell*, com eficiência maior que as do segundo grupo, porém os níveis de eficiência relatados ainda estão baixos.

Na revisão sistemática da literatura recuperou-se um grande número de materiais novos em processo de desenvolvimento e concluiu-se que muitas pesquisas estão sendo conduzidas com bons resultados. Alguns ainda não são aceitáveis tecnologicamente em termos de eficiência, mas em um futuro próximo talvez seja possível a utilização da energia solar de forma mais ampla e barata. Para estudos futuros sugere-se investigar outras bases de dados, para recuperar mais artigos sobre o Grafeno, pois é um excelente material semicondutor, sendo encontrado somente um artigo na base de dado pesquisada.

7 Reconhecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e Fundo de Apoio à pesquisa UNINOVE.

8 Referências

AL-HOSINY, N.; ABDALLAH, S.; BADAWI, Ali; EASAWI, K.; TALAAT, H. The photovoltaic performance of alloyed CdTeS_{1-x} quantum dots sensitized solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, [S. l.], v. 26, p. 238–243, 2014. DOI: 10.1016/j.mssp.2014.05.017.

ALSEMA, Erik A.; DE WILD-SCHOLTEN, Mariska J. Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. In **13th CIRP international conference on life cycle engineering**, [S. l.], p. 6, 2006.

BÜHLER, Alexandre José; SANTOS, Fernando Hoefling Dos; GABE, Ivan Jorge. UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018**, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/267>. Acesso em: 18 maio. 2021.

CAO, Weiran; LI, Zhifeng; YANG, Yixing; ZHENG, Ying; YU, Weijie; AFZAL, Rimza; XUE, Jiangeng. “Solar tree”: Exploring new form factors of organic solar cells. *Renewable Energy*, [S. l.], v. 72, p. 134–139, 2014. DOI: 10.1016/j.renene.2014.06.045.

CHANG, Yi-Cheng; SURIYAWONG, Nipapon; ARAGAW, Belete Asefa; SHI, Jen-Bin; CHEN, Peter; LEE, Ming-Way. Lead antimony sulfide (Pb₅Sb₈S₁₇) solid-state quantum dot-sensitized solar cells with an efficiency of over 4%. *Journal of Power Sources*, [S. l.], v. 312, p. 86–92, 2016. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.02.051.

CHEN, Wei; HONG, Jinglan; YUAN, Xueliang; LIU, Jiurong. Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. Part 1, n. 112, p. 1025–1032, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.024.

CHIANG, Tsung-Yu; FAN, Gang-Lun; JENG, Jun-Yuan; CHEN, Kuo-Cheng; Peter; WEN, Ten-Chin; GUO, Tzung-Fang; WONG, Ken-Tsung. Functional p-Type, Polymerized Organic Electrode Interlayer in CH₃NH₃PbI₃

Perovskite/Fullerene Planar Heterojunction Hybrid Solar Cells | ACS Applied Materials & Interfaces. [S. l.], v. 7, n. 44, p. 249732–24981, 2015. DOI: 10.1021/acsami.5b09012.

COOPER, Donald R.; SCHINDLER, Pamela S. Métodos de pesquisa em administração. **Revista de Administração Contemporânea**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 225–225, 2011. DOI: 10.1590/S1415-65552003000300016.

DAVIES, Felipe Souza; FRISSE, Gustavo Luiz; BRANDAO, Matheus Vinicius. A UTILIZAÇÃO DO SILÍCIO NACIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS SOLARES: UMA REFLEXÃO DAS DIFICULDADES TECNOLÓGICA E FINANCEIRA. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018**, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/491>. Acesso em: 18 maio. 2021.

DUTTA, Pranabesh; PARK, Hanok; LEE, Woo-Hyung; KANG, In Nam; LEE, Soo-Hyoung. Synthesis characterization and bulk-heterojunction photovoltaic applications of new naphtho[1,2-b:5,6-b']dithiophene–quinoxaline containing narrow band gap D–A conjugated polymers. **Polymer Chemistry**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 132–143, 2014. DOI: 10.1039/C3PY00911D.

FENG, Hao-Lin; WU, Wu-Qiang; RAO, Hua-Shang; WAN, Quan; LI, Long-Bin; KUANG, Dai-Bin; SU, Cheng-Yong. Three-Dimensional TiO₂/ZnO Hybrid Array as a Heterostructured Anode for Efficient Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells. **ACS Applied Materials & Interfaces**, [S. l.], v. 7, n. 9, p. 5199–5205, 2015. DOI: 10.1021/am507983y.

FERREIRA, André dos Santos; FENATO, Alexandre Junior. Potencial Impacto Ambiental Fotovoltaica. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S. l.], v. 01, n. 06, p. 228–242, 2017.

HERMES, Wilfried; WALDMANN, Daniel; AGARI, Michaela; SCHIERLE-ARNDT, Kerstin; ERK, Peter. Emerging Thin-Film Photovoltaic Technologies. **Chemie Ingenieur Technik**, [S. l.], v. 87, n. 4, p. 376–389, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201400101>.

HOUSE, Ralph L.; IHA, Neyde Yukie Murakami; COPPO, Rodolfo L.; ALIBABAEI, Leila; SHERMAN, Benjamin D.; KANG, Peng; BRENNAMAN, M. Kyle; HOERTZ, Paul G.; MEYER, Thomas J. Artificial photosynthesis: Where are we now? Where can we go? **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, [S. l.], v. 25, p. 32–45, 2015. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2015.08.002.

JOLY, D. et al. Metal-free organic sensitizers with narrow absorption in the visible for solar cells exceeding 10% efficiency. **Energy & Environmental Science**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 2010–2018, 2015. DOI: 10.1039/C5EE00444F.

KAYES, Brendan M.; ZHANG, Ling; TWIST, Rose; DING, I.-Kang; HIGASHI, Gregg S. Flexible Thin-Film Tandem Solar Cells With >30% Efficiency. **IEEE Journal of Photovoltaics**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 729–733, 2014. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2299395.

KUMAR, Manish; KUMAR, Arun. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 78, p. 554–587, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.083.

LUNARDI, Marina Monteiro; HO-BAILLIE, Anita Wing Yi; ALVAREZ-GAITAN, Juan Pablo; MOORE, Stephen; CORKISH, Richard. A life cycle assessment of perovskite/silicon tandem solar cells. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [S. l.], v. 25, n. 8, p. 679–695, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.2877>.

MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.

MI, Dongbo; KIM, Ji-Hoon; KIM, Hee Un; XU, Fei; HWANG, Do-Hoon. Fullerene derivatives as electron acceptors for organic photovoltaic cells. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 1064–1084, 2014. DOI: 10.1166/jnn.2014.9007.

MITRA, Kalyan Yoti; ALALAW, Abdelrahman; VOIGT, Stefanie; BOEFFEL, Christine; BAUMANN, Reinhard R. Manufacturing of All Inkjet-Printed Organic Photovoltaic Cell Arrays and Evaluating Their Suitability for Flexible Electronics. **Micromachines**, [S. l.], v. 9, n. 12, 2018. DOI: 10.3390/mi9120642. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6316076/>. Acesso em: 18 maio. 2021.

NOEL, Nakita K. et al. Lead-free organic–inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications. **Energy & Environmental Science**, [S. l.], v. 7, n. 9, p. 3061–3068, 2014. DOI: 10.1039/C4EE01076K.

OGBOMO, Osarumen O.; AMALU, Emeka H.; EKERE, N. N.; OLAGBEGI, P. O. A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 75, p. 1225–1238, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.109.

OPWIS, Klaus; GUTMANN, Jochen Stefan; LAGUNAS ALONSO, Ana Rosa; RODRIGUEZ HENCHE, Maria Jesus; EZQUER MAYO, Mikel; BREUIL, Fanny; LEONARDI, Enrico; SORBELLO, Luca. Preparation of a Textile-Based Dye-Sensitized Solar Cell. **International Journal of Photoenergy**, [S. l.], v. 2016, p. e3796074, 2016. DOI: 10.1155/2016/3796074.

O'REGAN, Brian; GRÄTZEL, Michael. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. **Nature**, [S. l.], v. 353, n. 6346, p. 737–740, 1991. DOI: 10.1038/353737a0.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 18 maio. 2021.

ROUTRAY, Soumyaranjan; LENKA, Trupti Ranjan. Polarization Charges in a High-Performance GaN/InGaN Core/Shell Multiple Quantum Well Nanowire for Solar Energy Harvesting. **IEEE Transactions on Nanotechnology**, [S. l.], v. 17, n. 6, p. 1118–1124, 2018. DOI: 10.1109/TNANO.2018.2848287.

TEIXEIRA, Marco Antonio Casadei. **Perspectivas do potencial estratégico de novos materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas**. 2019. Disponível em: <http://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/2149>. Acesso em: 22 maio. 2021.

VALLÊRA, António M.; BRITO, Miguel Centeno. Meio século de História Fotovoltaica. **Gazeta de Física**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 17, 2006.

VEKARIYA, Rohit L.; SONIGARA, Keval K.; FADABU, Kishan B.; VAGHASIYA, Jayraj V.; SONI, Saurabh S. Humic Acid as a Sensitizer in Highly Stable Dye Solar Cells: Energy from an Abundant Natural Polymer Soil Component | ACS Omega. **ACS Omega**, [S. l.], v. 1, p. 14–18, 2016. DOI: 10.1021/acsomega.6b00010.

XU, Yafeng et al. Solution-processed CuSbS₂ solar cells based on metal–organic molecular solution precursors. **Journal of Materials Science**, [S. l.], v. 53, n. 3, p. 2016–2025, 2018. DOI: 10.1007/s10853-017-1663-8.