

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM CIDADES INTELIGENTES E
SUSTENTÁVEIS

MARCO ANTONIO CASADEI TEIXEIRA

PERSPECTIVAS DO POTENCIAL ESTRATÉGICO DE NOVOS MATERIAIS
ALTERNATIVOS AO SILÍCIO PARA A PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS

São Paulo

2019

MARCO ANTONIO CASADEI TEIXEIRA

**PERSPECTIVAS DO POTENCIAL ESTRATÉGICO DE NOVOS MATERIAIS
ALTERNATIVOS AO SILÍCIO PARA A PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre** em Cidades Inteligentes e Sustentáveis.

Orientadora: Prof.(a). Dr.(a) Heidy Rodriguez Ramos

São Paulo

2019

Teixeira, Marco Antonio Casadei.

Perspectivas do potencial estratégico de novos materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas.

/ Marco Antonio Casadei Teixeira. 2019.

121 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2019.

Orientador (a): Prof^ª. Dr^ª. Heidy Rodriguez Ramos.

1. Células fotovoltaicas. 2. Energia solar fotovoltaica. 3. Patentes. 4. Silício. 5. Tecnometria.

I. Ramos, Heidy Rodriguez. II. Titulo.

CDU 711.4

**PERSPECTIVAS DO POTENCIAL ESTRATÉGICO DE NOVOS MATERIAIS
ALTERNATIVOS AO SILÍCIO PARA A PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES
FOTOVOLTAICAS**

Por

Marco Antonio Casadei Teixeira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre** em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, apresentada à Banca Examinadora formada por:

Prof.(a) Dr.(a) Heidy Rodriguez Ramos – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof.(a) Dr.(a) Andreza Portella Ribeiro – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof.(a) Dr.(a) Marcela Barbosa de Moraes – Universidade de Taubaté – UNITAU

São Paulo, 11 de Dezembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Cláudia e ao meu filho Murilo por terem me dado todo o apoio e terem a compreensão necessários para que eu pudesse chegar aqui.

E em particular aos meus pais Marcionílio e Eni (in memoriam), os pilares de minha vida que sempre se dedicaram a me oferecer as melhores condições para que os meus sonhos pudessem se tornar realidade.

AGRADECIMENTO

Agradeço a minha orientadora, Prof.(a) Dr.(a) Heidy Rodriguez Ramos, pela confiança depositada no desenvolvimento dessa pesquisa. Pela paciência nas orientações, dedicando seu tempo em me esclarecer as dúvidas nos momentos que eu mais precisei para o sucesso deste estudo.

Também agradeço ao Prof. Dr. Alexandre de Oliveira e Aguiar por me desafiar a utilizar diversas ferramentas que foram essenciais para os estudos até aqui realizados quando eu tinha muitas dúvidas e pelos conhecimentos transmitidos ao longo de todas as reuniões de que participei.

A todos os meus amigos do Programa de Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis pelas conversas, diálogos, cafés, colaboração e por toda a amizade além da sala de aula.

A toda minha família por me apoiarem, e entenderem minha ausência em algumas viagens e celebrações.

A todos que contribuíram com sugestões, dicas e observações importantes para mim e para que esta pesquisa fosse concluída com êxito, o meu muito OBRIGADO!

"Você nunca sabe que resultados virão da sua ação, mas se você não fizer nada, não existirão resultados." - Mahatma Gandhi.

RESUMO

A matriz energética brasileira é essencialmente constituída por energias renováveis de natureza hidráulica, uma maior diversificação dessas energias limpas por meio da ampliação dos estudos na área da energia solar fotovoltaica é um importante caminho para obtenção da sustentabilidade ambiental. A energia solar sendo uma energia renovável pode ser transformada em eletricidade por meio de painéis solares diretamente da irradiação solar recebida. O Brasil é um país que recebe uma quantidade razoável de irradiação solar ao longo do ano e esta tecnologia apresenta vantagens como instalação e manutenção com custos baixos e principalmente a não geração de impactos ambientais 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. As tecnologias de filmes finos, orgânicas, múltiplas junções e *perovskita* entre outras oferecem a oportunidade de reduzir custos, serem flexíveis, terem baixo peso e transparência com a possibilidade de conquista de novos nichos de mercados. 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 foram realizados dois estudos interligados e sequenciais. O primeiro estudo realizou uma revisão sistemática da literatura, que permitiu recuperar as principais pesquisas sobre os materiais mais estudados. Os materiais mais promissores e alternativos ao silício foram agrupados em 11 categorias diferentes, sendo as principais as células de filme fino (A-Si, CdTe, CIGS, GaAs), as células Multijunção (*Hybrid, Multijunction, Single-junction*), as células solares *perovskita* (PSC), as células sensibilizadas por corantes (DSSC), as células orgânicas (OPV) e as células de ponto quântico (QDSSC). Com as principais categorias de materiais selecionadas, foi realizado um segundo estudo Cientométrico complementar para recuperar as informações de patentes não protegidas no Brasil no banco de dados *PATENTSCOPE*. Finalmente, utilizando os resultados dos dois estudos, foi possível analisar os nomes dos inventores, os países de origem, as datas de depósitos, as empresas depositantes, o título, o resumo e a classificação tecnológica para eventual aproveitamento dessas informações para uso solar fotovoltaico no Brasil. Deste modo, foi possível dizer que as informações obtidas para a tecnologia solar fotovoltaica, puderam ser analisadas e as informações poderão ser utilizadas para a ampliação do conhecimento das tecnologias que compõem as células solares fotovoltaicas.

Palavras-chave: Células Fotovoltaicas; Energia Solar Fotovoltaica; Patentes; Silício; Tecnometria.

ABSTRACT

The Brazilian energy matrix is essentially made up of hydropower renewable energies, a greater diversification of these clean energies through the expansion of studies in the field of photovoltaic solar energy is an important way to achieve environmental sustainability. Solar energy being a renewable energy can be transformed into electricity through solar panels directly from the received solar radiation. Brazil is a country that receives a reasonable amount of solar radiation throughout the year and this technology has advantages such as installation and maintenance with low costs and especially the non-generation of environmental impacts during the operation phase. The photovoltaic market is dominated by silicon technology, but new second and third generation cell technologies are being developed. Thin-film, Organic, Multi-junction and Perovskite film technologies, among others, offer the opportunity to reduce costs, be flexible and have low weight and transparency with the possibility of conquering new niche markets. From this point of view, the overall objective of the research was: "To analyze materials with strategic potential to compete with silicon in the composition of photovoltaic solar cells." Therefore, two interconnected and sequential studies were performed. The first study performed a systematic literature review, which allowed us to recover the main research on the most studied materials. The most promising and alternative silicon materials were grouped into 11 different categories, the main ones being Thin-film cells (A-Si, CdTe, CIGS, GaAs), Multijunction cells (Hybrid, Multijunction, Single-junction), Perovskite cells (PSC), Dye-sensitized cells (DSSC), Organic cells (OPV) and Quantum dot cells (QDSSC). With the main categories of materials selected, a second complementary scientific study was performed to retrieve the information on unprotected patents in Brazil in the PATENTSCOPE database. Finally, using the results of the two studies, it was possible to analyze the names of the inventors, the countries of origin, the dates of deposits, the depositing companies, the title, the summary and the technological classification for possible use of this information for photovoltaic solar use in the Brazil. Thus, it was possible to say that the information obtained for solar photovoltaic technology could be analyzed and the information could be used to expand the knowledge of the technologies that make up photovoltaic solar cells.

Keywords: Photovoltaic solar energy; silicon; photovoltaic cells; Patents.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte
- Figura 1.2 Fluxograma da pesquisa.
- Figura 2.1 Médias mensais da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa (kWh/m². dia).
- Figura 2.2 Principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes atualmente.
- Figura 2.3 Termo de busca utilizado na base de dados *SCOPUS Elsevier*.
- Figura 2.4 Procedimentos metodológicos.
- Figura 2.5 Artigos publicados no período 2014 a 2018.
- Figura 2.6 Artigos por ano e por fonte.
- Figura 2.7 Artigos por país ou território.
- Figura 2.8 Eficiência de conversão energética por classe de materiais.
- Figura 3.1 Cadeia produtiva da indústria fotovoltaica.
- Figura 3.2 Estrutura de um painel fotovoltaico.
- Figura 3.3 Estrutura de materiais sólidos: a) monocristalino; b) policristalino; c) amorfo.
- Figura 3.4 Estrutura cristalina da *perovskita*.
- Figura 3.5 Eficiência de dispositivos fotovoltaicos por categorias.
- Figura 3.6 Células Multijunção do tipo *Wafer*.
- Figura 3.7 Pesquisa por mapa conceitual das palavras-chave no *WIPO Pearl*.
- Figura 3.8 Evolução das publicações de patentes para o material *Perovskite solar cell*.
- Figura 3.9 Países com publicações de patentes para o material *Perovskite solar cell*.
- Figura 3.10 Países dos inventores depositantes de patentes para o material *Perovskite solar cell*.
- Figura 3.11 Empresas depositantes de pedidos de patentes para o material *Perovskite solar cell*.
- Figura 3.12 Principais assuntos das patentes publicadas para o material *Perovskite solar cell*.
- Figura 3.13 Principais códigos IPCR4 das patentes publicadas para o material *Perovskite solar cell*.
- Figura 3.14 Tecnologias envolvidas na configuração da patente *CN107146847*.
- Figura 3.15 Tela inicial da aplicação *PATENTSCOPE*.
- Figura 3.16 Tela do *PATENTSCOPE* com as informações detalhadas da patente.
- Figura 3.17 Tela do *PATENTSCOPE* com as informações do campo *Abstract*.
- Figura 3.18 Evolução das publicações de patentes para o material *Multijunction solar cell*.
- Figura 3.19 Países com publicações de patentes para o material *Multijunction solar cell*.
- Figura 3.20 Países dos inventores depositantes de pedidos de patentes para o material *Multijunction solar cell*.
- Figura 3.21 Empresas depositantes de pedidos de patentes para o material *Multijunction solar cell*.
- Figura 3.22 Principais assuntos das patentes publicadas para o material *Multijunction solar cell*.
- Figura 3.23 Principais códigos IPC das patentes publicadas para o material *Multijunction solar cell*.
- Figura 3.24 Tecnologias envolvidas na configuração da patente *US20150090321*.
- Figura 3.25 Tela inicial da aplicação *PATENTSCOPE*.
- Figura 3.26 Tela do *PATENTSCOPE* com as informações detalhadas da patente.
- Figura 3.27 Tela do *PATENTSCOPE* com as informações do *Abstract*.
- Figura 3.28 Patente recuperada no site *PATENTSCOPE* com proteção mundial.
- Figura 3.29 Patentes publicadas e protegidas para as extrações 01 e 02.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Matriz Metodológica (MM)

Tabela 2.1 Artigos recuperados e selecionados da Base de dados *SCOPUS*.

Tabela 2.2 Artigos selecionados de acordo como o tema escolhido.

Tabela 2.3 Categoria de material *Perovskite solar cells*.

Tabela 2.4 Categoria de material *Dye-sensitized solar cells (DSSC)*.

Tabela 2.5 Categoria de material *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)*.

Tabela 2.6 Categoria de material *Multijunction solar cells*.

Tabela 2.7 Categoria de material *Organic photovoltaic (OPV)*.

Tabela 2.8 Categoria de material *Hybridized solar cells*.

Tabela 2.9 Categoria de material *Heterojunction solar cells*.

Tabela 2.10 Categoria de material *Single-junction solar cells, Polymer solar cells (PSC), Homojunction solar cell e Graphene films*.

Tabela 3.1 Comparativo de eficiência entre células fotovoltaicas de tecnologias de silício e *Thin film*.

Tabela 3.2 Classificação Internacional de Patentes (IPC).

Tabela 3.3 Comparativa de materiais e quantidade de patentes recuperadas.

Tabela 3.4 Materiais selecionados para a pesquisa.

Tabela 3.5 Palavras-chave inseridas no *PATENTSCOPE*.

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

μm	<i>Micrometro ($1 \times 10^{-6} \text{ m}$)</i>
<i>A-Si</i>	<i>Amorphous silicon</i>
<i>CdTe</i>	<i>Cadmium telluride</i>
<i>CIGS</i>	<i>Copper Indium Gallium Sulfide/Selenide</i>
<i>CIS</i>	<i>Copper Indium Selenide</i>
<i>CO₂</i>	<i>Dioxide of carbon</i>
<i>C-Si</i>	<i>Crystalline silicon)</i>
<i>CSV</i>	<i>Comma-separated values</i>
<i>DDP</i>	<i>Diferença de potencial</i>
<i>DSSC</i>	<i>Dye-sensitized solar cell</i>
<i>FTO</i>	<i>Fluorine Tin Oxide</i>
<i>GaAs</i>	<i>Gallium arsenide</i>
<i>GEE</i>	<i>Gases do Efeito Estufa</i>
<i>HTM</i>	<i>Hole transporting material</i>
<i>Mono-Si</i>	<i>Monocrystalline Silicon</i>
<i>MW</i>	<i>Megawatt ($1 \times 10^6 \text{ Watts}$)</i>
<i>Nm</i>	<i>Nanómetros ($1 \times 10^{-9} \text{ m}$)</i>
<i>OPV</i>	<i>Organic Photovoltaic</i>
<i>P3HT</i>	<i>Poly-3-hexyl-thiophene</i>
<i>PCBM</i>	<i>Phenyl-C61-butyric acid methyl ester</i>
<i>PCE</i>	<i>Power conversion efficiency</i>
<i>Poly-Si</i>	<i>Polycrystalline silicon</i>
<i>SJR</i>	<i>SCImago Journal Rank</i>
<i>TF</i>	<i>Thin-film</i>
<i>TW</i>	<i>Terawatt ($1 \times 10^{12} \text{ Watts}$)</i>
<i>Wafer</i>	<i>Fina fatia de material semiconductor</i>
<i>WIPO</i>	<i>World Intellectual Property Organization</i>
<i>IPC</i>	<i>The International Patent Classification</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Problema central de pesquisa	15
1.1.1 Questão central de pesquisa	18
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 Justificativa	19
1.4 Estrutura do trabalho	21
2 ESTUDO 1: MATERIAIS ALTERNATIVOS AO SILÍCIO PARA A PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.	24
2.1 Introdução	24
2.2 Referencial Teórico	25
2.2.1 Tecnologias fotovoltaicas	25
2.2.2 Os principais materiais	27
2.3 Procedimentos metodológicos	31
2.3.1 Procedimentos de coleta dos dados	32
2.3.2 Procedimentos de análise de dados.....	33
2.4 Resultados	34
2.4.1 Análise dos materiais por categoria	38
2.4.2 Análise da categoria de material <i>Perovskite solar cells</i>	40
2.4.3 Análise da categoria de material <i>Dye-sensitized solar cells (DSSC)</i>	43
2.4.4 Análise da categoria de material <i>Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)</i>	45
2.4.5 Análise da categoria de material <i>Multijunction solar cells</i>	47
2.4.6 Análise da categoria de material <i>Organic photovoltaic (OPV)</i>	49
2.4.7 Análise da categoria de material <i>Hybridized solar cells</i>	51
2.4.8 Análise da categoria de material <i>Heterojunction solar cells</i>	53
2.4.9 Análise das categorias de materiais <i>Singlejunction solar cells, Polymer solar cells (PSC), Heterojunction solar cell e Graphene films</i>	55
2.5 Discussão	57
2.6 Considerações Finais.....	62
Referências.....	64
3 ESTUDO 2: PANORAMA DAS PATENTES RELATIVAS AOS MATERIAIS ALTERNATIVOS AO SILÍCIO PARA A PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS.....	66
3.1 Introdução	66
3.2 Referencial Teórico	68
3.2.1 Inovação e sustentabilidade	68
3.2.2 A energia solar fotovoltaica	70

3.2.3 Mineração de Dados.....	77
3.3 Procedimentos metodológicos	80
3.3.1 Procedimentos de coleta dos dados	81
3.3.2 Procedimentos de análise de dados.....	84
3.4 Resultados	85
3.5 Discussão	107
3.6 Considerações Finais	109
Referências.....	111
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA DISSERTAÇÃO.....	115
4.1 Conclusão integradora	117
4.2 Limitações e sugestões para estudos futuros.....	117
Referências.....	119

1 INTRODUÇÃO

As reservas de combustível fóssil foram formadas a partir de resíduos orgânicos há milhares de anos e são consideradas não renováveis. Já as energias renováveis não agredem o meio ambiente e são inesgotáveis (Goldenberg & Lucon, 2007).

O aumento mundial do uso de combustíveis fósseis devido ao aumento da população, ao crescimento industrial, à migração da população para áreas urbanas e o aumento da renda, está provocando um aumento rápido dos gases do efeito estufa (GEE) neste século. Os principais gases do efeito estufa são Dióxido de Carbono (CO₂), o Clorofluorcarbono (CFC), o Metano (CH₄), o Ácido nítrico (HNO₃) e o Ozônio (O₃). Mas o principal deles é o Dióxido de carbono (CO₂) que com a intensificação da ação humana tem seu aumento ampliado na atmosfera, levando a um aquecimento maior do planeta. Usar recursos renováveis é primordial para a diminuição dos impactos ambientais e pode ser aplicado, para a produção de energia, tais como a energia solar, a energia eólica, a energia hidroelétrica, a biomassa e a energia geotérmica, algumas das principais fontes de energia disponíveis limpas e verdes (Pazheri, Othman, & Malik, 2014).

O chamado mercado de “energias verdes” aparece como uma possível alternativa ao uso de combustíveis fósseis, principalmente para a diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e dos GEE (Atlas de energia elétrica do Brasil, 2008).

A preocupação com o desenvolvimento ambiental sustentável e o uso de “energias verdes” foi sintetizada na Conferência do Clima de Paris, chamada de 21ª Conferência das Partes (COP21), ratificado por 197 países. Este acordo prevê a redução das emissões dos GEE para que o aumento da temperatura global do planeta fique bem abaixo de 2 °C no fim deste século (Rhodes, 2016).

O *Global Status Report - GSR (2016)* editado pela Rede de Energias Renováveis para o Século XXI, enfatiza que o setor elétrico aumentou significativamente o uso de energias renováveis no mundo em 2015, destacando que a energia solar teve um acréscimo de 50 GW na capacidade disponível, totalizando 227 GW de potência (REN 21, 2016).

O uso das energias renováveis, no consumo final total de energia passou de 8,7% em 2000 para mais de 10% em 2017 e com previsão de atingir em 2030 cerca de 20%. Atualmente a parcela de participação do Brasil neste consumo é de 42%, bem acima da média mundial e deve-se ao grande aproveitamento do potencial hídrico do país (IEA, 2018).

É um acréscimo significativo, pois das muitas formas de energia utilizadas no mundo, tais como a energia elétrica seria a primeira mais aproveitada correspondendo a 18,8%, sendo o óleo a segunda com 40,9%. De acordo com dados do ano de 2018, a nível mundial a energia elétrica é gerada 38,4 % por carvão, 23,2 % por gás natural, 3,7 % por óleo e 10,4% por energia nuclear, que são fontes de energia não renováveis, totalizando 75,7%. Já dentre as fontes de energias renováveis, a hidroeletricidade, corresponde a 16,3 % e a energia solar fotovoltaica corresponde a 8,0 %. O consumo total de energia de todas as fontes de energia (fósseis, renovável e nuclear) foi de 24.973 TWh em 2016 (Millard, 2018).

O sistema energético brasileiro é constituído expressivamente por energias renováveis, tais como a hidroeletricidade. Essas fontes de energia são importantes para um desenvolvimento econômico e sustentável (Goldenberg & Moreira, 2005).

Segundo o Balanço Energético Nacional - BEN (2018) no ano base 2017, as fontes hídricas contribuíram com aproximadamente 65,2% da disponibilidade de energia elétrica e as fontes renováveis com 80,4% do total. A geração de eletricidade por fonte solar fotovoltaica alcançou cerca de 170 GWh com uma potência instalada de 175 MW (EPE, 2018).

O Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2008) enfatiza que a participação da energia solar na matriz mundial aumentou cerca de 2000% de 1996 a 2006 atingindo 7,8 mil MW de potência instalada, mas no Brasil esta fonte de energia limpa é insignificante e por pouco não chega a ser citada.

Segundo Vichi e Mansor (2009) se apenas uma ínfima parcela da radiação solar fosse transformada ela já seria quatro vezes maior que toda a energia gerada, que é cerca de 3000 GW. A geração fotovoltaica propicia o aumento da carga gerada e é um complemento à geração hidrelétrica em períodos de falta de chuva, e também é geradora de empregos na indústria fotovoltaica em regiões de maior irradiação solar com baixo desenvolvimento econômico, afirmam Carvalho, Mesquita e Rocio (2014).

1.1 Problema central de pesquisa

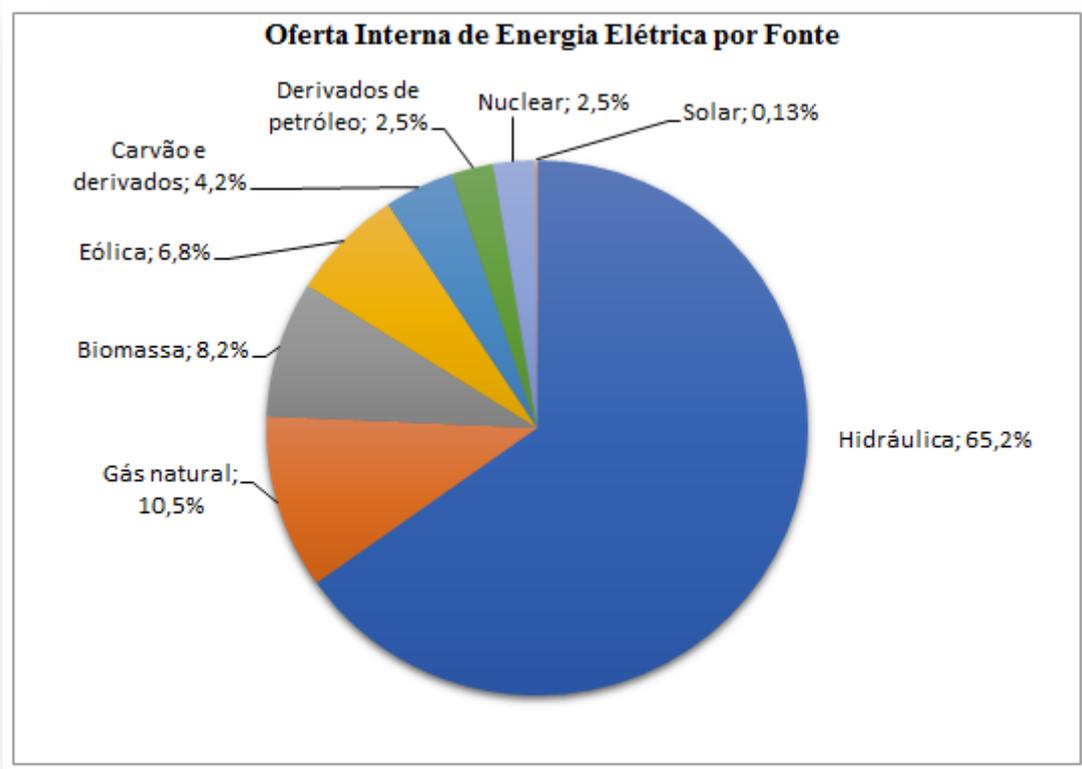
As chamadas fontes renováveis aparecem como possível alternativa aos combustíveis fósseis por serem ambientalmente corretas e permitirem a diminuição de GEE, além de serem uma alternativa a enormes usinas hidroelétricas de grande porte (UHE), que para serem construídas exigem um consumo expressivo de metros cúbicos de concreto, estudos de geologia e topografia, projetos de fundação, a necessidade de quedas d'água e a

principalmente a construção de barragens que inundam grandes áreas impactando o meio físico (Atlas de energia elétrica do Brasil, 2008).

Quanto à energia hidráulica no país, em virtude das alterações climáticas, devem-se considerar períodos prolongados de falta de chuva que acabam por reduzir o volume de água dos reservatórios das hidrelétricas. Quando isso ocorre é necessário o acionamento das termoeletricas a lenha, diesel e/ou carvão, as quais temporariamente aumentam os níveis de emissão de CO₂ na atmosfera. Nessa perspectiva, buscar por novas fontes de energia, além da hidráulica é importante para diferenciar a matriz energética brasileira (Jordani, 2018).

Investir na massificação da geração fotovoltaica gera a necessidade de equilíbrio entre a oferta e a demanda de energia. O surgimento de novas fontes de geração de energia deve vir acompanhado de aperfeiçoamentos na regulação e principalmente nas pesquisas, de modo que seja estabelecido um ambiente favorável para a realização da modernização das redes (Tolmasquim, 2016).

A Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira passou de 619,7 TWh para 624,3 TWh, um acréscimo de 0,74% em relação ao ano de 2016. Em relação ao aumento da oferta interna de energia solar houve um acréscimo de disponibilidade de cerca de 880%, sobre uma base pequena de cerca 0,13%, conforme Figura 1.1 (MME, 2018).

Figura 1.1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte

Fonte: EPE (2018)

Embora a energia solar fotovoltaica seja considerada de maneira geral mais limpa que outras, em particular quando comparada a fontes fósseis, ela não é isenta de impactos ambientais. Com relação às células fabricadas a base de silício, Filho et al. (2015) destacaram que na extração desta matéria-prima há a degradação do meio biótico com a emissão de poeiras e gases devido à perfuração de rochas. Hong et al. (2016) fizeram a análise do ciclo de vida (ACV) do processo de produção do silício e confirmaram altos impactos ambientais para energias não-renováveis, aquecimento global, agentes cancerígenos, agentes não cancerígenos, ecotoxicidade terrestre, extração mineral e também alto consumo de eletricidade durante os estágios de produção.

Tyagi (2013) enfatiza que a purificação do silício causa a emissão de Óxido de Enxofre (SO_x), Óxido de Nitrogênio (NO_x) e Dióxido de Carbono (CO_2). Estes gases quando combinados com a água contribuem para a precipitação de chuva ácida, a emissão de GEE e o aquecimento global.

Existem pesquisas de materiais para células fotovoltaicas que buscam obter células mais eficientes, de menor custo, diminuindo o consumo de energia na fabricação e permitindo a produção em larga escala.

Nesse sentido, Wade, Stolz, Frischknecht, Heath & Sinha (2018) relataram que a União Europeia através da Agência Internacional de Energia (AIE, em inglês *International Energy Agency*) adotou o programa Sistema de energia solar fotovoltaica para reunir informações confiáveis sobre todo o ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos comparando produtos e os impactos ambientais incentivando seu uso. Por exemplo, uma das principais questões é o consumo de energia e a emissão de Dióxido de Carbono (CO₂) nos edifícios comerciais e residenciais. Os governos europeus no esforço de fazer um uso melhor da energia disponível e um maior uso das energias renováveis incentivam a ativação de painéis fotovoltaicos no revestimento dos edifícios, afirmam Machete, Falcão, Gomes e Moret Rodrigues (2018).

Assim, a tecnologia fotovoltaica é uma importante ferramenta de suprimento de energia que opera com o mínimo de insumos, possui uma baixa emissão de carbono durante a operação e possui uma vida útil longa (Overholm, 2015).

1.1.1 Questão central de pesquisa

Avaliando a situação apresentada, este estudo busca resposta para a seguinte questão de pesquisa: “Quais materiais tem potencial estratégico de concorrer com o silício na composição de células solares para geração fotovoltaica?”.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Com o intuito de responder ao questionamento da pesquisa, este estudo tem como objetivo: Analisar os materiais com potencial estratégico para competir com o silício na composição de células solares fotovoltaicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Identificar os materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas nas dimensões ambiental, de eficiência e de custo citados na literatura científica.

b) Analisar o panorama das patentes relativas aos materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas.

A dissertação está estruturada em dois estudos, que serão desenvolvidos sequencialmente e de forma interdependente entre si. Essa estrutura será explicada no item 1.4 desta pesquisa.

1.3 Justificativa

Os recursos energéticos devem ser acessíveis, suficientes e com preços estáveis (Sandor, Fulton, Engel-Cox, Peck, & Peterson, 2018). Devem ainda ter disponibilidade geológica, acessibilidade econômica, geopolítica e aceitabilidade ambiental e social (Kruyt, van Vuuren, de Vries, & Groenenberg, 2009).

Neste sentido o Brasil possui competitividade por ter grande mercado, abundância de recursos naturais e alto potencial de geração de energia renovável a baixos custos relativos. Essas características são inerentes à nossa realidade e necessitam ser geridas de forma permanente e de forma sustentável para possuímos uma matriz energética mais limpa (Ministério das Minas e Energia, 2007).

A geração de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica contribui para a redução da geração de poluentes que causam os GEE. Este fato por si só já justifica os investimentos em pesquisa de tecnologias que se sobressaiam como novas tendências que contribuam para o incremento da microgeração de energia solar fotovoltaica (Carvalho et al., (2014).

A partir do momento da fase de uso dos sistemas fotovoltaicos nenhum combustível fóssil ou GEE é consumido ou gerado, mas uma quantidade considerável é gerada especialmente na etapa de produção. Um enfoque utilizado para verificar estes gastos e suas respectivas emissões é a análise do impacto ambiental de produto, medindo a quantidade de matéria-prima utilizada, analisando o gasto energético e os poluentes lançados no meio ambiente. Na cadeia de produção do silício monocristalino (Mono-Si) o mercúrio, o arsênico e o chumbo são as substâncias geradas mais expressivas para a toxicidade da saúde humana. E o níquel e o cobre, que são gerados principalmente a partir da pasta prata (Ag) e da produção de vidro, são as que mais causam a ecotoxicidade aos organismos marinhos. A melhora da eficiência energética na produção, o aumento da utilização dos sistemas fotovoltaicos e a

instalação destes sistemas em regiões com boa irradiação solar é necessária para diminuir a carga de poluentes com impacto ambiental (Chen, Hong, Yuan, & Liu, 2016).

O ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos inicia-se a partir da extração da matéria-prima e finaliza-se com o rejeito ou reciclagem de seus componentes. A maioria dos sistemas fotovoltaicos utiliza o silício para compor as células fotovoltaicas, para a produção dos dispositivos tecnológicos conhecidos, inclusive as tecnologias solares fotovoltaicas. Os módulos fotovoltaicos são produzidos em várias etapas, com o silício purificado em grau solar (de pureza 99,9999%, seis noves), por meio de vários métodos que consomem uma quantidade considerável de energia para torná-lo altamente purificado (Ludin et al., 2018).

A eficácia das tecnologias fotovoltaicas na redução das emissões de GEE durante o processo de fabricação determina o aquecimento global em comparação com as tecnologias baseadas em combustível fóssil. O potencial de toxicidade humana é o impacto ambiental que um processo ou produto pode causar na saúde humana como consequência de substâncias tóxicas emitidas para o ambiente (ar, água e solo). Já o potencial de eutrofização de água doce é resultado da adição de quantidades excessivas de nutrientes, nitrogênio (N) e fósforo (P), em alguns ambientes aquáticos. E o potencial de ecotoxicidade da água doce refere-se ao impacto nos ecossistemas de água doce, como resultado das emissões de substâncias tóxicas para o ar, a água e o solo (Lunardi, Ho-Baillie, Alvarez-Gaitan, Moore, & Corkish, 2017).

O mercado fotovoltaico tem realizado pesquisas para produzir energia com mais eficiência, voltando seus esforços no desenvolvimento de produtos, que além de gerarem energia tenham aparência diferente dos módulos tradicionais. As tecnologias de segunda e terceira geração representam então essa expectativa para o futuro em razão do aumento da eficiência, a diminuição de custos e o menor impacto ambiental (Bühler, Santos, & Gabe, 2018).

Esta dissertação tem o formato de dois estudos interligados e sequenciais. Estes estudos justificam-se pela necessidade de prospecção de publicações e informações patentárias no âmbito nacional e internacional, que tragam informações importantes sobre as tendências tecnológicas sobre materiais para composição de células solares fotovoltaicas na base *SCOPUS* e na *Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI; em inglês, World Intellectual Property Organization, WIPO)* realizados nos Estudo 1 e Estudo 2, respectivamente.

A dissertação procura com o conhecimento descrito nos artigos recuperados da base *SCOPUS* e as informações disponíveis para replicação nas patentes depositadas no *World Intellectual Property Organization (WIPO)*, trazer contribuições para a academia e para os estudiosos sobre o tema, para o aproveitamento destas tecnologias no âmbito nacional.

1.4 Estrutura do trabalho

A presente pesquisa está estruturada em dois estudos, dependentes entre si e iniciados de forma sequencial.

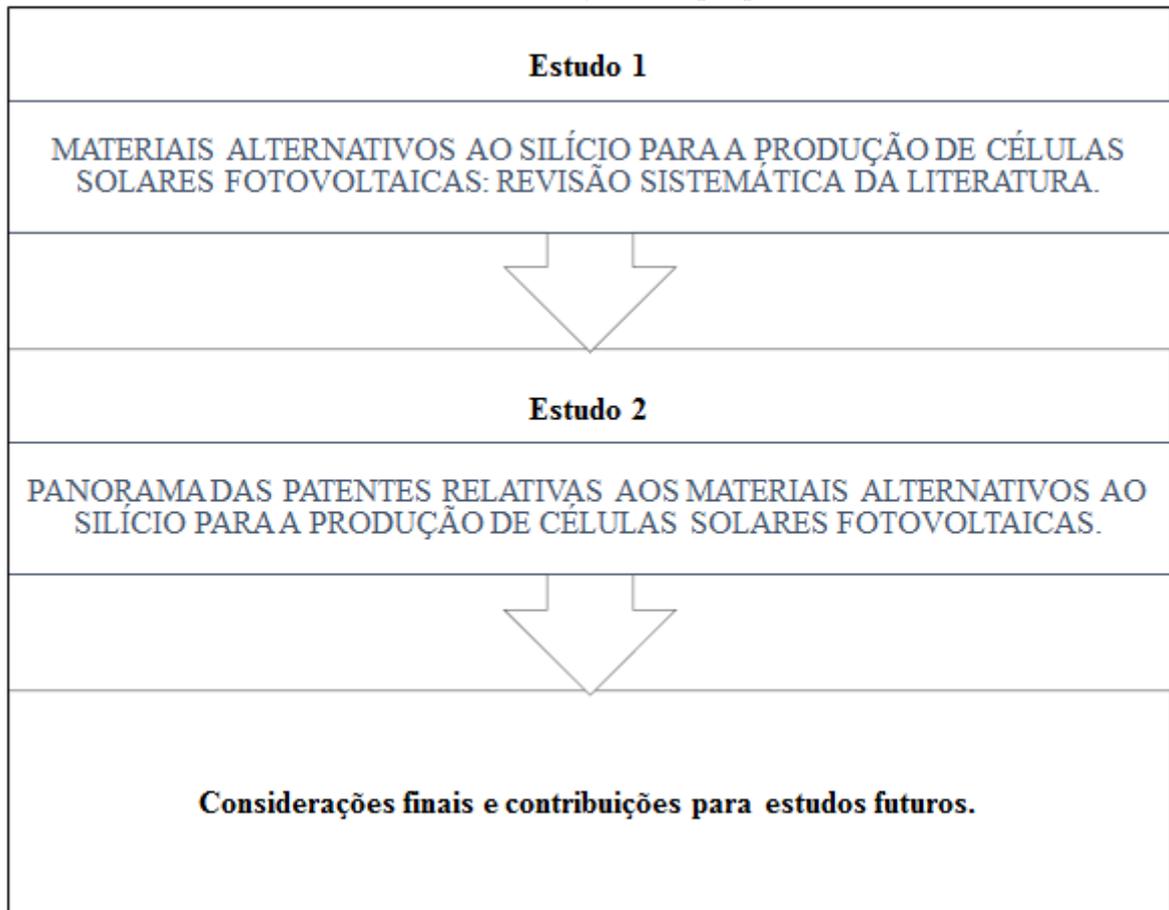
O Capítulo 1 contém a introdução, o problema central da pesquisa, a questão central de pesquisa, o objetivo geral e os específicos e a justificativa da pesquisa.

O Capítulo 2 contém o estudo 1 que procura identificar os materiais alternativos ao silício como tendência tecnológica que estão sendo pesquisados como potencial solução aos problemas ambientais causados pela utilização do silício, com o olhar da produção acadêmica.

O Capítulo 3 aborda o estudo 2 que procura identificar as patentes relativas aos materiais selecionados como potenciais substitutos do silício, principalmente com patentes não protegidas no Brasil disponíveis no banco de dados de patentes *PATENTSCOPE*.

Cada um dos dois estudos apresentam os resultados da pesquisa, a análise, interpretação e discussão dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta as considerações finais e contribuições para a prática da dissertação, assim como as limitações da pesquisa e sugestões de estudos futuros. A Figura 1.2 apresenta de forma resumida o fluxograma da pesquisa.

Figura 1.2 Fluxograma da pesquisa.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A seguir é apresentada a Matriz Metodológica que resume a estrutura da dissertação em estudos. Cada estudo apresenta uma questão de pesquisa e objetivos específicos, conforme a Tabela 1.1.

Tabela 1.1 Matriz Metodológica (MM).

QUESTÃO CENTRAL DE PESQUISA: Quais os materiais tem potencial estratégico de concorrer com o silício na composição de células solares fotovoltaicas?						
OBJETIVO GERAL: Analisar os materiais com potencial estratégico para competir com o silício na composição de células solares fotovoltaicas.						
JUSTIFICATIVA DE DISTINÇÃO			JUSTIFICATIVA DE INTERDEPENDÊNCIA			
Títulos dos estudos	Questões de pesquisa secundárias	Objetivo Geral	Pesquisas e Método	Procedimentos de coleta de dados	Procedimentos de análise de dados	Produto do Estudo
Estudo 1: Materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas nas dimensões ambiental, de eficiência e de custo citados na literatura científica.	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?	Apresentar uma revisão sistematizada sobre os materiais alternativos ao silício, a partir da classificação dos autores e respectivas categorias de estudo.	Sequencial Qualitativo	Bibliográfica (Vergara, 2016). Qualitativa (Cooper et al., 2003) Análise dos artigos mais recentes extraídos da base de dados <i>SCOPUS</i> .	Revisão sistemática da Literatura (Sampaio et al., 2007)	Artigo a ser submetido a evento e/ou periódico.
Estudo 2: Panorama das patentes relativas aos materiais alternativos ao silício para a produção de células solares fotovoltaicas.	Quais são as patentes depositadas no banco de dados <i>PATENTSCOPE</i> da Organização Mundial de Propriedade Intelectual (OMPI) relacionadas às células solares fotovoltaicas?	Recuperar e analisar os depósitos de patentes, que podem ser utilizados como alternativas ao silício na produção de células solares fotovoltaicas.	Sequencial Quantitativo	Cientométrico (Santos et al., 2014); Quantitativa (Hair et al., 2005);	Análise das patentes do <i>PATENTSCOPE - WIPO IP PORTAL</i> .	Artigo a ser submetido a evento e/ou periódico.

Fonte: Adaptado de Costa, Ramos & Pedron (2019)

2 ESTUDO 1: MATERIAIS ALTERNATIVOS AO SILÍCIO PARA A PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.

2.1 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, 2014).

Segundo Machado e Miranda (2014) 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.

O desenvolvimento da indústria eletrônica nestes países permitiu um enorme salto no aproveitamento da energia solar fotovoltaica pertinente aos processos que envolvem a transformação do silício, matéria-prima essencial na composição das células fotovoltaicas. O silício utilizado na indústria solar fotovoltaica deve ser purificado para obtenção de altos graus de pureza necessário para sua utilização (Davies, Frisso, & Brandão, 2018).

Como enfatizaram Davies et al. (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 com estrutura molecular bem definida e com maior grau de pureza atinge 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. E por fim o silício amorfo, que não possui uma estrutura cristalina definida e apresenta baixas eficiências para utilização na produção de células e painéis fotovoltaicos. O objetivo primordial na indústria é reduzir a quantidade de material, a energia e a toxicidade dos materiais a serem utilizados nos processos de fabricação.

De acordo com o cenário apresentado, a pergunta de pesquisa que se coloca é: “Quais são os principais materiais alternativos ao silício para a produção de células solares

fotovoltaicos nas dimensões ambiental, de eficiência e de custo, baseados na produção acadêmica científica?”. Para responder a esse questionamento, este estudo tem como objetivo apresentar uma revisão sistematizada sobre os materiais alternativos ao silício, a partir da classificação dos autores e respectivas categorias de estudo.

2.2 Referencial Teórico

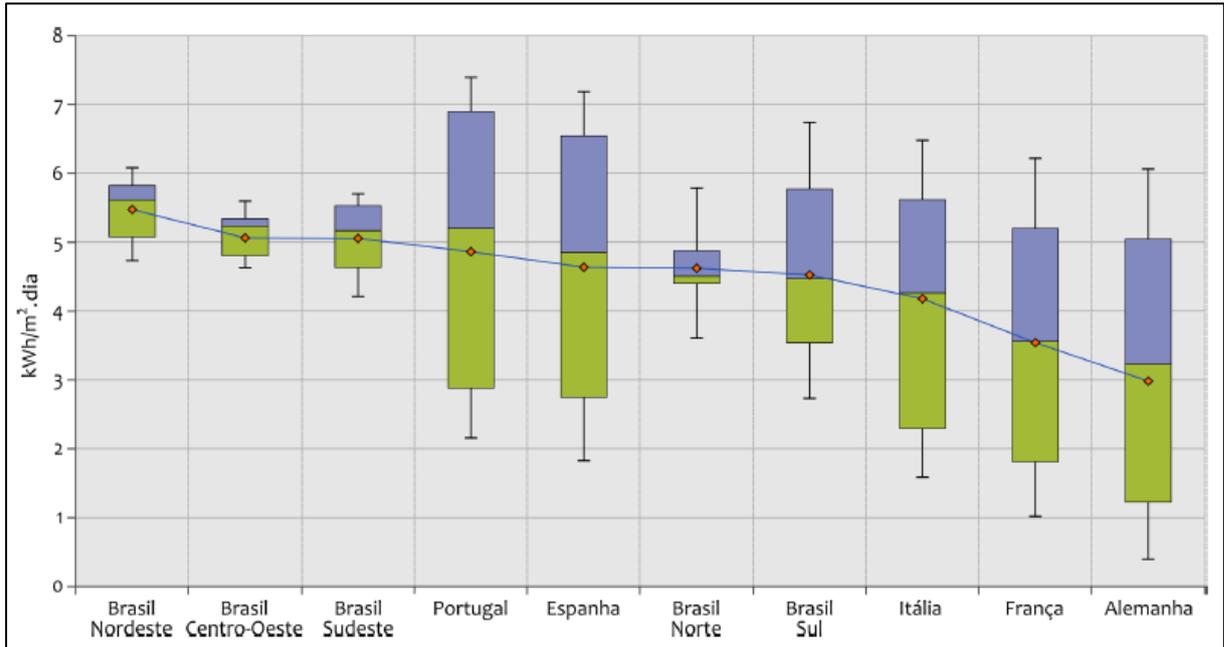
2.2.1 Tecnologias fotovoltaicas

A geração de energia elétrica, a partir da utilização das fontes renováveis, cresce velozmente 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, Alalawe, Voigt, Boeffel, & Baumann, 2018).

Pode-se considerar que $1,7 \times 10^5$ TW (1 TW é equivalente a 10^{12} W) de energia solar chegam à superfície da Terra diariamente e que a radiação solar que pode ser aplicada para a geração de energia elétrica é de cerca de 600 TW (Hagfeldt, Boschloo, Sun, Kloo, & Pettersson, 2010).

Segundo Pereira et al. (2017) no Brasil a região Nordeste apresenta uma média de irradiação global horizontal de 5,5 kWh/m² enquanto nas regiões Sudeste e Centro-Oeste esses valores são em torno de 5,0 kWh/m². As regiões Norte e Sul apresentam irradiação global horizontal de 4,6 kWh/m² e 4,5 kWh/m² respectivamente, esses valores relativamente mais baixos de irradiação global horizontal são em razão do fator climático destas regiões, pois apresentam nebulosidade mais frequente o que reduz a incidência solar que chega à superfície. O Brasil possui níveis de irradiação solar superiores à irradiação solar média mensal de países europeus, como a Itália, França e Alemanha como podem verificar na comparação da Figura 2.1.

Figura 2.1 Médias mensais da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa (kWh/m². dia)



Fonte: Pereira et al. (2017, p. 68)

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. A utilização das tecnologias de energia renováveis, evita o aumento dos gases do efeito estufa (GEE). 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. Podemos resumi-lo como sendo a geração e a separação de portadores de carga (par de elétrons-lacuna) produzindo uma Diferença de Potencial (DDP) para o circuito externo para geração de eletricidade (Vallêra & Brito, 2006).

Todavia uma descoberta promissora para os estudos da energia solar fotovoltaica foi a descoberta por cientistas dos Laboratórios *Bell* em 1950 que o silício, tratado quimicamente com impurezas reagia à luz e gerava energia elétrica. Essa descoberta foi obtida por Calvin

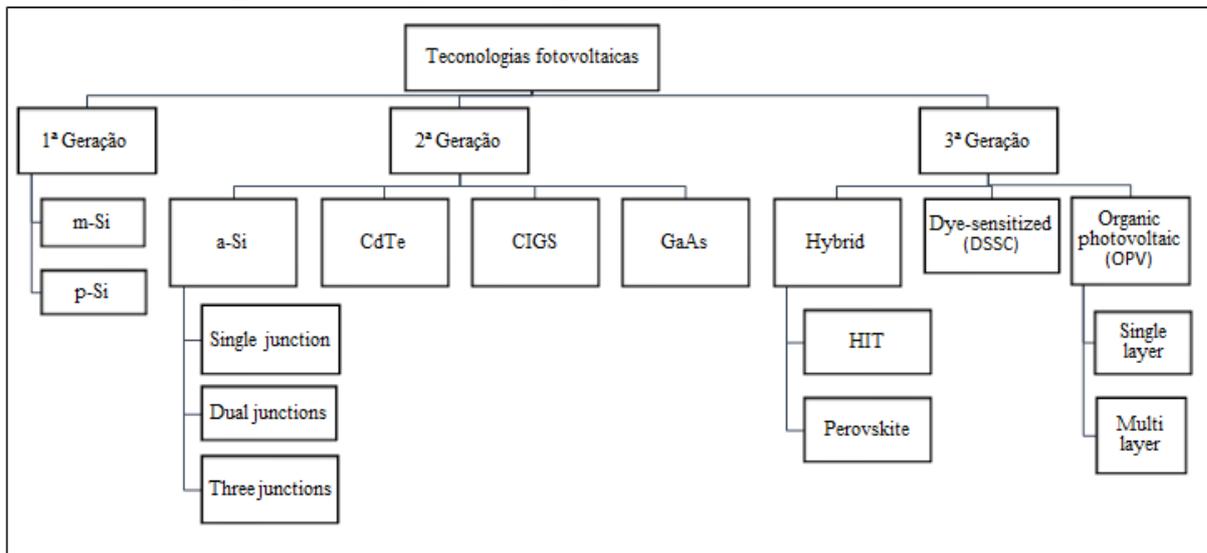
Fuller que demonstrou a primeira célula solar feita de silício que posteriormente seria o principal elemento dos chips de computador (Vallêra et al., 2006).

O silício utilizado para as células solares originou-se da indústria microeletrônica e a pureza dele é que decide o processo de produção. A Sílica (SiO_2) é o principal material utilizado na obtenção do silício de alto teor de pureza em fornos elétricos que consomem muita energia. As questões ambientais e de saúde são enormes no beneficiamento deste material, tais como a emissão de gases tóxicos que geram a chuva ácida e a emissão de pó de Sílica (conhecido como *Kerf*) que causa doença pulmonar (Ferreira & Fenato, 2017).

2.2.2 Os principais materiais

Segundo Bühler, Santos e Gabe (2018) as tecnologias fotovoltaicas em desenvolvimento dividem-se basicamente em três tipos, chamadas de "gerações" que podem oferecer caminhos promissores quanto ao custo, a eficiência e a sustentabilidade. Os mais diversos tipos de materiais que compõem as células fotovoltaicas são mostrados na Figura 2.2.

Figura 2.2 Principais tecnologias de células fotovoltaicas existentes.



Fonte: Adaptado de Kumar e Kumar (2017) e Ogbomo et al. (2017)

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

2.2.2.1 Células fotovoltaicas de 1ª geração

Segundo Bühler et al. (2018) 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. E 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. O custo de fabricação do módulo é mais alto se comparado às demais tecnologias fotovoltaicas existentes, pois o processo de fabricação das células de silício Monocristalino é muito sofisticado e caro (Kumar & Kumar, 2017). As células monocristalinas possuem um *Power Conversion Efficiency (PCE)* de até 25% e, uma vida útil estimada de 30 anos (Ogbomo, Amalu, Ekere, & Olagbegi, 2017).

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). O processo de fabricação é mais econômico e mais simples. A célula solar fotovoltaica policristalina possui um *PCE* de até 20% e tempo de vida útil de 30 anos (Ogbomo et al., 2017).

2.2.2.2 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, daí 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, sendo assim o produto final é mais barato e pode ser feito camada sobre camada sendo depositada sequencialmente num substrato (Ogbomo et al., 2017). Existem vários tipos de células fotovoltaicas *Thin film*. As células fotovoltaicas *Thin film* com mais predomínio no mercado são: silício amorfo (*A-Si*), Seleneto de Cobre e Índio-Gálio (CIGS), Telureto de Cádmio (CdTe) e Arseneto de Gálio (GaAs) (Ogbomo et al., 2017).

a) *Amorphous silicon (A-Si)* têm uma estrutura cristalina desordenada e têm um percentual de absorção de luz 40 vezes maior em relação às células monocristalinas de silício. São as células solares *Thin film* mais utilizadas e desenvolvidas. O *A-Si* pode ser colocado em substratos muito grandes e baratos de até 5,7 m² de vidro, usando técnicas de deposição contínua com custo de fabricação reduzido (Kumar & Kumar, 2017). É destinada principalmente a aplicações de baixa potência devido à célula possuir *PCE* baixo na faixa de 6–13% e tempo de vida operacional de 25 anos (Ogbomo et al., 2017).

b) *Cadmium telluride (CdTe)*, as células fotovoltaicas de *Thin film* de Telureto de Cádmio são compostas de um subproduto de outros metais industriais como o zinco e o telúrio que é um subproduto do processamento de Cobre. A toxicidade do Cádmio representa uma ameaça ambiental e também é um grande problema com a tecnologia de película fina CdTe (Kumar & Kumar, 2017).

As células fotovoltaicas de CdTe contém pouco Cádmio (Cd) elementar por metro quadrado, pois este é um agente cancerígeno. O segundo material, o Telureto é tão raro na natureza quanto a platina e isso faz aumentar o preço da célula de CdTe. Mas o processo de fabricação é simples e barato em relação às células cristalinas e outras células de *Thin film*. É um material que tem um custo por *Watt* similar ao silício cristalino e possui uma eficiência de célula superior a 15% em comparação com as células *A-Si* (Ogbomo et al., 2017).

c) *Copper-Indium-Selenide (CIS)* e *Copper-Indium-Gallium-Diselenide (CIGS)*, esta célula é produzida a vácuo a partir do depósito de uma fina camada de Cobre, Índio, Gálio e Seleneto com espessura de 2 µm em vidro ou plástico, na frente e na parte traseira. Esta célula sem o Gálio como material semicondutor é chamada de CIS. A fabricação tem um custo baixo em relação às células fotovoltaicas de silício cristalino. A célula de CIGS tem *PCE* de 20% e seu desempenho sofre alterações devido ao sombreamento (Ogbomo et al., 2017). Comercialmente, as eficiências dos módulos estão na faixa de 7 a 16% e o material Índio é escasso e pode prejudicar a produção dessas células (Kumar & Kumar, 2017).

d) *Gallium arsenide (GaAs)*, estas células solares de GaAs são uma combinação de Gálio (Ga) e Arsênio (As). O Gálio (Ga) é um material raro e um subproduto do Alumínio e Zinco. O Arsênio (As) não é raro, mas é venenoso. Mas o material composto GaAs é estável e não é tóxico. A célula solar de junção única de GaAs possui um *PCE* de 29%, mas sua participação no mercado é de 1%, pois o processo de fabricação é caro. Esta célula é indicada

para aplicações sob alta temperatura e radiação aonde a eficiência e o desempenho são importantes, ou seja, células de múltiplas junções, células concentradas, satélites e carros elétricos (Ogbomo et al., 2017).

2.2.2.3 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 Cells* (Ogbomo et al., 2017).

a) *Dye-sensitized solar cell (DSSC)* é composta por um anodo foto-sensibilizado, fundamentado num material semiconductor, um eletrólito e um catodo foto-eletrquímico. Segundo O'Regan e Grätzel (1991) 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.

A célula *DSSC* desenvolvida por O'Regan e Grätzel (1991) contém três partes principais: o ânodo, o filme fino de TiO_2 e o cátodo. O ânodo é um substrato de vidro revestido por um *Thin film* de um óxido semiconductor transparente (FTO – óxido de estanho dopado com flúor), constituído de nanopartículas com porosidade e alta área superficial. O Dióxido de titânio (TiO_2) se fixa ao substrato de vidro FTO numa ligação química chamada de sensibilização (Kumar & Kumar, 2017). As células solares sensibilizadas por corante possuem processo de fabricação simples, o custo é baixo e possui um *PCE* de 8 a 14%. Elas 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. As células solares orgânicas são flexíveis mecanicamente e semitransparentes, são implementadas utilizando heterojunções em massa de *poli (3-hexiltiofeno) (P3HT)* e *1-(3-metoxicarbonil)-propil-1-fenil-(6,6) C61(PCBM)*. O

PCE 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 Cells*, 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, Waldmann, Agari, Schierle-Arndt, & Erk, 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 et al., 2018).

O mercado de células fotovoltaicas tem predomínio do silício Mono e Multicristalino (C-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. Mas também poderíamos alcançar um uso mais extenso para estes materiais, para serem utilizados em áreas que requerem maior flexibilidade (Hermes, Waldmann, Agari, Schierle-Arndt, & Erk, 2015).

2.3 Procedimentos metodológicos

Neste item são descritos a abordagem da pesquisa e os procedimentos de coleta e análise dos dados.

A classificação desta pesquisa quanto à sua natureza é qualitativa, pois permite a averiguação das questões do fenômeno em estudo e das suas relações. Este trabalho tem um objetivo descritivo, registrando e descrevendo os fenômenos sem interferência nos mesmos. As pesquisas descritivas referem-se às particularidades de determinado fenômeno e estabelecem correlações entre as variáveis (Vergara, 2016).

Esta pesquisa é exploratória porque verificou a existência de estudos que abordam as tecnologias fotovoltaicas e os novos materiais que estão sendo pesquisados sem o estabelecimento de hipóteses quanto a suas características (Vergara, 2016). O motivo da escolha da abordagem exploratório foi identificar, sem preconceitos ou julgamentos iniciais, os materiais alternativos ao silício para produção de células e painéis fotovoltaicos que vem sendo abordados na literatura científica.

Quanto aos procedimentos, a pesquisa é uma revisão sistemática de literatura (Vergara, 2016; Sampaio & Mancini, 2007; Cooper, Schindler, & Pamela, 2011). Segundo Sampaio e Mancini (2007) é um formato de estudo que utiliza a literatura como fonte de dados sobre algum tema, mediante um método particular e procedimental de busca fazendo um julgamento crítico e resumido da informação selecionada. Algumas etapas devem preceder a revisão sistemática, ou seja, deve-se definir o objetivo, identificar a literatura e selecionar os prováveis estudos a serem incluídos na pesquisa. Uma pesquisa dessa natureza emprega muitas fontes de dados com o intuito de saber “Como e Por quê?”, ou entender os diferentes significados, valendo-se de técnicas de pesquisas apropriadas para registrar as explicações e as motivações (Cooper, Schindler, & Pamela, 2011).

O presente estudo é uma revisão sistemática, porque a busca de referências teóricas e metodológicas do estudo foi realizada em bases de dados com a recuperação de artigos seguindo critérios objetivos e a seleção segue critérios de inclusão e exclusão rigorosos. Além disso, o conteúdo dos artigos foi analisado buscando sistematicamente as mesmas informações em cada um deles.

2.3.1 Procedimentos de coleta dos dados

Os artigos selecionados foram buscados na base de dados *SCOPUS*, que é voltada a todas as áreas do conhecimento, e que conta com cerca de 21.00 títulos, 2600 periódicos e 370 séries de livros (*Scopus*, 2019). Os artigos consultados nesta base encontram-se disponíveis no idioma inglês e utilizam-se palavras-chave para fazer as buscas (*SCOPUS*, 2019).

No dia 25 de março de 2019 foi realizado o levantamento de artigos na base de dados *SCOPUS* sobre o tema "Energia solar fotovoltaica", utilizando-se como referência os seguintes termos de busca: "*solar energy*", "*sun power*", "*photovoltaic solar energy*" e

"*photovoltaic cells*". Os termos de busca utilizados para a realização da pesquisa são apresentados na Figura 2.3.

Figura 2.3 Termo de busca utilizado na base de dados *SCOPUS Elsevier*.

Palavras-chave Selecionadas	Selected Keywords	Expressão utilizada
Estudo 1 - palavra-chave para revisão sistemática	SCOPUS	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

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Na busca realizada utilizou-se o filtro "*Articles or Review*", por isto, foram excluídos livros, conferências ou anais de congressos. Foi selecionado somente o período de 2014 a 2018. Como havia 16 artigos em outros idiomas tais como o japonês, chinês e coreano estes foram excluídos pela impossibilidade de leitura das íntegras, desta maneira foi utilizado o filtro para a língua "Inglês".

2.3.2 Procedimentos de análise de dados

Foram recuperados da base de dados *SCOPUS* um total de 488 documentos, classificados por ordem decrescente de data de publicação. Os artigos selecionados foram exportados e geraram uma base de dados em arquivo em formato CSV (do inglês "Character-separated values" ou "valores separados por um delimitador"). Na análise dos artigos utilizou-se o software *Microsoft Excel*, verificando um a um, por meio da leitura do título, resumo, conclusão e a confirmação da relação dos artigos com o tema escolhido. Foram excluídos 350 artigos que não estavam adequados à temática estudada, por exemplo, artigos concentrados nas várias formas do silício e que não traziam novos materiais.

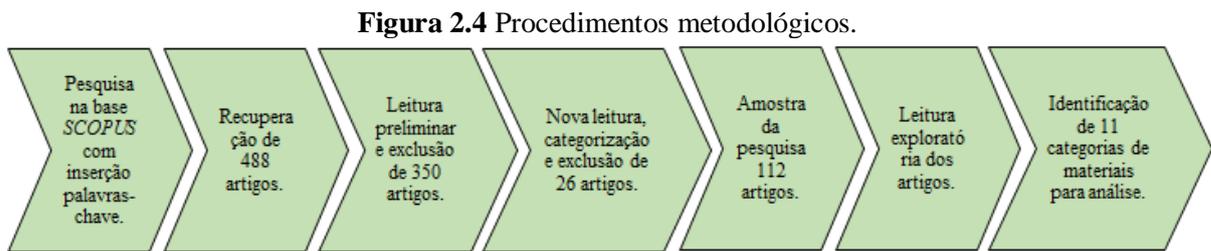
Com esses 138 artigos, foram construídos tabelas e gráficos visando analisar as categorias de interesse. Após esta leitura pormenorizada, houve a eliminação de mais 26 artigos que não se adequavam ao tema. Os 112 artigos restantes são o corpus que constitui o material de pesquisa.

O próximo passo foi realizar uma nova leitura mais detalhada nos artigos restantes, procurando identificar e sistematizar os conteúdos nestes, a saber:

- a) a categoria de materiais estudados;
- b) a eficiência obtida nas pesquisas;
- c) a descrição do custo;
- d) a disponibilidade do material para produção;
- e) a toxicidade dos mesmos.

As informações foram sistematizadas em gráficos e tabelas, permitindo a análise da frequência da presença das informações e a classificação dos materiais por configuração estrutural e/ou composição química, constituindo então classes de estudo.

No caso da eficiência dos materiais, a informação também foi sistematizada em gráfico tipo *boxplot* a fim de ser confrontada com outras fontes, a fim de se buscar conclusões a partir das convergências e divergências. A Figura 2.4 apresenta de forma resumida o procedimento da revisão bibliográfica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.4 Resultados

A seguir é apresentado o resultado da revisão da literatura, quanto ao histórico dos artigos recuperados, os periódicos nas quais foram publicados, os países que mais publicaram, e em seguida o resultado dos estudos por tipo de materiais e linhas de pesquisas identificadas.

A Tabela 2.1 mostra os resultados quanto ao tipo de material e a evolução das publicações nos últimos cinco anos após a leitura de títulos e resumos.

Tabela 2.1 Artigos recuperados e selecionados da Base de dados *SCOPUS Elsevier*.

Material	2014	2015	2016	2017	2018	Total Geral
Perovskite solar cells	2	3	5	6	17	33
Dye-sensitized solar cells (DSSCs)	3	13	4	2	7	29
Quantum dot sensitized solar cells (QDSSCs)	2	4	6	3	1	16
Heterojunction solar cells		5	4	1	2	12
Organic photovoltaic (OPV)	3		2	2	4	11
Hybridized solar cells	4	2	1	1	2	10
Multi-junction photovoltaic cells	3	1	2	1		7
GaAs solar cell	1				2	3
Indium gallium phosphide (InGaP) solar cells				1	1	2
Polymer solar cells (PSCs)			1		1	2
Antimony Sulfide Selenide					1	1
CIGS solar cells				1		1
Crystalline solar cells					1	1
CuSbS ₂ thin film					1	1
GaInAsP/GaInAs dual-junction solar cells					1	1
GaInP / GaAs solar cell					1	1
Graphene films		1				1
Indium gallium nitride (InGaN)					1	1
In _x Ga _{1-x} N solar cells				1		1
Low bandgap polymer solar cells					1	1
Photoelectrochemical solar cell		1				1
Photovoltaic-biased electrosynthetic (PV-EC) devices				1		1
Ternary solar absorber-Ag ₈ SnS ₆ nanocrystals					1	1
Total Geral	18	30	25	20	45	138

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Após a consulta à íntegra dos artigos foram excluídos mais 26, restando 112 como corpus final de análise. A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos artigos no período analisado que mais se destacaram e que apresentam viabilidade técnica.

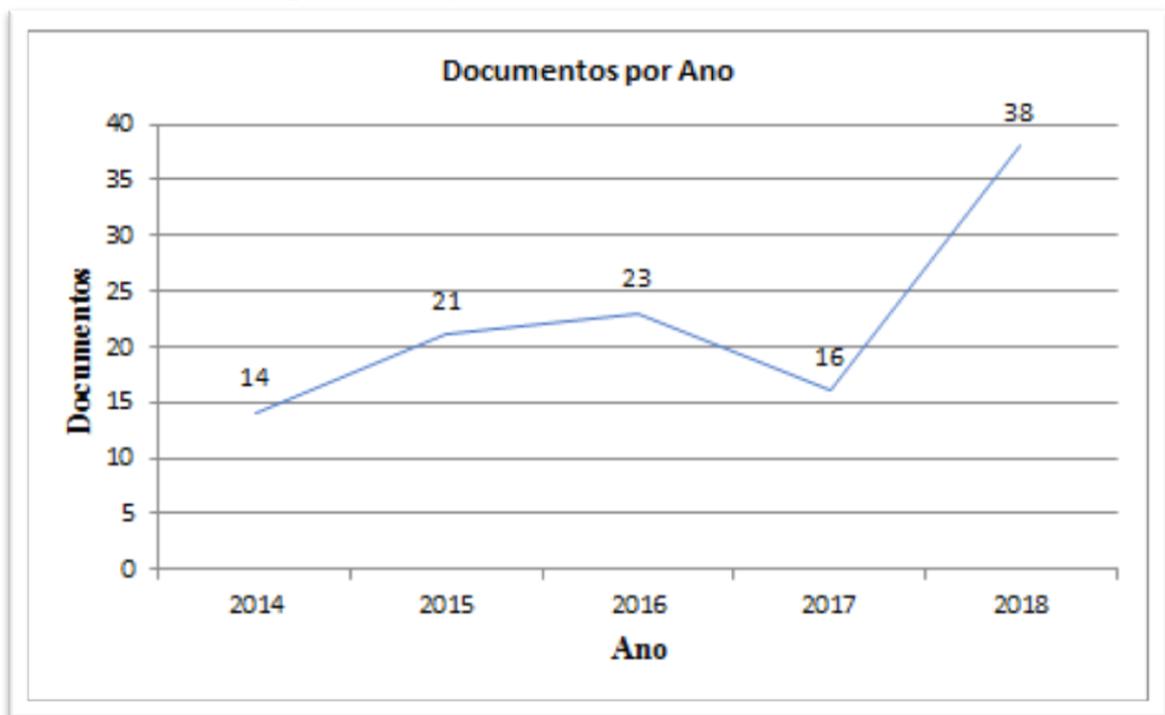
Tabela 2.2 Artigos selecionados de acordo como o tema escolhido.

Material	2014	2015	2016	2017	2018	Total Geral
Perovskite solar cells	2	3	5	6	15	31
Dye-sensitized solar cells (DSSCs)	2	9	4	2	6	23
Quantum dot sensitized solar cells (QDSSCs)	2	4	6	4	2	18
Multijunction solar cells	2	1	1		6	10
Organic photovoltaic (OPV)	3		2	1	3	9
Hybridized solar cells	3	1	1	1	2	8
Heterojunction solar cells		2	3	1		6
Single-junction solar cells					3	3
Polymer solar cells (PSCs)			1		1	2
Graphene films		1				1
Homojunction solar cell				1		1
Total Geral	14	21	23	16	38	112

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

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, como mostra o histórico de publicações na Figura 2.5.

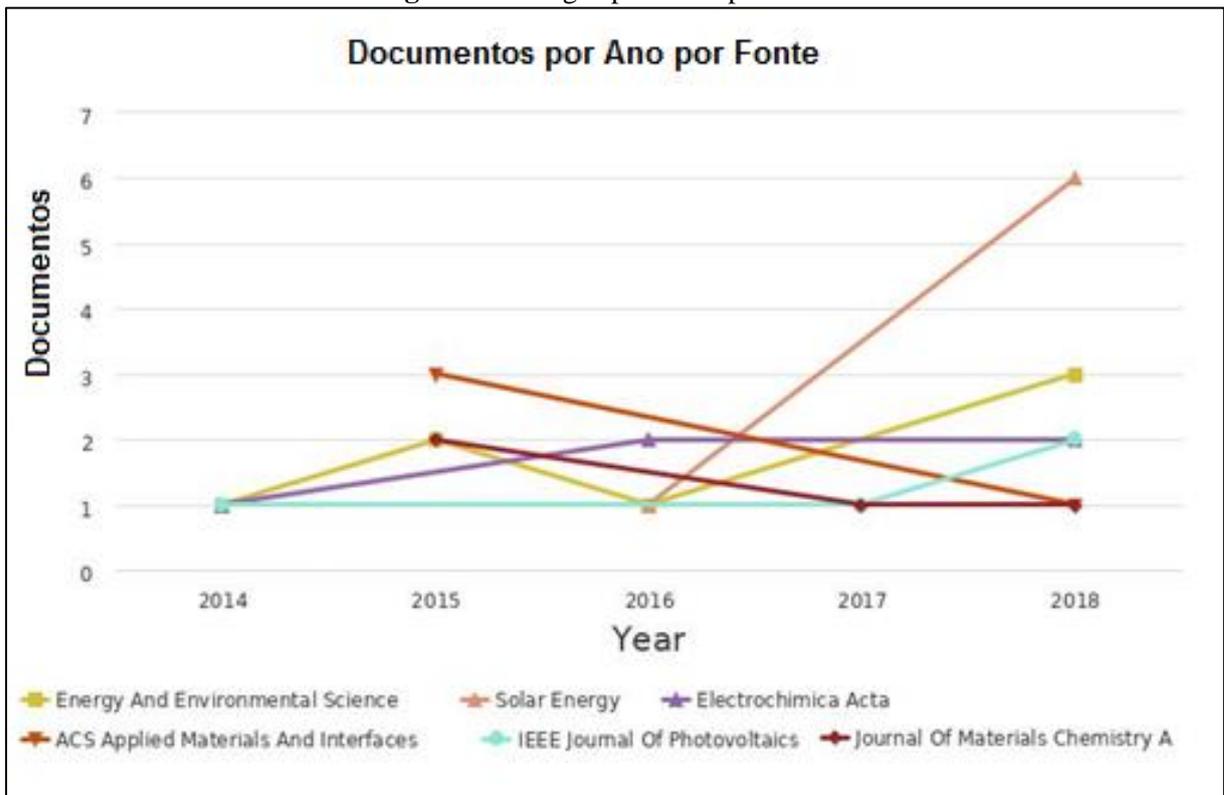
Figura 2.5 Artigos publicados no período 2014 a 2018.



Fonte: Adaptado de SCOPUS Elsevier (2019)

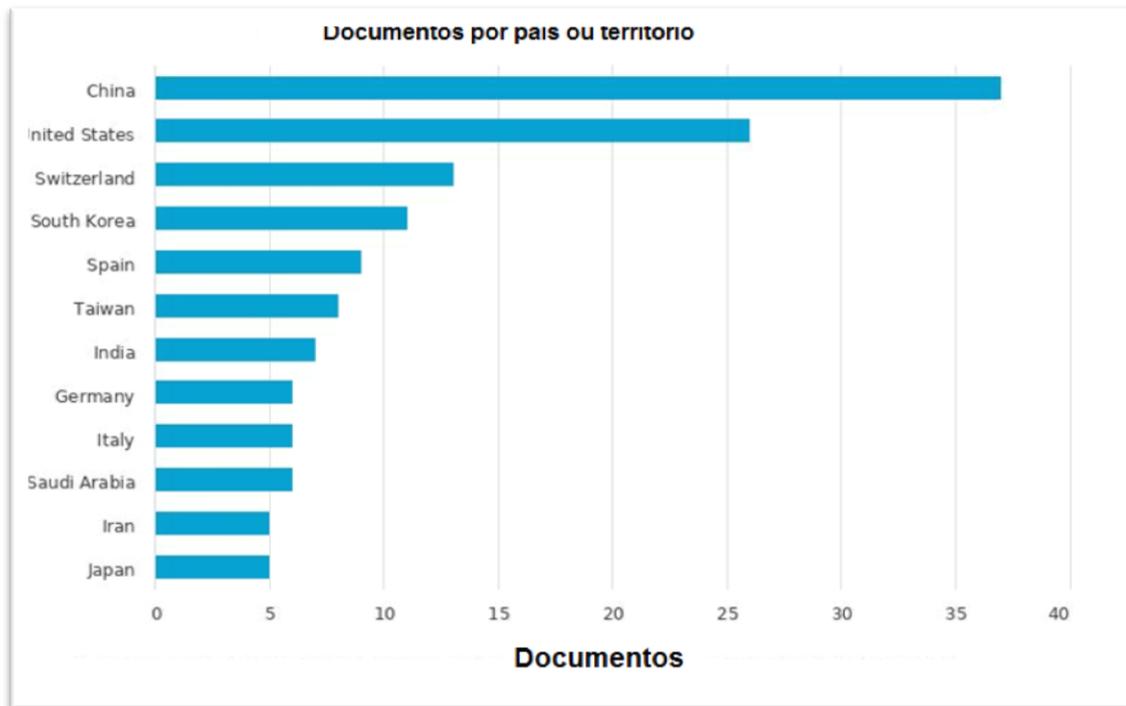
A Figura 2.6 apresenta os três periódicos que publicaram mais de cinco artigos e que concentram 20 dos 115 artigos (63%), são eles *Solar Energy* (SJR 1,59-2018) (8 artigos), *Energy and Environment Science* (SJR 13,1-2018) (7 artigos) e *Electrochimica Acta* (SJR 1,37-2018) (5 artigos). As publicações 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*, trabalhos voltados às disciplinas de bioquímica, biofísica e engenharia química; c) O periódico *Electrochimica Acta*, divulga estudos sobre os aspectos da eletroquímica. Isto demonstra o interesse dos pesquisadores em publicar pesquisas nestes periódicos direcionados à tecnologia solar e química relacionada às energias renováveis.

Figura 2.6 Artigos por ano e por fonte.



Fonte: Adaptado de *SCOPUS Elsevier (2019)*

Destaca-se ainda que, dos 10 primeiros países reportados, com mais de cinco publicações os três primeiros são, a saber: 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, como mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 Artigos por país ou território.

Fonte: Adaptado de *SCOPUS Elsevier (2019)*

A seguir serão analisadas as principais categorias de materiais identificados na revisão da literatura.

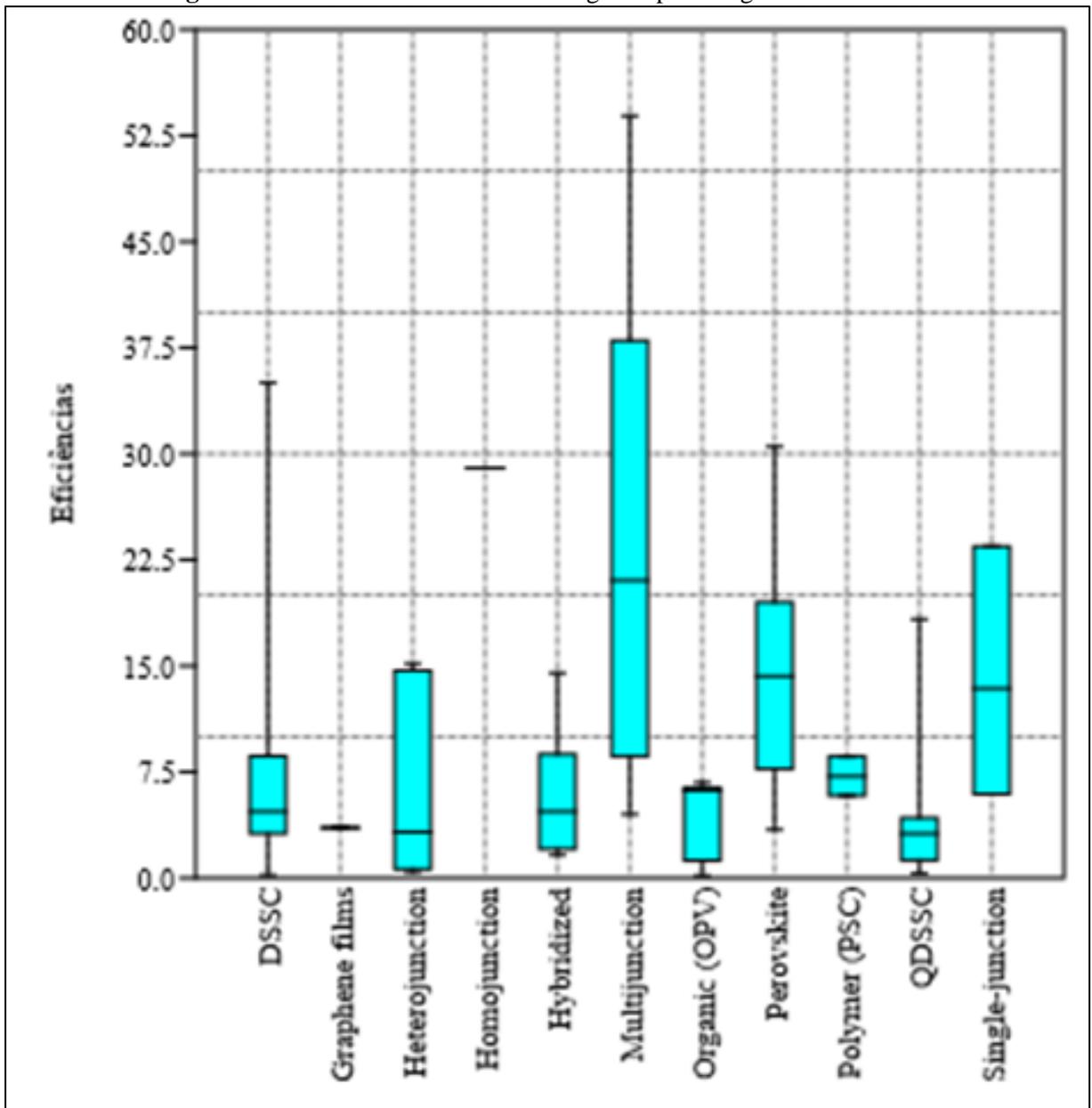
2.4.1 Análise dos materiais por categoria

Foram analisadas as classificações dos materiais identificados por meio da revisão da literatura, com apenas as publicações mais recentes (de 2014 a 2018), o resultado identificou 11 grupos de estudos para análise e com mais de três publicações agrupadas.

Depois de realizada a seleção dos artigos relacionados ao tema pela análise sistemática da literatura, buscou-se semelhanças entre as publicações. Dentre os artigos selecionados foi efetuada a divisão das publicações em classes de materiais. Os materiais selecionados por classes são *Dye-sensitized solar cells (DSSCs)*, *Graphene films*, *Heterojunction solar cells*, *Homojunction solar cell*, *Hybridized solar cells*, *Multijunction solar cells*, *Organic photovoltaic (OPV)*, *Perovskite solar cells*, *Polymer solar cells (PSCs)*, *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSCs)* e *Singlejunction solar cells*. Foi realizada a análise estatística dos dados de eficiência de conversão de energia (PCE) observados nos artigos por meio do software "*Past.exe*" e elaborado o gráfico "*boxplot*", aonde é mostrado Materiais X Eficiência de conversão de energia (PCE).

A Figura 2.8 apresenta os diagramas “*boxplot*”, este gráfico permite a comparação dos valores médios de eficiências dos materiais recuperados nos artigos selecionados. A caixa representa 50% dos dados, a linha central representa a mediana (percentil P50), o retângulo indica a variabilidade superior (percentil P75) e a variabilidade inferior (percentil P25) em torno da mediana e por fim, as barras verticais indicam os valores máximos e mínimos encontrados para as eficiências.

Figura 2.8 Eficiência de conversão energética por categoria de material.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Na Figura 2.8 é indicada a variabilidade das eficiências de conversão de energia para cada material apresentado nos artigos. As amostras indicam que o material *Polymer (PSC)* apresentou a menor variabilidade de acordo com os dados registrados e o material *Multijunction* apresentou a maior variabilidade.

Analisando-se o gráfico, é possível notar que o material *Multijunction* apresentou a maior variabilidade na eficiência de conversão de energia, com valores entre 8,59(P25) e 38,0(P75) com 50% dos valores observados no intervalo entre 9,82 e 34,00. A menor variabilidade nas eficiências de conversão de energia foi verificada pelo material *Polymer (PSC)*, com valores entre 4,36(P25) e 6,45(P75) e 50% dos valores observados em 5,81. É possível notar que para os materiais *Graphene films* e *Homojunction* não foram calculadas a variabilidade nas eficiências de conversão de energia, pois não foram recuperados mais de um artigo para cada tipo de material, logo não sendo possível fazer essa análise.

Observando-se as áreas das caixas com os 50% dos dados (P50), nota-se que as menores amplitudes são encontradas nos materiais *DSSC*, *Organic (OPV)*, *Polymer (PSC)* e *QDSSC*. As maiores amplitudes são encontradas nos materiais *Heterojunction*, *Hybridized*, *Multijunction* e *Perovskite* nos 50% dos dados (P50). Observa-se que os menores e maiores valores de eficiência de conversão de energia são de 0,18 (*Organic (OPV)*) e 53,90 (*Multijunction*), respectivamente. Os materiais *Graphene films*, *Homojunction*, *Polymer (PSC)* e *Singlejunction* possuem poucas amostras e não há como indicar uma tendência de estabilidade nas eficiências de conversão de energia. Já os materiais *DSSC* e *QDSSC* apresentam mais valores de eficiência de conversão de energia, porém esses valores são baixos, média de 6,50 e 4,23, respectivamente. Estes valores de eficiência de conversão de energia dos materiais *DSSC* e *QDSSC* são muito baixos se comparados aos valores máximos teóricos de eficiência de energia atribuídos ao silício de até 25% a 1,1 eV (Limite *Shockley-Queisser*), para terem aplicação comercial na produção de células e módulos fotovoltaicos.

2.4.2 Análise da categoria de material *Perovskite solar cells*

Na Tabela 2.3 verificam-se os artigos recuperados para a categoria de material *Perovskite solar cells*. Dentre os artigos analisados nota-se um aumento crescente no número de publicações referentes às *Perovskite solar cells*, sendo em 2014 (2 artigos), 2015 (3 artigos), 2016 (5 artigos), 2017 (6 artigos) e em 2018 (15 artigos) totalizando 31 artigos recuperados. Nota-se um aumento de 29% nas publicações de artigos de 2018 em relação a 2017, um aumento considerável de publicações com pesquisas sobre este tipo de célula.

O processo de fabricação é realizado por deposição química em substratos, sendo que este processo possui custos baixos, segundo (Bühler et al., 2018). Os artigos recuperados apresentam diferentes tipos de estudos sobre *Perovskite Solar Cells* e concentram-se no desenvolvimento de: a) Classes de óxidos (Anaraki et al., 2016; Agresti et al., 2016; Wu et al., 2018; Cai et al., 2017; Chowdhury et al., 2018); b) Materiais com e sem chumbo (Lead) (Noel et al., 2014; Qin et al., 2014; Wang et al., 2017; Duan et al., 2018; Pazos-Outón et al., 2018; Dao et al., 2017; Moyez et al., 2017); e c) Materiais para *Hole transporting material* (HTM) (Kazin et al., 2015; Molina-Ontoria et al., 2016; Zhang et al., 2016; Wu et al., 2018; Dar et al., 2018).

Destaca-se que dos 31 artigos sobre *Perovskite solar cells*, os 10 primeiros possuem mais de 50 citações por artigo. O artigo mais citado é de autoria de Noel et al. (2014) com 806 citações, publicado no periódico *Energy and Environmental Science*. Este estudo foca no desenvolvimento de células solares de Halletos sem chumbo (Lead-free) com *Thin film*, porém a eficiência energética relatada neste estudo é de 6%, bem abaixo de 19,7% relatada por Bühler et al. (2018) para este tipo de célula.

As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 3,41% (Moyez et al., 2017) a 30,50% (Pazos-Outón et al., 2018), porém a média das eficiências encontradas situam-se na faixa de 14%, com os estudos de Rao et al. (2015) publicado no periódico *Advanced Functional Materials* e Chowdhury et al. (2018) publicado no periódico *Solar Energy*.

Tabela 2.3 Categoria de material *Perovskite solar cells*.

Number	Authors	Year	Source title	Cited by	Material Category	Power conversion efficiency PCE (%)	Cost	Availability	Environment Impact
4	Zhang et al.	2018	Energy and Environmental Science	7	Lewis acid bis-PCBM or Lewis base	21,70	BAIXO	NI	NI
5	Duan et al.	2018	Materials Today Energy	1	Cesium lead bromide (CsPbBr ₃)	6,80	BAIXO	NI	NI
8	Li et al.	2018	Nature Communications	3	Trimethylolpropane triacrylate (TMTA)	18,61	NI	NI	NI
11	Dar et al.	2018	European Journal of Inorganic Chemistry	-	The hole transporting material (HTM)	7,20	NI	NI	NI
27	Seo et al.	2018	Energy and Environmental Science	7	Spiro-MeOTAD with Zn-TFSI ₂	22,00	NI	NI	NI
33	Liao et al.	2018	Solar Energy	2	Halogeneto de chumbo de cesio com estrutura de perovskita	8,20	NI	NI	NI
35	Chowdhury et al.	2018	Solar Energy	3	Reduced Graphene Oxide (r-GO)/copper (I) thiocyanate (CuSCN)	14,28	NI	NI	NI
56	Saygili et al.	2018	ChemPhysChem	3	Hemicage-structured iron complex	19,50	NI	NI	NI
64	Wu et al.	2018	ACS Applied Materials and Interfaces	8	The hole transporting material (HTM)	16,50	NI	NI	NI
65	Duan et al.	2018	Angewandte Chemie - International Edition	18	Cesium lead bromide (CsPbBr ₃)	9,43	NI	NI	NI
66	Chakrabartty et al.	2018	Nature Photonics	4	Inorganic ferroelectric perovskites	4,20	NI	NI	NI
72	Sandoval-Torrientes et al.	2018	Journal of Materials Chemistry A	7	The hole transporting material (HTM)	18,10	NI	NI	NI
73	Pazos-Outón et al.	2018	Journal of Physical Chemistry Letters	9	Methyl ammonium lead iodide	30,50	NI	NI	NI
75	Cho et al.	2018	Energy and Environmental Science	19	Bulk three-dimensional (3D) perovskite film	20,70	BAIXO	NI	NI
93	Wu et al.	2018	Materials Today Energy	4	ternary metal oxide based electron transporting layers (ETLs)	16,38	NI	NI	NI
126	Moyez et al.	2017	Journal of Nanoparticle Research	3	Lead-free perovskite solar cell (CH ₃ NH ₃ SnCl ₃)	3,41	BAIXO	ALTA	BAIXO
138	Wang et al.	2017	Joule	55	Inorganic cesium lead halide perovskites (CsPbI ₃)	11,40	NI	NI	NI
142	Cai et al.	2017	Physical Review Applied	4	Ferroelectric oxides based solar cells	9,00	NI	NI	NI
156	Shin et al.	2017	Science	414	Eletrodos BaSnO ₃ dopados com La, preparados de forma coloidal	21,20	NI	NI	NI
158	Dao et al.	2017	Organic Electronics: physics, materials, appl	6	Methylammonium lead halides	7,60	NI	NI	NI
163	Tan et al.	2017	Science	595	Chlorine-capped TiO ₂ colloidal nanocrystal film	20,10	NI	NI	NI
228	Anaraki et al.	2016	Energy and Environmental Science	252	Solution-processed tin oxide	20,70	NI	NI	NI
241	Zhang et al.	2016	ACS Nano	59	The hole transporting material (HTM)	17,40	NI	NI	NI
251	Molina-Ontoria et al.	2016	Angewandte Chemie - International Edition	94	The hole transporting material (HTM)	18,20	NI	NI	NI
259	Agresti et al.	2016	Advanced Functional Materials	85	Lithium neutralized graphene oxide (GO-Li)	11,14	NI	NI	NI
269	Zarazua et al.	2016	Journal of Physical Chemistry Letters	93	Light-Induced Space-Charge Accumulation Zone	7,69	NI	NI	NI
290	Luo et al.	2015	Advanced Energy Materials	50	Semitransparent perovskite solar cells	6,00	NI	NI	NI
293	Rao et al.	2015	Advanced Functional Materials	87	Photogenerated Electrons with SnO ₂ Nanocolloids	14,69	NI	NI	NI
322	Kazim et al.	2015	Energy and Environmental Science	116	The hole transporting material (HTM)	11,80	NI	NI	NI
408	Qin et al.	2014	Nature Communications	471	Organo-lead halide perovskites	12,40	NI	NI	NI
450	Noel et al.	2014	Energy and Environmental Science	806	Lead-free organic-inorganic tin halide	6,00	NI	NI	ALTO

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.4.3 Análise da categoria de material *Dye-sensitized solar cells* (DSSC)

Na Tabela 2.4 podem-se verificar os artigos recuperados para a categoria de material *Dye-sensitized solar cells* (DSSC). Sobre as *Dye-sensitized solar cells* (DSSC) foram recuperados em 2014 (2 artigos), 2015 (9 artigos), 2016 (4 artigos), 2017 (2 artigos) e em 2018 (6 artigos) totalizando 23 pesquisas recuperadas. Nota-se também um aumento no número de publicações em 2018 em relação a 2017 de cerca de 200%, uma evidência no interesse do desenvolvimento de novos corantes para aplicação neste tipo de célula.

Os artigos apresentam diferentes estudos sobre *Dye-sensitized solar cells* (DSSC), mas concentram-se no desenvolvimento de: a) Materiais orgânicos (célula solar polimérica) para aplicação nos substratos como evidenciam os estudos de Vekariya et al. (2016); Singh et al. (2016) e Cipolla et al.(2017); b) Em células solares metal-free relatados por Joly et al. (2015) e Zhang et al. (2017); c) E em nanopartículas de materiais inorgânicos-orgânicos como corantes TiO₂, ZnO, CdInS₂ e Cu, como relatam Tang et al. (2015); Zhu et al. (2015); Wang et al. (2018); Younas et al. (2018); Chen et al.(2015) e Singh et al. (2016).

Nota-se que dos 23 artigos que focam nos estudos sobre *Dye-sensitized solar cells* (DSSC), oito dos vinte e três artigos possuem mais de 10 citações por artigo. A pesquisa mais citada é de autoria de Joly et al. (2015) com 67 citações, também publicada no periódico *Energy and Environmental Science*. Este estudo foca no 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).

As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 0,2% de eficiência energética (Ma et al., 2015) a 11,12% (Zhang et al., 2017), a média das eficiências energéticas encontradas situam-se na faixa de 5%, com o estudo de Lee et al. (2015) publicado no periódico *Dyes and Pigments*.

Tabela 2.4 Categoria de material *Dye-sensitized solar cells (DSSC)*.

Number	Authors	Year	Source title	Cited by	Material Category	Power conversion efficiency PCE (%)	Cost	Availability	Environment Impact
16	Hemavathi et al.	2018	Solar Energy	-	Metal free organic dyes with D-A- π -A configuration	3,39	BAIXO	ALTA	BAIXO
21	Younas et al.	2018	International Journal of Energy Research	1	TiO ₂ /0.3 mM Z907 + 0.2 mM SQ2	7,83	BAIXO	ALTA	BAIXO
40	Zhao et al.	2018	Electrochimica Acta	2	Nitrogen (N)-doped carbon quantum dots (N-CQDs)	9,29	BAIXO	NI	BAIXO
41	Wang et al.	2018	Electrochimica Acta	4	PEDOT-graphene/PtCoIm-TiO ₂ /LPP-green	10,07	NI	NI	NI
70	Yuan et al.	2018	Solar Energy	5	Building Integrated Photovoltaics (BIPV) application	5	NI	NI	NI
105	Sevim et al.	2018	Solar Energy	4	S-bridged 4-mercaptobenzoic acid substituted cobalt(II) phthaloc	4,18	NI	NI	NI
181	Cipolla et al.	2017	Journal of Power Sources	3	Polymer gel electrolytes (PGEs)	6,37	NI	NI	NI
204	Zhang et al.	2017	Chemical Science	13	Pure metal-free organic dye with iodine electrolyte	11,12	NI	NI	NI
240	Velcariya et al.	2016	ACS Omega	8	Natural Polymer Soil Component	2,4	BAIXO	ALTA	BAIXO
248	Singh et al.	2016	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	2	Monomer and Polymer Capped ZnO	3,25	NI	NI	NI
250	Li et al.	2016	ACS Photonics	21	Triplet-Triplet Annihilation Upconversion (TTA-UC)	35	NI	NI	NI
284	Opwis et al.	2016	International Journal of Photoenergy	4	Textile-based dye-sensitized solar cell (DSC)	1,01	NI	NI	NI
307	Singsa-ngah et al.	2015	Applied Physics A: Materials Science and Pro	1	Cd _{1-x} In _x Te-sensitized liquid junction	0,49	NI	NI	NI
309	Zhu et al.	2015	Journal of Colloid and Interface Science	5	Incorporated nanocrystalline TiO ₂ electrodes	7,65	NI	NI	NI
313	Tang et al.	2015	Journal of Materials Chemistry A	27	Sr-doped TiO ₂ /SrTiO ₃ nanorod array heterostructures	4,7	NI	NI	NI
325	Ma et al.	2015	AIP Advances	5	Photochromic spiropyran derivatives SIBT	0,2	NI	NI	NI
326	Zhang et al.	2015	Journal of Materials Science: Materials in Ele	2	Calcined starch-ZnO mesoporous spheres	3,8	NI	NI	NI
364	Lee et al.	2015	Dyes and Pigments	16	Quasi-solid cobalt electrolytes in Ru-based	5,2	NI	NI	NI
370	Joly et al.	2015	Energy and Environmental Science	67	Metal-free organic dyes	10,25	NI	NI	NI
377	Menaka et al.	2015	Journal of Applied Polymer Science	2	Poly(o-anisidine) with the influence of surfactants	2,5	NI	NI	NI
385	Chen et al.	2015	Materials Technology	5	Low cost kesterite Cu ₂ ZnSnS ₄ (CZTS) thin films	3,141	BAIXO	NI	NI
413	Feng et al.	2014	RSC Advances	13	Hierarchical double-layered photoelectrode of P25 NPs	8,62	NI	NI	NI
429	Liu et al.	2014	Journal of Physical Chemistry C	25	Upconversion luminescence (UCL) strength between Yb ₂ O ₃ , T	4,095	NI	NI	NI

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.4.4 Análise da categoria de material *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)*

Podem-se verificar na Tabela 2.5 os artigos recuperados para a categoria de material *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)*. Foram recuperados 17 artigos sobre *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)*, em 2014 (2 artigos), 2015 (4 artigos), 2016 (6 artigos), 2017 (3 artigos) e em 2018 (2 artigos) respectivamente. Percebe-se um declínio no número de publicações de 2018 em relação a 2016 de 67% quando verificou-se uma quantidade máxima de seis artigos, talvez um desinteresse no desenvolvimento de novas aplicações para este tipo de célula.

Os artigos apresentam estudos sobre *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)* com várias abordagens, tais como: a) múltiplas arquiteturas relatadas nos estudos de Feng et al. (2015); Cao et al.(2016); Hara et al.(2016); Beattie et al. (2017); Boon-On et al. (2018) e Wang et al. (2018); b) não-metals relatados estudados por Aragaw et al. (2017), metais de transição estudados por Gopi et al. (2015, 2016), Sun et al. (2014) e metais-representativos estudados por Yang et al. (2015).

Estes diferentes materiais indicam que os pesquisadores e estudos relatados, testam materiais com eletropositividades diferentes. Como a eletropositividade é a propriedade de perder elétrons de um átomo, utiliza-se isto compondo a célula com diferentes materiais garantindo eficiências de conversão de energia maiores. Estas células solares de *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)*, utilizam vários pontos cultivados em vários tamanhos não alterando o material ou as técnicas de construção subjacentes para otimizar a eficiência de conversão de energia e desta maneira aproveitando as múltiplas frequências do espectro solar.

As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 0,31% de PCE (Al-Hosiny et al., 2014) a 18,30% de PCE (Beattie et al., 2017), a média das eficiências PCE encontradas situam-se na faixa de 4%, com os estudos de Feng et al. (2015) publicado no periódico *ACS Applied Materials and Interfaces* e Chang et al. (2016) publicado no *Journal of Power Sources*.

Tabela 2.5 Categoria de material *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)*.

Number	Authors	Year	Source title	Cited by	Material Category	Power conversion efficiency PCE (%)	Cost	Availability	Environment Impact
45	Wang et al.	2018	Advanced Energy Materials	1	Full-spectrum solar cell architecture	15,00	NI	NI	NI
113	Boon-On et al.	2018	RSC Advances	-	Liquid-junction Ag ₈ SnS ₆ QDSSCs	0,64	NI	NI	NI
132	Beattie et al.	2017	ACS Photonics	11	Quantum dot intermediate band solar cell (QD-IBSC)	18,30	NI	NI	NI
171	Mehmood et al.	2017	RSC Advances	3	QDs co-sensitized solar cells	3,96	NI	NI	NI
200	Aragaw et al.	2017	RSC Advances	3	Na ₂ S ₂ nanocrystals	2,22	BAIXO	ALTA	NI
252	Hara et al.	2016	Journal of Physical Chemistry C	3	Submicron Periodic Grating Structures	1,26	NI	NI	NI
258	Chang et al.	2016	Journal of Power Sources	11	Lead antimony sulfides	4,14	NI	BAIXA	NI
268	Firoozi et al.	2016	Electrochimica Acta	1	Carbonates of earth alkali metals	3,38	NI	NI	NI
270	Badawi et al.	2016	Superlattices and Microstructures	10	Ternary alloyed Cd _{1-x} Pb _x S quantum dots	0,36	NI	NI	NI
273	Cao et al.	2016	Electrochimica Acta	12	Novel hierarchical nanorod-branched TiO ₂ nanofiber non-wove	6,26	NI	NI	NI
285	Gopi et al.	2016	Dalton Transactions	15	The effect of Ni ²⁺ ion incorporation into a CdS layer	3,11	NI	NI	NI
331	Firoozi et al.	2015	Journal of Power Sources	25	Cobalt-doped cadmium sulfide nanoparticles	3,16	NI	NI	NI
342	Gopi et al.	2015	Dalton Transactions	37	Manganese-doped cadmium sulfide quantum dots	2,85	NI	NI	NI
366	Yang et al.	2015	Journal of Materials Chemistry A	15	Monodispersed Sn doped InP (Sn:InP)	3,54	NI	NI	NI
380	Feng et al.	2015	ACS Applied Materials and Interfaces	55	Three-dimensional TiO ₂ /ZnO Hybrid Array	4,57	NI	NI	NI
427	Sun et al.	2014	Journal of Colloid and Interface Science	11	Long afterglow europium, dysprosium co-doped strontium aluminate	1,22	NI	NI	NI
461	Al-Hosiny et al.	2014	Materials Science in Semiconductor Processin	17	The photovoltaic performance of alloyed CdTe _x Si _{1-x} QDSSCs	0,31	NI	NI	ALTO

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.4.5 Análise da categoria de material *Multijunction solar cells*

Foram recuperados 11 artigos sobre *Multijunction solar cells*, em 2014 (2 artigos), de 2015 a 2017 (1 artigo) e em 2018 (6 artigos) respectivamente. Percebe-se um incremento no número de publicações em 2018 em relação a 2017 de cerca de 500% quando verificou-se uma quantidade máxima de seis artigos, um interesse no desenvolvimento de novas aplicações para este tipo de célula. A Tabela 2.6 apresenta os artigos recuperados para a categoria de material *Multijunction solar cells*.

Os artigos sobre *Multijunction solar cells* abordam estudos sobre múltiplas camadas ou múltiplas junções ou ainda células Tandem. Estas células solares multi-junção utilizam camadas de materiais com diferentes semicondutores. Cada junção individual produzirá corrente elétrica em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. 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% de PCE (Mitul et al., 2018) a 53,90% de PCE (Huang et al., 2015), a média das eficiências PCE encontradas situam-se na faixa de 24%, com os estudos de Tiwari et al. (2016) publicado no periódico *Solar Energy*.

Tabela 2.6 Categoria de material *Multijunction solar cells*.

Number	Authors	Year	Source title	Cited by	Material Category	Power conversion efficiency PCE (%)	Cost	Availability	Environment Impact
12	Routray et al.	2018	IEEE Transactions on Nanotechnology	-	Multiple quantum well (MQW) based nanowire photovoltaic	9,82	BAIXO	NI	NI
58	Benlekhdim et al.	2018	Optik	-	InGaP single-junction solar cells	18,55	NI	NI	NI
89	Perl et al.	2018	IEEE Journal of Photovoltaics	3	(Al)GaInP/GaAs Tandem Solar Cells	16,40	NI	NI	NI
92	Geisz et al.	2018	IEEE Journal of Photovoltaics	6	Six-junction (6J) inverted metamorphic multijunction (IMM)	50,00	NI	NI	NI
100	Mitul et al.	2018	AIP Advances	1	Polarization charges on optical and electrical performance of the	4,50	NI	NI	NI
103	Jain et al.	2018	Applied Physics Letters	4	Photovoltaic conversion efficiencies of a monolithic dual-junction	34,00	NI	NI	NI
134	Williams et al.	2017	IEEE Journal of Photovoltaics	3	Based multi-quantum well solar cell (MQW)	1,90	NI	NI	NI
226	Tiwari et al.	2016	Solar Energy	6	Triple junction solar cell	23,53	NI	NI	NI
304	Huang et al.	2015	Semiconductor Science and Technology	2	Five-junction (5J) inverted metamorphic multijunction (IMM)	53,90	NI	NI	NI
406	Zielony et al.	2014	Journal of Applied Physics	4	Electrical and photovoltaic properties of CdTe/ZnTe n-i-p junction	4,90	NI	NI	NI
421	Kayes et al.	2014	IEEE Journal of Photovoltaics	39	Flexible Thin-Film Tandem Solar Cells	30,80	NI	NI	NI

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.4.6 Análise da categoria de material *Organic photovoltaic (OPV)*

Foram recuperados nove artigos sobre *Organic photovoltaic (OPV)*, em 2014 (3 artigos), 2016 (2 artigos), 2017 (1 artigo) e em 2018 (3 artigos) respectivamente. Percebe-se um incremento no número de publicações em 2018 em relação a 2017 de cerca de 200% quando ocorreu uma quantidade máxima de três artigos. A Tabela 2.7 apresenta os artigos recuperados para a categoria de material *Organic photovoltaic solar cells (OPV)*.

Os artigos que apresentam os estudos sobre *Organic photovoltaic solar cells (OPV)* abordam questões, tais como: a utilização de substratos flexíveis para a construção de células orgânicas por Cao et al.(2014) e a fabricação de células fotovoltaicas orgânicas impressas por jato de tinta relatadas nos estudos de Mitra et al. (2018) dentre outros.

As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 0,18% de PCE (Mitra et al., 2018) a 6,75% de PCE (Cho et al., 2018), a média das eficiências PCE encontradas situam-se na faixa de 4%, com os estudos de Cao et al. (2014) e Min et al. (2018) publicados nos periódicos *Renewable Energy e Organic Electronics: Physics, Materials, Application* respectivamente.

Tabela 2.7 Categoria de material *Organic photovoltaic (OPV)*.

Number	Authors	Year	Source title	Cited by	Material Category	Power conversion efficiency PCE (%)	Cost	Availability	Environment Impact
2	Mitra et al.	2018	Micromachines	-	Manufacturing of All Inkjet-Printed Organic Photovoltaic Cells	0,18	BAIXO	ALTA	NA
78	Min et al.	2018	Organic Electronics: physics, materials, applications	2	Physical and photovoltaic properties of A- π -D- π -A oligomers	6,19	NI	NI	NI
94	Cho et al.	2018	Macromolecular Rapid Communications	2	Small-molecule-based organic photovoltaics (SM-OPVs)	6,75	NI	NI	NI
164	Chiu et al.	2017	Journal of Electroanalytical Chemistry	6	Azobenzene	0,28	NI	NI	NI
212	Burlingame et al.	2016	Advanced Energy Materials	9	Electron-filtering compound buffer layers (EF-CBLs)	6,60	NI	NI	NI
238	Lechêne et al.	2016	Nano Energy	34	Power low consumption devices such as envisioned for the Internet of Things	6,20	NI	NI	NI
403	Peng et al.	2014	Applied Physics Letters	17	High open-circuit voltage, high fill factor single-junction	2,20	BAIXO	NI	NI
431	Mi et al.	2014	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	37	Fullerene Derivatives as Electron Acceptors	6,22	BAIXO	NI	NI
448	Cao et al.	2014	Renewable Energy	11	Organic solar cells on flexible substrates by using an inverted	3,00	BAIXO	ALTA	BAIXO

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.4.7 Análise da categoria de material *Hybridized solar cells*

Foram recuperados oito artigos sobre *Hybridized solar cells*, em 2014 (3 artigos), 2015 a 2017 (1 artigo) e em 2018 (2 artigos) respectivamente. O número de publicações é baixo nos últimos cinco anos quando verificou-se uma quantidade máxima de dois artigos. A Tabela 2.8 apresenta os artigos recuperados para a categoria de material *Hybridized solar cells*.

Os artigos que apresentam estudos sobre *Hybridized solar cells* abordam temas, sobre: método de evaporação por pulverização (Acciarri et al., 2018), Aplicações para energia solar, chuva e utilização de Nanocristais (Mehrabian et al., 2016); Síntese e caracterização de polímeros (Dutta et al., 2014) e (Sun et al., 2014).

As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 1,61% (Dutta et al., 2014) a 14,50% (Acciari et al., 2018), a média das eficiências de conversão de energia encontradas situam-se na faixa de 5%, com os estudos de Sun et al. (2014) publicado no periódico *Macromolecular Chemistry and Physics*.

Tabela 2.8 Categoria de material *Hybridized solar cells*.

Number	Authors	Year	Source title	Cited by	Material Category	Power conversion efficiency PCE (%)	Cost	Availability	Environment Impact
10	Acciarri et al.	2018	Solar Energy	2	Hybrid sputtering-evaporation (HSE) system	14,5	ALTO	BAIXA	NI
68	Duan et al.	2018	Journal of Energy Chemistry	3	Bifunctional polyaniline electrode tailored hybridized solar ce	6,51	NI	NI	NI
170	Wang et al.	2017	Journal of Materials Chemistry A	3	Hybridized Solar Cells for Solar and Rain Energies	9,50	NI	NI	NI
245	Mehrabian et al.	2016	Journal of Optical Technology (A Translatic	1	Nanocrystals fabricated on Al:ZnO films	3,25	NI	NI	NI
357	Mehrabian et al.	2015	Journal of Nanoelectronics and Optoelectro	3	Lead sulfide quantum dots (PbS QDs)	3,48	NI	NI	NI
425	Kim et al.	2014	Electrochimica Acta	12	Mesoporous Zn ₂ SnO ₄ sensitized by CdSe/CdS	1,63	NI	NI	NI
437	Dutta et al.	2014	Polymer Chemistry	17	Synthesis and characterization of two new D-A conjugated c	1,61	NI	NI	NI
482	Sun et al.	2014	Macromolecular Chemistry and Physics	2	Three new medium-bandgap polymers, PECz-DTBT6, PECz	5,91	NI	NI	NI

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.4.8 Análise da categoria de material *Heterojunction solar cells*

Foram recuperados seis artigos sobre *Heterojunction solar cells*, em 2015 (2 artigos), 2016 (3 artigos) e em 2017 (1 artigos) respectivamente. O número de publicações é baixo nos últimos cinco anos quando verificou-se uma quantidade máxima de três artigos. Na Tabela 2.9 são apresentados os artigos recuperados para a categoria de material *Heterojunction solar cells*.

Os artigos que apresentam estudos sobre *Heterojunction solar cells* abordam alguns temas, tais como: Solução molecular metal orgânica (Xu et al., 2017), Efeito da rugosidade dos substratos (Balashangar et al., 2015) e materiais absorventes de semicondutores (Chou et al., 2016).

As eficiências energéticas encontradas nestes estudos variam de 0,44% de PCE (Lan et al., 2016) a 1517% de PCE (Chiang et al., 2015), a média das eficiências PCE encontradas situam-se na faixa de 6%, com os estudos de (Dagher et al., 2016) publicado no periódico *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.

Tabela 2.9 Categoria de material *Heterojunction solar cells*.

Number	Authors	Year	Source title	Cited by	Material Category	Power conversion efficiency (% PCE)	Cost	Availability	Environment Impact
127	Xu et al.	2017	Journal of Materials Science	5	Metal-organic molecular solution	0,68	BAIXO	ALTA	BAIXO
230	Lan et al.	2016	Applied Physics Letters	5	Radiative coupling	0,44	NI	NI	NI
261	Dagher et al.	2016	Journal of Materials Science: Materials in Ele	4	PbS/CdS heterojunction	5,04	NI	NI	NI
282	Chou et al.	2016	Journal of the Electrochemical Society	8	Ternary semiconductor absorber material (Ag ₃ SbS ₃)	1,47	NI	NI	NI
296	Chiang et al.	2015	ACS Applied Materials and Interfaces	18	Functional p-type, polymerized organic electrode interlayer	15,17	NI	NI	NI
379	Balashangar et al	2015	Journal of Nanoelectronics and Optoelectro	4	The Effect of Surface Roughness of Substrates	14,50	NI	NI	NI

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.4.9 Análise das categorias de materiais *Singlejunction solar cells*, *Polymer solar cells (PSC)*, *Homojunction solar cell* e *Graphene films*

Foram recuperados somente sete artigos sobre os seguintes materiais *Singlejunction solar cells* (3 artigos, 2018), *Polymer solar cells* (PSC) (1 artigo, 2016 e 1 artigo, 2018), *Homojunction solar cell* (1 artigo, 2017) e *Graphene films* (1 artigo, 2015) respectivamente. O número de publicações sobre estes materiais é baixo nos últimos cinco anos e verificou-se uma quantidade de três artigos sobre *Singlejunction solar cells* em 2018. Na Tabela 2.10 são apresentados os artigos recuperados para a categoria de material *Heterojunction solar cells*.

Os artigos sobre *Singlejunction solar cells* abordam assuntos sobre Nanocristais Chen et al. (2018), Semicondutores de calcogenetos metálicos binários por Ríos-Ramirez et al. (2018) e o desempenho de células de GaAs por Ho et al. (2018). Para *Polymer solar cells* foram estudados os materiais de transporte de furos (HTM) (do inglês, *Hole transporting material*) por Xiao et al. (2018) e Nanotubos de carbono por Shastry et al. (2016). Para *Homojunction solar cells* foram estudados um semiconductor composto de índio, gálio e fósforo (Russo et al., 2017). E também a eficiência do ânodo de grafeno modificado por óxido de molibdênio (Wuet al, 2015).

As eficiências energéticas encontradas nestes estudos são para *Singlejunction solar cells* uma média de 14,26% de PCE, para *Polymer solar cells* (PSCs) uma média de 7,21% de PCE, para *Homojunction solar cell* valor de PCE de 29% e *Graphene films* um PCE de 3,56%.

Tabela 2.10 Categorias de materiais *Singlejunction solar cells*, *Polymer solar cells (PSCs)*, *Homojunction solar cell* e *Graphene films*.

Number	Authors	Year	Source title	Material	Material Category	Power conversion efficiency (% PCE)	Cost	Availability	Environment Impact
302	Wuet al.	2015	ACS Applied Materials and Interfaces	Graphene films	Molybdenum oxide modified graphene anode	3,56	NI	NI	NI
174	Russo et al.	2017	Applied Energy	Homojunction solar cell	Indium gallium phosphide (InGaP) solar cells	29,00	NI	NI	NI
102	Xiao et al.	2018	Acta Polymerica Sinica	Polymer solar cells (PSCs)	The hole transporting material (HTM)	8,60	NI	NI	NI
231	Shastry et al.	2016	ACS Energy Letters	Polymer solar cells (PSCs)	Ternary Polymer-Perylenediimide-Carbon Nanotube	5,81	BAIXO	NI	NI
1	Rios-Ramirez et	2018	Physica Status Solidi (A) Applications and M	Single-junction solar cells	Selenide of sulfide of antimony ($Sb_2 S_{1,03} Se_{1,02}$)	5,93	BAIXO	ALTA	BAIXO
9	Chen et al.	2018	ACS Photonics	Single-junction solar cells	Upconversion nanocrystals (UCNC)	13,40	NI	NI	NI
39	Ho et al.	2018	Thin Solid Films	Single-junction solar cells	The electrical and optical performance of single-junction Ga	23,44	NI	NI	NI

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.5 Discussão

Os artigos selecionados da revisão sistemática foram agrupados quanto à classe de materiais, para determinar em qual geração de célula solar fotovoltaica o material estudado se enquadraria. Além de procurar nestes estudos o quesito eficiência energética, procurou-se verificar também no resumo e nas conclusões as discussões sobre as questões ambientais, como o baixo custo, a disponibilidade dos materiais e o impacto ambiental do uso destes. Por meio da análise do seu conteúdo percebeu-se que a maioria dos estudos recuperados não indicou e não teve como foco principal a apresentação destas questões e sim o foco na síntese e fabricação do material mencionado.

A primeira categoria com mais artigos recuperados foi sobre células solares de *perovskita*, um material híbrido orgânico e inorgânico. Dentre os artigos, o que obteve a menor eficiência foi o estudo de Noel et al. (2014) com eficiência de 6% utilizando um composto de halogeneto inorgânico-orgânico sem chumbo em sua composição para produzir um filme fino de *perovskita*. A maior eficiência encontrada foi de 22,0% relatada por Seo et al. (2018) utilizando o composto Spiro-OMeTAD with Zn-TFSI₂. A linha de pesquisa para esta célula com a maior eficiência investiga o material de transporte de furos para células solares de *perovskita*, o *Hole transporting material* (HTM). O HTM facilita para que cargas elétricas presentes como elétrons e buracos livres no átomo migrem para a banda de condução se a energia de ligação dos elétrons no átomo for baixa o suficiente, ao invés de permanecerem ligados criando a corrente elétrica. A propriedade deste material é responsável pela vazão eficiente de lacunas fazendo com que a eficiência e a degradação da célula solar melhorem em longo prazo. O aumento nas eficiências nos anos de 2014 a 2018 indica que a célula solar de *perovskita* tornou-se alvo de pesquisas utilizando diversas técnicas de síntese e fabricação, como as recuperadas nesta revisão da literatura.

Quanto aos quesitos baixo custo, alta disponibilidade e baixo impacto ambiental, somente o estudo de Moyez et al. (2017) relatou estas questões. Apesar de apresentar uma eficiência muito baixa neste estudo, de apenas 3,41% de eficiência, o que é relativamente pouco para aplicações comerciais. As eficiências encontradas na revisão sistemática no período de 2014 a 2018 passaram de uma média de 9,2% para 15,61% indicando uma melhora no desenvolvimento de novos materiais para as células solares de *perovskita*.

As células solares sensibilizadas por corante foram nomeadas por Brian O'Regan e Michael Grätzel em 1991. Estas células são denominadas células solares híbridas, pois são formadas por materiais orgânicos e inorgânicos. São fabricados com materiais baratos em substratos flexíveis, podem ser coloridas dependendo do corante a ser utilizado e os processos de produção são fáceis com relação às células solares de silício. Estes corantes têm sido muito pesquisados como componente de coleta de luz em células solares sensibilizadas por corante, por absorverem o máximo do espectro eletromagnético e terem estabilidade diante da exposição solar por muito tempo.

O quesito eficiência energética, no resumo e nas conclusões sobre as questões ambientais, como o baixo custo, a disponibilidade dos materiais e o impacto ambiental foram averiguados. Os estudos de Vekariya et al. (2016); Younas et al. (2018) e Hemavathi et al. (2018) relatam que estes quesitos tais como o custo baixo, a alta disponibilidade e o baixo impacto ambiental com o foco no desenvolvimento de materiais são ambientalmente corretos.

Uma célula solar de ponto quântico (QDSC) usa pontos quânticos para serem materiais fotovoltaicos absorventes, substituindo silício cristalino (c-Si), Seleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS), o Telureto de Cádmio (CdTe) etc como materiais semicondutores. Os pontos quânticos possuem vários níveis de energia, podendo ajustar a diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução de um material sólido (tornando-o um isolante ou semicondutor), ou o *bandgap* e assim alterar o seu tamanho e, por conseguinte os níveis de energia. 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 *bandgap* teórico de uma célula de junção-única é de 1,34 eV, o valor do *bandgap* do silício é de 1,1 eV e se aproxima do valor ideal, o que torna este material o melhor para a construção de células solares. Todavia, é possível aprimorar uma célula de junção-única acumulando verticalmente vários materiais com *bandgaps* diferentes, também chamados de "tandem" ou "multijunção".

As questões ambientais, como o baixo custo, a disponibilidade dos materiais e o impacto ambiental também foram averiguados nesta pesquisa. Mas somente o estudo de Aragaw et al. (2017) forneceu estas informações tais como o custo baixo, a alta disponibilidade e o baixo impacto ambiental com o foco no desenvolvimento de materiais

ambientalmente corretos. As células solares de pontos quânticos apresentaram uma média de valores de eficiência de 2,73%, mas desconsiderando dois estudos, o de Beattie et al. (2017) com 18,3% aonde propõe uma nova abordagem de engenharia quântica capturando uma fração maior do espectro eletromagnético por meio de uma faixa estreita de estados eletrônicos nas bandas do semicondutor e o estudo Wang et al. (2018) com 15%, utilizando a fotocatalise e fotoeletroquímica das células.

As células solares de ponto quântico requerem processos de preparação e síntese fáceis em pequenos lotes e também em processos industriais. Podem ser processadas de forma manual ou automática utilizando *spray* ou impressão, com a consequente redução dos custos das células e dos módulos fotovoltaicos.

Uma célula solar multijunção utiliza diferentes materiais semicondutores, para formar múltiplas junções p-n, de acordo com o comprimento de onda absorvido pelo material haverá correntes elétricas em resposta. Fazendo o uso de diferentes materiais é possível um aproveitamento maior dos diferentes comprimentos de onda, aumentando a eficiência de conversão de energia.

O silício cristalino (c-Si) apresenta eficiências entre 20% e 25%, e as células multijunções apresentam eficiências de 30% sob iluminação de um sol. O processo de síntese e fabricação da célula solar multijunção é mais complexo e seu preço de fabricação é mais alto. As células solares multijunção requerem processos industriais de síntese e preparação difíceis e custosos. Por esta razão o seu uso limita-se a projetos especiais, mais especificamente no setor aeroespacial e em sistemas fotovoltaicos concentradores (CPV) nas usinas fotovoltaicas.

As questões ambientais, como o baixo custo, a disponibilidade dos materiais e o impacto ambiental foram investigados no estudo de Routray et al. (2018) que citou o custo baixo, mas não citou a disponibilidade ou impacto ambiental. As células solares multijunção apresentaram uma média de valores de eficiência de 24,64%.

A célula solar orgânica utiliza polímeros orgânicos condutores para absorção e transporte de cargas na produção de energia elétrica utilizando o efeito fotovoltaico, elas também são chamadas de células solares poliméricas. A célula solar orgânica possui baixo custo de produção, são flexíveis e são baratas para as aplicações fotovoltaicas. Por meio da síntese e fabricação da célula pode-se alterar o *bandgap*, melhorando as eficiências de

conversão de energia. Porém elas possuem baixa eficiência e resistência comparadas com as células solares de silício cristalino (c-Si).

As células solares orgânicas exibem desempenho baixo 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%. Estas células solares de orgânicas não aguentam degradação ambiental, sem proteção eficaz.

As questões ambientais, como o baixo custo, a disponibilidade dos materiais e o impacto ambiental também foram averiguados nos estudos de Peng et al. (2014), Mi et al. (2014), Cao et al. (2014) e Mitra et al. (2018), afirmando que estas células solares orgânicas possuem custo baixo, a alta disponibilidade e o baixo impacto ambiental tornando-se materiais ambientalmente corretos.

As células solares híbridas possuem 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.

As células solares híbridas exibem eficiência média de 5,80% se comparadas às eficiências das células solares de silício cristalino (c-Si) com eficiências de conversão de energia de 20% a 25%. A eficiência média no período de 2014 a 2018 passou de 3,05% para 10,51% respectivamente, indicando uma melhora nas pesquisas deste tipo de material, mas a eficiência deste tipo de célula deve aumentar para iniciar a fabricação em escala industrial.

As células solares de heterojunção produzem 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.

A célula solar de heterojunção na revisão sistemática exibiu um desempenho médio de 6,21% se comparadas às eficiências das células solares de silício cristalino (c-Si). O número de pesquisas no período analisado diminuiu de três artigos recuperados em 2016 para nenhum em 2018. Estas células poliméricas devem ter a sua eficiência melhorada em laboratório para que seja possível a produção em escala industrial.

As questões ambientais, como o baixo custo, a disponibilidade dos materiais e o impacto ambiental também foram averiguados e somente o estudo de Xu et al. (2017), afirmou que estas células solares de heterojunção possuem custo baixo, a alta disponibilidade e o baixo impacto ambiental tornando-se materiais ambientalmente corretos.

A célula solar de junção-única ou homojunção transformam a energia solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, utilizando um semicondutor do tipo n (doador) e do tipo p (receptor), também são chamadas de junção p-n. Já a célula solar de polímero ou plástico, usa polímero combinado como absorvedores de luz, como agentes redutores ou receptores de elétrons.

Quanto ao grafeno é uma forma cristalina do carbono, costuma ser muito forte, mais fino e leve, ótimo condutor de eletricidade, constituindo de uma folha plana de átomos de carbono densamente compactados. Estes diferentes materiais apresentam 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.

2.6 Considerações Finais

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?”** apresentando uma 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, ecologicamente melhores podem aumentar a participação das tecnologias fotovoltaicas na matriz energética trazendo benefícios sociais, ambientais e econômicos. Desenvolver novas tecnologias que sejam mais baratas e mais eficientes, devem se manter constantes e permanentes, contribuindo desta maneira para o desenvolvimento da economia e do meio ambiente. Embora seja pequena a parcela da energia solar fotovoltaica na oferta interna de energia, as pesquisas relativas a esse tipo de energia trazem bons resultados e sinalizam boas expectativas para o futuro.

A célula de silício cristalino domina o mercado por suas importantes características elétricas que têm sido estudadas desde o século passado, mas outros tipos de células têm sido desenvolvidos, as chamadas células solares de segunda e de terceira geração, com custos mais baixos de fabricação, melhores processos e eficiências de conversão de energia. Razão pela qual este estudo prospectou e recuperou através da revisão sistemática da literatura, diversos estudos com materiais promissores.

As tecnologias de segunda e terceira geração no aspecto maior eficiência e menor custo, para superar as dependências de produtos provenientes de países como a China e EUA parecem ser de grande interesse para o Brasil, pois trariam menor dependência dos produtos importados desses países. Sendo pesquisados e produzidos internamente no país, poderiam ajudar a desenvolver a indústria local ampliando as cadeias produtivas, ativar a economia gerando mais impostos para os governos federal, estadual e municipal e ampliar o conhecimento científico.

Estes novos materiais são chamados de células de filme fino (A-Si, CdTe, CIGS, GaAs), células multijunção (*Hybrid, Multijunction, Singlejunction*), células *perovskita*, células sensibilizadas por corantes (DSSC), células orgânicas (OPV) e células de ponto quântico (QDSSC) como sendo os mais promissores materiais pesquisados. 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 significantes foram as células de *perovskita* e Multijunção, pois elas 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, as sensibilizadas por corantes (DSSC), as células orgânicas (OPV) e as células de ponto quântico (QDSSC) aparecem como células da terceira geração com eficiências similares, mas 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, de junção-única e heterojunção, tem eficiência maior que as do segundo grupo, porém os níveis de eficiência relatados ainda estão baixos.

Na revisão sistemática 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.

Referências

- Atlas de energia elétrica do Brasil (3a edição). (2008). Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica.
- Barbosa Filho, W. P., Ferreira, W. R., Azevedo, A. C. S. de, Costa, A. L., & Pinheiro, R. B. (2015). Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: Impactos ambientais e políticas públicas. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 4, 628. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v4e02015628-642>
- Brasil, M. (2018). Balanço Energético Nacional. MME, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília, DF. Disponível em 2018.
- Bühler, A. J., Santos, F. H. dos, & Gabe, I. J. (2018). Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Apresentado em Gramado. Recuperado de <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/267>
- Carvalho, P. S. L. de, Mesquita, P. P. D., & Rocio, M. A. R. (2014). Carvalho, P. S. L. D., Mesquita, P. P. D., & Rocio, M. A. R. (2014). A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?
- Chen, W., Hong, J., Yuan, X., & Liu, J. (2016). Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1025–1032. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.024>
- Goldemberg, J., & Lucon, O. (2007). Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*, (72), 6-15.
- Goldemberg, J., & Moreira, J. R. (2005). Política energética no Brasil. *Estudos avançados*, 19(55), 215-228.
- Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., & Xu, C. (2016). Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. *Solar Energy*, 133, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.013>
- IEA. (2018). Sustainable Development Goal 7. Recuperado 9 de abril de 2019, de International Energy Agency IEA website: <https://www.iea.org/sdg/renewables/>
- Jordani, A. R. (2018). Perspectivas da microgeração e distribuição de energia solar fotovoltaica no Brasil: um estudo prospectivo via mineração de patentes.
- Kruyt, B., van Vuuren, D. P., de Vries, H. J. M., & Groenbergen, H. (2009). Indicators for energy security. *Energy Policy*, 37(6), 2166–2181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.006>
- Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Asri Mat Teridi, M., Sepeai, S., ... Sopian, K. (2018). Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.048>
- Lunardi, M. M., Ho-Baillie, A. W. Y., Alvarez-Gaitan, J. P., Moore, S., & Corkish, R. (2017). A life cycle assessment of perovskite/silicon tandem solar cells. *Progress in*

- Photovoltaics: Research and Applications, 25(8), 679–695. <https://doi.org/10.1002/pip.2877>
- Machete, R., Falcão, A. P., Gomes, M. G., & Moret Rodrigues, A. (2018). The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. *Energy and Buildings*, 177, 290–302. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.064>
- Millard, D. (Org.). (2018). Key world energy statistics. The International Energy Agency (IEA).
- Ministério das Minas e Energia, M. (2007). Plano Nacional de Energia - 2030. Recuperado 11 de abril de 2019, de Empresa de Pesquisa Energética EPE website: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>.
- MME. (2018). Resenha Energética Brasileira 2018 Ano Base 2017. Recuperado de <http://www.mme.gov.br>
- Overholm, H. (2015). Spreading the rooftop revolution: What policies enable solar-as-a-service?. *Energy Policy*, 84, 69-79.
- Pazheri, F. R., Othman, M. F., & Malik, N. H. (2014). A review on global renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 835-845.
- Ren21, R. (2016). Global status report. REN21 secretariat, Paris.
- Rhodes, Christopher J. (2016). A conferência de mudança climática de Paris 2015: COP21. *Progresso da ciência*, 99 (1), 97.
- Sandor, D., Fulton, S., Engel-Cox, J., Peck, C., & Peterson, S. (2018). System Dynamics of Polysilicon for Solar Photovoltaics: A Framework for Investigating the Energy Security of Renewable Energy Supply Chains. *Sustainability*, 10(1), 160. <https://doi.org/10.3390/su10010160>
- Tolmasquim, M. T. (2016). Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Recuperado de <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/livro-sobre-energia-renovavel-hidraulica-biomassa-eolica-solar-oceanica>
- Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N. A., & Selvaraj, J. A. /L. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 443–461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>
- Vichi, F. M., & Mansor, M. T. C. (2009). Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. *Química Nova*, 32(3), 757–767. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300019>
- Wade, A., Stolz, P., Frischknecht, R., Heath, G., & Sinha, P. (2018). The Product Environmental Footprint (PEF) of photovoltaic modules—Lessons learned from the environmental footprint pilot phase on the way to a single market for green products in the European Union. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(8), 553–564. <https://doi.org/10.1002/pip.2956>

3 ESTUDO 2: PANORAMA DAS PATENTES RELATIVAS AOS MATERIAIS ALTERNATIVOS AO SILÍCIO PARA A PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS.

3.1 Introdução

Desde a Idade Média no século XV, o ser humano utilizou as fontes naturais de energia para realizar suas tarefas, os combustíveis fósseis eram utilizados para as pequenas atividades e no conforto do lar. Porém com a Revolução Industrial e os diversos tipos de máquinas inventados, o uso da energia se intensificou (Goldemberg & Lucon, 2007).

A descoberta e o uso de variadas fontes energéticas adequaram ao homem e à sociedade uma melhor qualidade de vida, a transformação e o benefício dessa energia proporciona o bem-estar ao ser humano (Goldemberg & Lucon, 2007). A transformação da energia obtida em serviços apropriados gera o desenvolvimento econômico, porém esta atividade deve ser bem planejada e praticada (Goldemberg & Moreira, 2005).

O aumento mundial do uso de energia devido ao aumento da população, ao crescimento industrial, à migração da população para áreas urbanas e o aumento da renda, provocou um aumento do consumo de energia elétrica. Os combustíveis fósseis utilizados nestas atividades já respondem por grande parte das necessidades globais de energia primária com o aumento rápido dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera no século 21 (Pazheri, Othman, & Malik, 2014).

Essas preocupações ambientais foram sintetizadas na Conferência do Clima de Paris, chamada de 21ª Conferência das Partes (COP21), ratificado por 197 países expressando a preocupação dos países signatários em reduzir as emissões dos GEE (Rhodes, 2016).

Segundo o *Global Status Report - GSR (2016)* editado pela Rede de Energias Renováveis para o Século XXI (REN21), o setor elétrico aumentou significativamente o uso de energias renováveis no mundo em 2015, destacando que a energia eólica e a energia solar acrescentaram 63 e 50 GW na capacidade disponível, totalizando a capacidade de energia disponível em 433 e 227 GW respectivamente.

A adoção dessas tecnologias ajudaria o planeta a ser descarbonizado para não ultrapassarmos o registro de 2°C de aumento da temperatura média no mundo, possibilitando voltar aos níveis de aquecimento antes da Revolução Industrial, uma medida adotada no acordo climático de Paris (COP21) em 2016 (Souza & Corazza, 2017).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no Balanço Energético Nacional 2018 ano base 2017 a oferta interna de energia no Brasil foi de 624,3 TWh, valor 0,7% superior ao ano anterior quando o consumo final foi de 526,2 TWh, um avanço de 1,2%. Embora as energias renováveis representem 80,4% da matriz energética brasileira, a energia solar alcançou inexpressivos 0,1% deste total (EPE, 2018).

Dentre os empenhos para aumentar a oferta de energia elétrica pode-se buscar as fontes renováveis de energia que não contribuem para o aumento das emissões de GEE, desta maneira a sociedade torna-se menos dependente de fontes não renováveis, como carvão e derivados do petróleo (Falleiro, Andrade & Gastaldini, 2016).

As energias eólica, solar, maremotriz, geotérmica, hidráulica e nuclear são atualmente as principais fontes para a produção de energia limpa e verde disponível e ajudam a descarbonizar a matriz elétrica brasileira (Pazheri, Othman & Malik, 2014).

A participação da energia solar na matriz mundial no decênio 1996 a 2006 aumentou cerca de 2000% atingindo 7,8 TW da potência instalada, porém no Brasil a participação foi insignificante e por pouco chega a não ser citada atingindo apenas 0,1%, segundo o Atlas de Energia Elétrica Brasil (2008).

Vichi e Mansor (2009) afirmam que se apenas uma fração da radiação solar fosse transformada, ela já seria maior que a soma de todas as fontes não renováveis levando em consideração os combustíveis fósseis e nucleares.

O Brasil pode adaptar-se e explorar uma mudança nas fontes geradoras de energia elétrica além das hidroelétricas complementando-as, pode usar essa fonte em geração de energia térmica ou energia elétrica fotovoltaica. Estes sistemas possibilitam a geração distribuída com plantas de pequena e média capacidade instalada em aplicações residenciais e comerciais (Pereira et al., 2006).

Diante do exposto acima, o Brasil tem grande potencial para o emprego de fontes renováveis de energia, pois possui muitos recursos hídricos, tem clima favorável, disponibilidade de terras cultiváveis e elevados níveis de insolação para a energia solar. Devido às perspectivas favoráveis ao Brasil à produção de energias renováveis, o presente estudo é importante, pois pretende verificar: “Quais são as patentes depositadas no banco de

dados *PATENTSCOPE* da Organização Mundial de Propriedade Intelectual (OMPI) relacionada às células solares fotovoltaicas?”.

O objetivo deste trabalho é recuperar e analisar os depósitos de patentes, que podem ser utilizados como alternativas ao silício na produção de células solares fotovoltaicas.

3.2 Referencial Teórico

3.2.1 Inovação e sustentabilidade

Inovar é materializar as soluções para os problemas tornando concretas as ideias concebidas. Para que a inovação tenha uma aparência de novidade, ela necessita produzir os resultados positivos nas dimensões tecnológicas e revelar os melhoramentos econômico-financeiros para a sociedade. A prosperidade das nações não se explica mais pelos fatores capital e trabalho, mas pela capacidade dos países se tornarem criativos, estabelecendo novos processos e soluções tecnológicas. Os países que dominarem o conhecimento elevarão os níveis de produtividade, renda e qualidade de vida. Estes países são aqueles que adquiriram o conhecimento e inovaram (Barroso, Shamma, Marchesini, Pigatto & Melo, 2005).

Segundo a OCDE (2005) a inovação tecnológica é o aperfeiçoamento de qualidades de produtos ou processos para dar ao consumidor serviços novos ou melhorados. A diferença entre a novidade e outras melhorias está focada nas particularidades de desempenho dos produtos e processos e a adoção destes pelo mercado.

Já Caruso e Tigre (2004) definiram a prospecção tecnológica como sendo uma técnica desenvolvida que possibilita acompanhar as tendências que possibilitarão avanços socioeconômicos. E a adoção dessas tendências tecnológicas possibilitará a incorporação dos novos conhecimentos e o avanço na resolução de problemas.

Com objetivo de contribuir com a evolução tecnológica brasileira, algumas empresas exercem a cooperação empresa e universidade, essa parceria tem como finalidade produzir conhecimento científico para desenvolver novas tendências de mercado (Costa, Porto, & Plonski, 2010).

Amadei e Torkomian (2009) enfatizaram que as instituições de pesquisa melhoraram muito suas estruturas internas e estão direcionando cada vez mais suas atividades acadêmicas para o desenvolvimento econômico e disponibilizando seu conhecimento científico para a sociedade.

Segundo Massarani (2012), as pesquisas em ciência e tecnologia aumentaram muito no Brasil e esta produção científica é um instrumento valioso para enfrentar o subdesenvolvimento e as questões socioeconômicas. Então o desenvolvimento de novas tecnologias em materiais fotovoltaicos pode aumentar a participação dessa inovação na matriz energética brasileira e contribuir para diminuir o impacto ambiental.

Analisar as tecnologias inovadoras e suas aplicações é essencial para a sociedade, a economia, e as empresas (Porter, 2004). As tecnologias inovadoras têm sido desenvolvidas devido às mudanças climáticas e outros problemas globais. Diversos governos têm desenvolvido políticas públicas para incentivar as indústrias inovadoras a enfrentarem a competição global e assim manterem sua posição de liderança. No mundo atual as indústrias de países emergentes estão sendo direcionadas para o desenvolvimento científico e tecnológico, pois essa preocupação estratégica contribuirá para o aumento da produtividade e o desenvolvimento sustentável (Li, Zhou, Xue & Huang, 2015).

Segundo o Ministério das Minas e Energia [MME] (2007), as fontes de energia renováveis podem suprir a demanda de energia elétrica. A produção das células fotovoltaicas baseadas na tecnologia do silício tem altos custos de fabricação e o desenvolvimento da cadeia de produção das células fotovoltaicas de segunda e terceira geração surge como uma alternativa, posto que o Brasil é visto como um bom candidato à implementação de painéis fotovoltaicos devido ao baixo aproveitamento dos seus elevados valores anuais de irradiação solar e participação das fontes de energia solar na matriz energética brasileira.

Diante disso, o Brasil deve adotar políticas públicas para o setor energético buscando uma maior competitividade e maior integração do sistema energético nacional com outros países de forma multilateral para aumentar o comércio de produtos e serviços, melhorando a competitividade da cadeia de suprimentos solar. Ao não adotar este posicionamento governamental o Brasil pode sofrer uma redução do fluxo de comércio e dos resultados na eficiência energética (MME, 2007).

A energia solar vem recebendo maior atenção em pesquisa e desenvolvimento na comunidade científica, sendo uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis, com impactos ambientais baixos. Se o custo da produção das células solares fotovoltaicas diminuir, proporcionaria condições melhores para a ampliação dos sistemas de geração distribuída de energia solar fotovoltaica (Ribeiro, 2012; Louwen, van Sark, Schropp & Faaij, 2016).

3.2.2 A energia solar fotovoltaica

Em todo o território brasileiro há uma excelente incidência de radiação solar diariamente, também possuímos reservas de quartzo, componente para a produção do silício que compõe os painéis fotovoltaicos. Estes dois fatores são importantes para a produção dos painéis fotovoltaicos. Também é uma oportunidade ímpar no desenvolvimento tecnológico para a produção de energia solar fotovoltaica. Para atender à demanda na produção de energia limpa, além da economia de escala advinda da redução dos custos envolvidos na produção, a busca por novos materiais que possam baratear a produção dos painéis solares fotovoltaicos é uma inovação que vem sendo buscada por pesquisadores de diversos países (Jannuzzi, 2012).

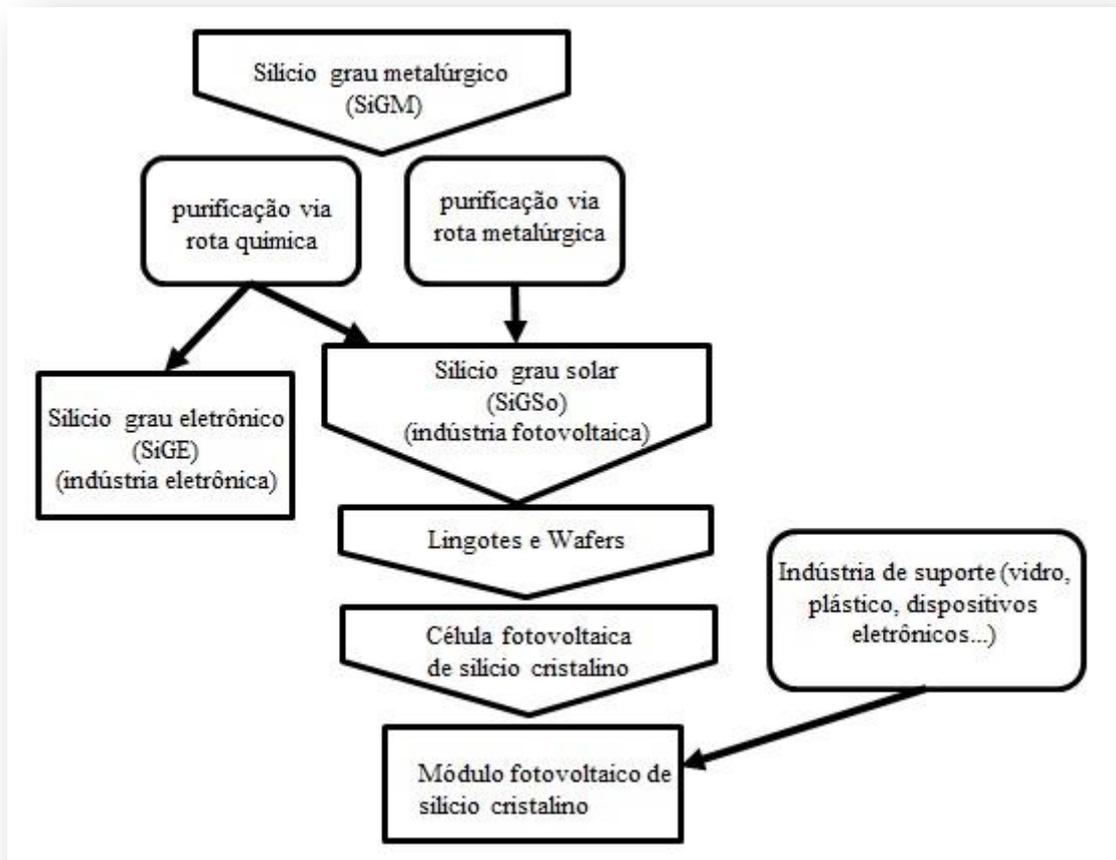
O dióxido de silício (SiO_2), a chamada sílica, é um composto químico encontrado em estado puro ou na forma de minerais no meio ambiente. Emprega-se o termo sílica para designar todas as suas formas cristalinas e amorfas. Em sua forma natural é localizado em rochas de quartzo, areia, arenitos e quartzitos (Souza, 2012).

A sílica é aproveitada na indústria da construção civil, para a produção de vidros, cerâmicos e refratários. O silício para utilização comercial é obtido em forno elétrico a partir da fusão da sílica pela redução do dióxido de silício (SiO_2) a altas temperaturas, alcançando uma pureza de 99,5%. Os métodos de obtenção do silício podem ser físicos ou químicos. Os processos físicos, ou rota metalúrgica, baseia-se na solubilidade das impurezas concentradas no silício líquido (Souza, 2012). Consiste em fundir um lingote de silício solidificado aquecendo-o e deslocando o foco do calor ao longo do lingote para o silício se solidificar. Este movimento do foco do calor faz com que as impurezas se desloquem para serem retiradas conseguindo uma pureza mais alta (Carvalho, Mesquita, Rocio, 2014).

Já os processos químicos de purificação do silício agem sobre os compostos triclorossilano (HSiCl_3), o tetracloreto de silício (SiCl_4) e o silano (SiH_4) decompondo-os para a obtenção do silício, alcançando uma pureza de 99,9999999% (nove 9s), este processo é chamado Siemens (Cortes, 2011).

A indústria de semicondutores e fotovoltaica utiliza o silício grau eletrônico (Si-GE), chamado silício monocristalino, pelo método Czochralski de mais alto grau de pureza. Outra maneira de obtenção do silício grau solar (Si-GSo) é a produção do silício de grau metalúrgico melhorado (Si-GMM) a partir do silício de grau metalúrgico (Si-GM) (Cortes, 2011). Na Figura 3.1 se verifica a cadeia produtiva da indústria fotovoltaica.

Figura 3.1 Cadeia produtiva da indústria fotovoltaica.



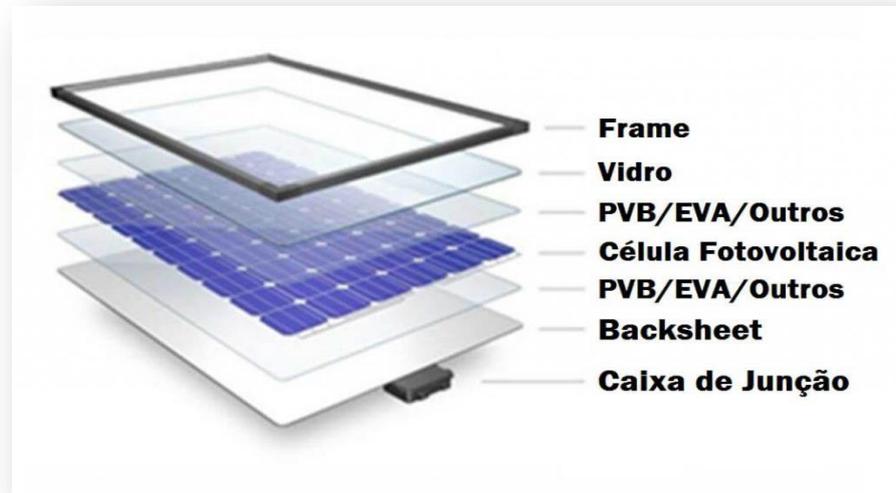
Fonte: Adaptado de Carvalho, Mesquita e Rocio (2014)

A conversão da energia solar em energia elétrica é obtida utilizando-se as células solares, a esta transformação de energia dá-se o nome de efeito fotovoltaico (Carvalho, 2014). A primeira descoberta do efeito fotovoltaico ocorreu com o cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel, em 1839, que embasa o funcionamento da célula solar fotovoltaica (Andrei et al., 2014).

O módulo fotovoltaico é constituído de uma unidade principal chamada célula solar fotovoltaica, cortada em dimensões adequadas. As células solares são conectadas em série e/ou paralelo para se atingir a tensão adequada do painel em torno de 12V quando exposto à radiação solar, uma única célula fornece apenas uma tensão de aproximadamente 1V. A associação em série e paralelo das células é necessário para se obter a corrente fornecida pelo painel e por conseguinte a potência final do módulo (Souza, 2012). As células solares são

montadas no formato de um painel com uma estrutura de proteção de alumínio, como mostrado na Figura 3.2.

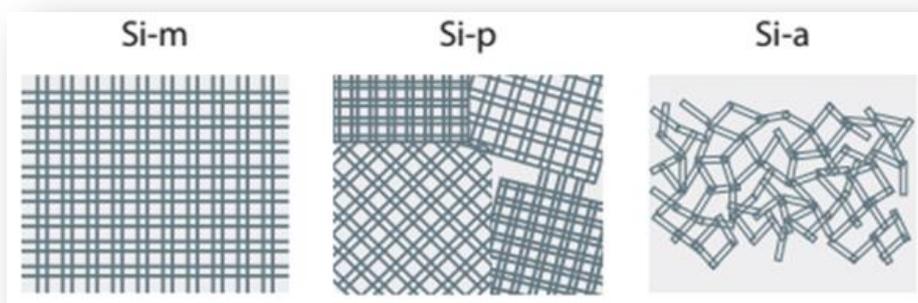
Figura 3.2 Estrutura de um painel fotovoltaico.



Fonte: IBRAP (2019)

Encontram-se comercialmente três tipos de células fotovoltaicas constituídas de silício, as de *Crystalline silicon (c-Si)*, *Monocrystalline Silicon (Mono-Si)* e *Polycrystalline Silicon (Poly-Si)* e também as de *Amorphous silicon (A-Si)* (Machado & Miranda 2014). Na Figura 3.3 podemos verificar as estruturas atômicas destes materiais.

Figura 3.3 Estrutura de materiais sólidos: a) monocristalino; b) policristalino; c) amorfo.



Fonte: Flandoli (2017)

Segundo Mori, Santos e Sobral (2007) os valores típicos de eficiência energética das células solares fotovoltaicas de silício podem ser observados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Comparativo de eficiência entre células fotovoltaicas de tecnologias de silício.

Material	Eficiência		
	Laboratório	Produção	Produção em série
Silício Monocristalino (m-Si)	24,7%	18,0%	14,0%
Silício Policristalino (p-Si)	19,8%	15,0%	13,0%
Silício Amorfo (a-Si)	13,0%	10,5%	7,5%

Fonte: Adaptado de Souza (2012)

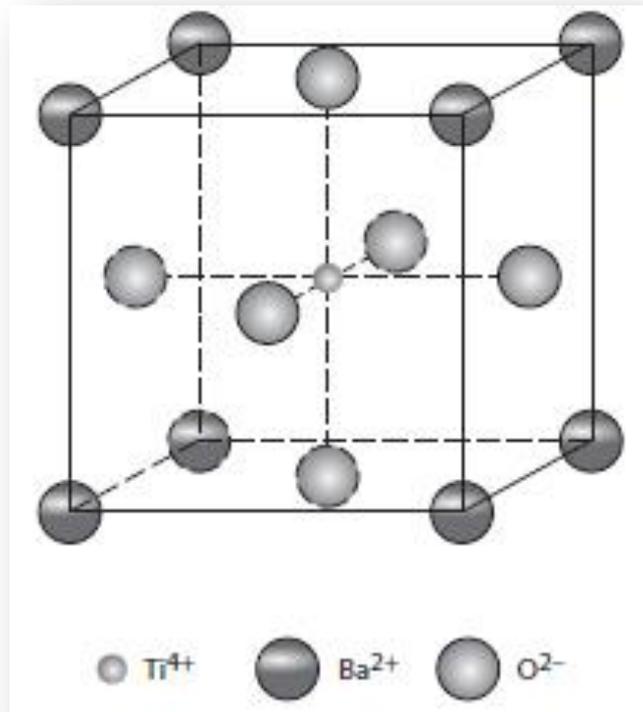
Segundo Reich (2011), durante a produção fotovoltaica - no processo estequiométrico ocorre a redução do quartzo e o carbono para o Si e o CO₂ com a emissão de gases fluorados e dióxido de carbono que são poluentes associados aos GEE e que chegam a ± 2g CO₂ - eq/kWh. Também na reciclagem acontece o impacto ao meio ambiente, pois ocorre a incineração de plásticos presentes nos módulos que são causadores de emissões diretas de dióxido de carbono CO₂.

Outro material que utiliza o efeito fotovoltaico é a célula solar de *perovskita* que obedece a uma estrutura cristalina, isto é, um arranjo tridimensional de átomos que se repetem espacialmente possuindo a fórmula ABX₃. O mineralogista e químico alemão *Gustav Rose*, descobriu o mineral *perovskita* em 1839, nos montes Urais, Rússia. O nome *perovskita* é uma homenagem ao mineralogista e militar russo *Lev Alexeievitch Perovsky* (Moure & Peña, 2015).

Segundo Moure et al. (2016), a *perovskita* é constituída a partir de ânions X (especialmente o oxigênio), com dois tipos de locais, um local com coordenação 6 (seis) e outro local com coordenação 8 (oito) ou 12 (doze). Os locais com coordenação 8 (oito) podem conter cátions de 1(um) a 6 (seis) estados de valência, enquanto que em locais de coordenação 8 (oito) ou 12 (doze) podem ser localizados cátions de tamanho grande monovalente, di ou trivalentes. Muitas fórmulas químicas, propriedades e aplicações podem existir, mas na natureza apenas alguns compostos do tipo *perovskita* podem ser achados.

Um exemplo de composto cerâmico *perovskita* é o Titanato de Bário (BaTiO_3) que possui três tipos de átomos: o átomo de Ba^{2+} , ocupando os oito vértices da rede cúbica simples, os átomos de O^{2-} que se encontram nos centros das seis faces, e o átomo de Ti^{4+} que ocupa o centro do corpo do cubo (Callister & Rethwisch, 2014). Este composto cerâmico de *perovskita* é mostrado na Figura 3.4.

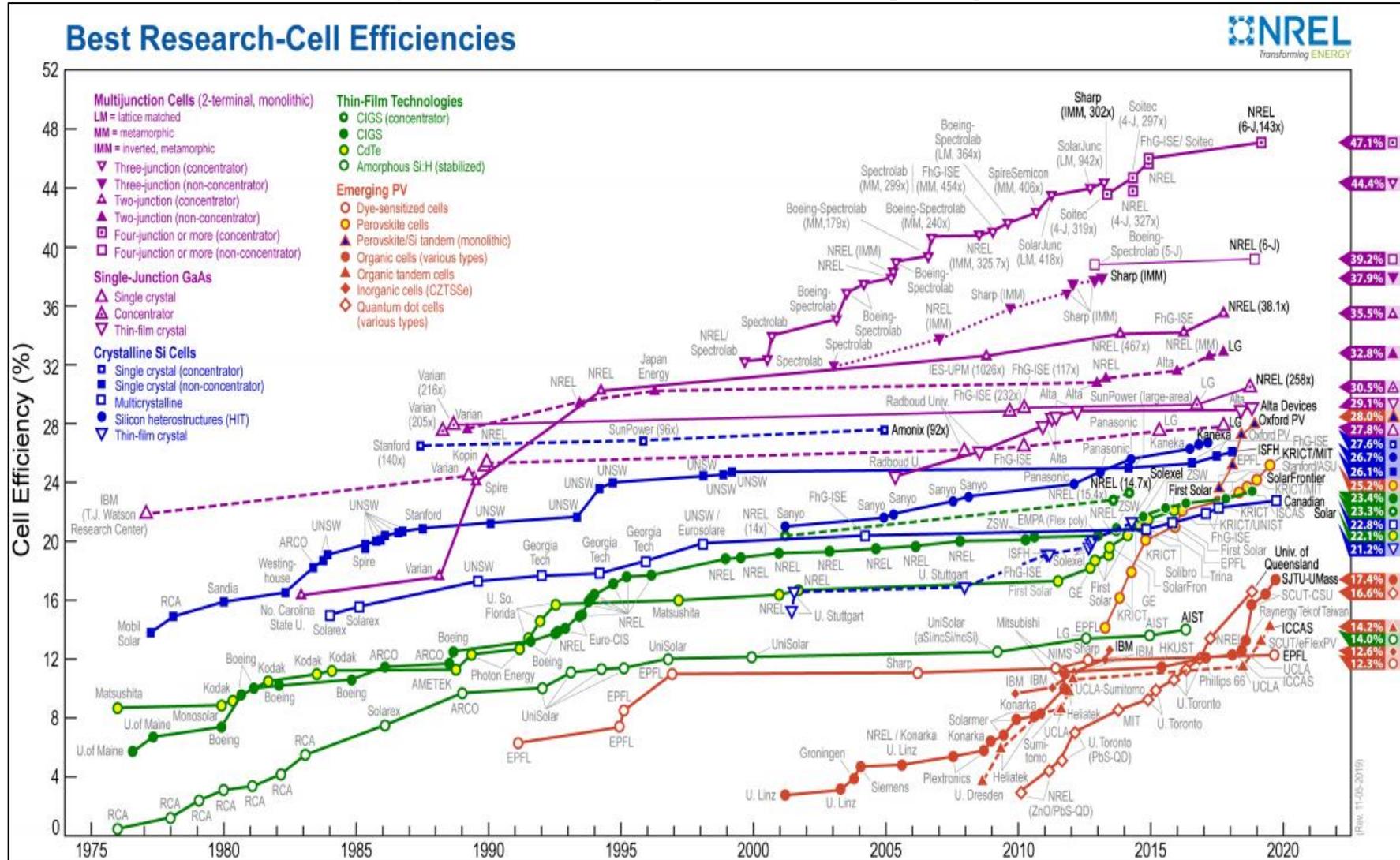
Figura 3.4 Estrutura cristalina da *perovskita*.



Fonte: Adaptado de Callister et al. (2014)

As células solares de *perovskita* alcançam uma eficiência energética análoga às células solares de silício em escala laboratorial. Segundo dados mostrados pela Figura 3.5, o gráfico das eficiências de conversão energética confirmadas para células solares fotovoltaicas de diversos materiais desde 1976, mostra que as células solares de *perovskita* tiveram a primeira certificação em 2012 atingindo a eficiência de 22,1% e atualmente atingem 25,2% de eficiência (NREL, 2019).

Figura 3.5 Eficiência de dispositivos fotovoltaicos por categorias.



Fonte: Adaptado de *The National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2019)*.

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

3.2.3 Mineração de Dados

O conhecimento técnico descrito nos pedidos de Patente publicados pode ser usado para melhorar a tecnologia descrita ou inspirar novas tecnologias. O avanço do conhecimento pode ser estabelecido com as informações contidas nas bases de dados, que armazenam as informações de pesquisadores e seus respectivos estudos. A utilização da prospecção tecnológica nesses estudos provê informações essenciais para o surgimento de novas tecnologias, afirmam Ferraz, Quoniam, Reymond e Maccari (2016).

Porém a prospecção tecnológica depende de uma quantidade enorme de informações de patentes existentes e da complexidade de arranjo desse material nessas bases de dados. É necessário o uso softwares para automatizar a consulta organizada, a recuperação e o tratamento das informações disponíveis de forma objetiva (Ferraz, 2016). Existem métodos e técnicas para a condução da prospecção tecnológica, a partir de informações obtidas de estudos patentários e também, por levantamentos bibliométricos (Amparo, Ribeiro, & Guarieiro, 2012).

A patente é um título de modelo de utilidade e de propriedade industrial, que é emitido para garantir a segurança do inventor para com sua invenção e para prováveis transações de compra da tecnologia (Amadei & Torkomian, 2009).

As patentes disponibilizam informações confiáveis e legais que podem ser aproveitadas como fonte de pesquisas de inovação, soluções de problemas, melhoria da qualidade de vida, ambientais e comerciais, para soluções de problemas e melhoria da competitividade de mercado (Quoniam, Kniess & Mazzieri, 2014). Neste ponto de vista, as patentes emergem como uma importante fonte de informação e conhecimento para a compreensão da situação tecnológica e estratégica de uma área (Santos, Kniess, Mazieri, & Quoniam, 2014).

A patente é formalizada, fazendo o seu registro, garantindo assim os direitos ao inventor, porém existe um intervalo de sigilo de 18 meses entre o depósito da patente e a sua liberação (Ferraz et al., 2016). Após esse período, a patente torna-se livre para ser utilizada em outros países nos quais não foram protegidas e a sua reprodução se torna possível por qualquer empresa ou pesquisador que queira aproveitar esse conhecimento (Amadei &

Torkomian, 2009). A patente é uma excelente fonte de conhecimento, que pode ser recuperada e estudada para trazer benefícios e desenvolvimento (Corrêa e Gomes, 2013).

A mineração de dados (do inglês, *Data mining*) é o processo de extração de informações em bancos de dados que auxilia na validação de um conhecimento (Laudon & Laudon, 2011). Um obstáculo, no entanto, ao acessar as informações de patentes pela *Internet* é que elas geralmente são guardadas na *Deep Web* (Ferraz, Quoniam, Raymond & Maccari, 2016).

A *Deep Web* é uma separação da *Internet* que não pode ser acessada por meio de uma simples busca no *Google*, mas ela contém documentos disponíveis aonde se podem acessá-los com um programa buscador comum e fazer consultas por meio de palavras-chave, extraindo o conhecimento (Franco & Magalhães, 2016).

Essas bases não referenciais, ou a *Deep Web* contém currículos de pesquisadores, informações de grupos de pesquisa e também os diretórios que armazenam as patentes etc. Podemos exemplificar a Plataforma Lattes, o Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e as diversas bases que armazenam documentos patentários (Franco & Magalhães, 2016).

Utilizar ferramentas que aproveitem o conhecimento e o uso de capacidades inovativas deve fazer parte das estratégias de desenvolvimento dos países para ultrapassar barreiras tecnológicas. Devem ser incorporados os sistemas baseados nas novas tecnologias e deve ser apoiado fortemente as mudanças nos processos produtivos possibilitados por estas novas tecnologias (Cassiolato & Lastres, 2005).

Buscar o conhecimento nas bases de dados é uma oportunidade de acessar enormes volumes de dados que ajudam os pesquisadores a obter novos caminhos para suas pesquisas (Galvão & Marin, 2005).

Para Caputo (2006), a leitura de uma grande quantidade de documentos gera muito trabalho, portanto, essa busca de informações pode ser realizada com ferramentas computacionais que realizam essa atividade, que podem identificar com mais precisão a tecnologia a ser aproveitada. A mineração de dados patentários depositados e disponíveis pode ser realizada em bases não referenciais, tais como o *PATENTSCOPE*

(<https://patentscope.wipo.int/search/pt/search.jsf>), *Google Patents* (<https://patents.google.com/advanced>) e *Espacenet* (<https://worldwide.espacenet.com/>).

Também podem ser acessadas por meio dos softwares gratuitos, tais como: *The Lens* (<https://www.lens.org/>) e *Patent2net* (<http://patent2netv2.vlab4u.info/>), que além de obterem as informações de patentes tem a capacidade de gerar gráficos e tabelas que possibilitam a análise das informações recuperadas (Caputo, 2006).

Outra base não referencial existente é o *World Intellectual Property Organization (WIPO)*, constituído em 1967 e faz parte das agências especializadas da Organização das Nações Unidas (ONU). Atualmente esta organização conta com 192 estados-membros, com a função de conduzir o desenvolvimento de um sistema internacional de propriedade intelectual, permitindo a inovação e a criatividade. A base de dados da *WIPO* disponibiliza mais de 77 milhões de documentos de patentes (ONU, 2019).

Para facilitar a utilização destas informações, a *WIPO* normatizou logicamente a base de dados, classificando o conteúdo em níveis hierárquicos, seções, classes, subclasses, grupos e subgrupos em ordem decrescente. O uso desta plataforma permite a identificação de rotas tecnológicas, que envolvem técnicas quantitativas e estatísticas de avaliação dos índices de produção do conhecimento científico (Araújo, 2007).

A partir da pesquisa cientométrica, é possível verificar a relação dos dados de patentes, que por meio da tecnometria, milhares de artigos científicos, patentes, notícias e outros documentos, podem ser analisados para se conhecer a procedência das informações de valor agregado, chamados indicadores, que não dizem respeito a um documento em particular, mas ao conjunto dos documentos analisados (Amaral, Possatti, Faria, Allipandrini, & Pereira, 2004).

Podem ser analisadas nas pesquisas dos documentos de patentes depositadas as informações por país de origem, país de depósito, instituição, inventor, país do inventor, classificação das classes *IPC (The International Patent Classification - IPC)*, caracterizando uma pesquisa de dados em bases secundárias (WIPO, 2019).

A Classificação Internacional de Patentes é mostrada na Tabela 3.2 englobando as seguintes seções e respectivas classes (Puhlmann et al., 2004).

Tabela 3.2 Classificação Internacional de Patentes (IPC).

Seções	Classes
A	Necessidades humanas: agricultura; produtos alimentícios; artigos para uso pessoal e doméstico; saúde e recreação.
B	Operações de processamento, transporte: separação e mistura; conformação; impressão; transporte.
C	Química e metalurgia: química; metalurgia.
D	Têxteis e papel: têxteis e materiais flexíveis.
E	Construções fixas: edificações; perfuração de solo; mineração.
F	Engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas, explosão: máquinas e bombas; engenharia em geral; iluminação e aquecimento; armas e explosão.
G	Física: instrumentos; nucleônica.
H	Eletricidade

Fonte: Adaptado de WIPO (2019).

3.3 Procedimentos metodológicos

Este estudo foi classificado quanto aos objetivos como sendo exploratório-descritivo. A pesquisa exploratória procura desenvolver, elucidar e transformar os conceitos e as ideias que concebidas com o objetivo de dar uma visão geral, aproximada de determinado fato. As pesquisas descritivas referem-se a estas particularidades de determinado fenômeno e estabelecem correlações entre as variáveis (Vergara, 2016).

A classificação desta pesquisa quanto à sua natureza foi definida como quantitativa, pois ajuda o pesquisador a enriquecer sua pesquisa fornecendo dados importantes para a conclusão dos trabalhos (Hair, Babin, Money, & Samouel, 2005).

Uma pesquisa dessa natureza emprega muitas fontes de dados com o intuito de saber “Como e Por quê?”, ou entender os diferentes significados, valendo-se de técnicas de pesquisas apropriadas para registrar as explicações e as motivações (Cooper, Schindler, & Pamela, 2011).

A metodologia utilizada foi a análise cientométrica feita a partir da definição de estratégias de busca com palavras-chave. A partir desta pesquisa, demonstrou-se quantas patentes se encontravam disponíveis, os países aonde estavam depositadas, a rede de autores e colaboradores, a evolução no tempo e se os descritivos se encontravam disponíveis via o

buscador *PATENTSCOPE* do portal *WIPO IP PORTAL*, cujo link de acesso ao *site* é <https://patentscope.wipo.int/search/pt/search.jsf>.

3.3.1 Procedimentos de coleta dos dados

A técnica de coleta de dados foi fundamentada na análise cientométrica de patentes, pois é importante quando o problema tem muitos dados que estão em bancos de dados e se quer analisá-los. É necessário ter atenção às fontes utilizadas, pois usar dados de fonte não confiáveis pode ampliar os erros (Santos, Kniess, Mazzieri, Quoniam, 2014).

O resultado da revisão sistemática da literatura realizada no Estudo 1 na base de dados *SCOPUS* embasou o levantamento patentário realizado no *site WIPO IP PORTAL* para verificar as patentes publicadas. A pesquisa no portal *WIPO IP PORTAL* utilizou o nome dos materiais mencionados para recuperar as patentes, esta pesquisa recuperou patentes para todos os materiais procurados.

Foi utilizada esta base de dados de patentes porque ela oferece os serviços livres e gratuitos utilizando para o auxílio na pesquisa a ferramenta *PATENTSCOPE* que é uma fonte internacional de pesquisa. A ferramenta *PATENTSCOPE* simplifica o processo de mineração de dados, pois trata um grande volume de informações diretamente com uma velocidade bastante rápida (Ferraz et al., 2016).

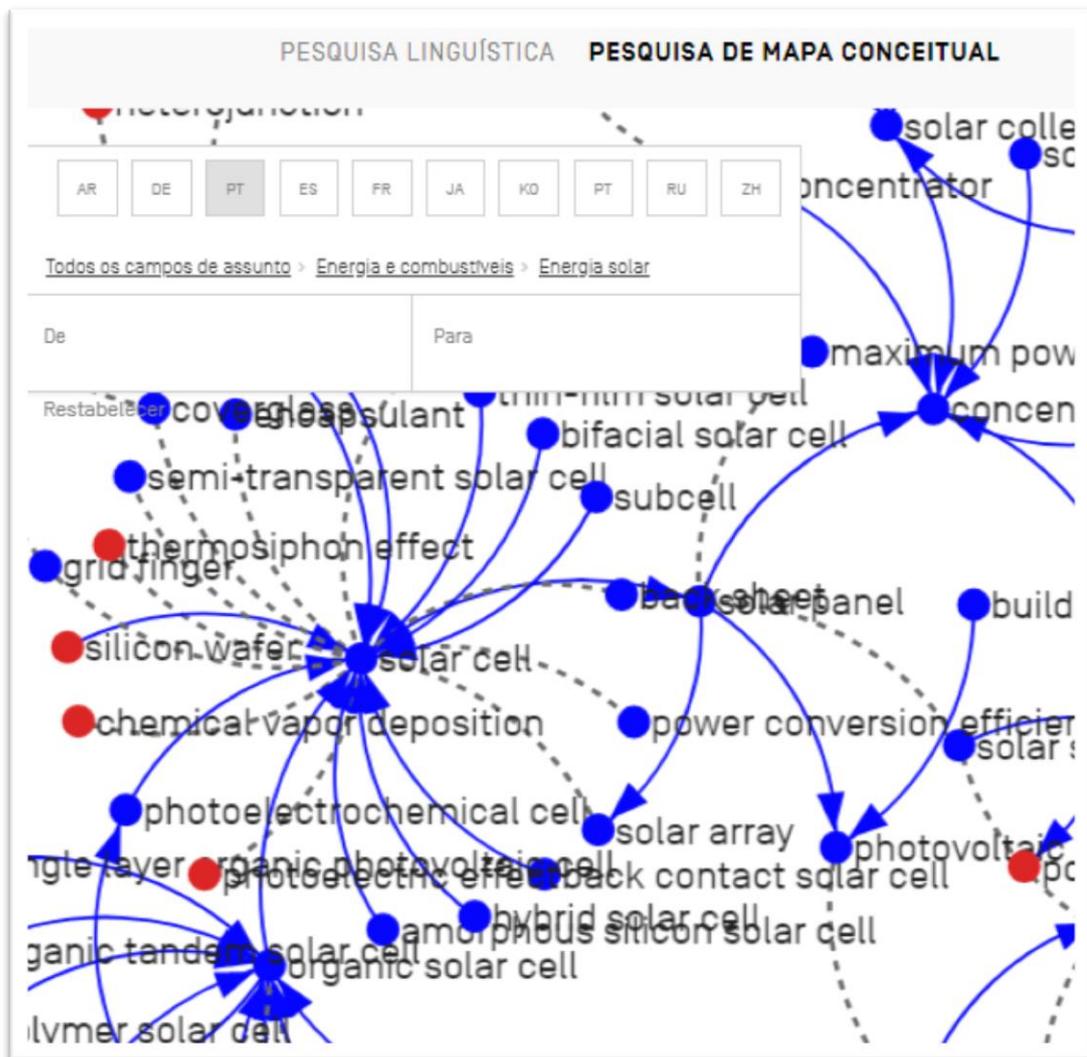
A escolha pela utilização do *PATENTSCOPE* ao invés de outras bases de dados para realização das extrações também provêm do fato de que ela permite o acesso gratuito a um conjunto de tabelas e gráficos que podem ser analisados e utilizados sem a necessidade de outros softwares complexos.

No *site PATENTSCOPE* existe uma ferramenta chamada de “pesquisa avançada” que é acessada por meio do link <https://patentscope.wipo.int/search/pt/search.jsf>. Por meio desta ferramenta foram verificados os depósitos de patentes relacionados aos materiais utilizados na construção de células solares fotovoltaicas e adicionalmente no *site* também foram gerados as tabelas e gráficos para análise dos resultados. Para a realização do levantamento patentário foi elaborada uma estratégia de busca, via a definição de palavras e/ou expressões.

A concatenação das palavras-chave resultou em termos, dos quais se escolheu alguns específicos. Para ajudar na elaboração das palavras-chave e também recuperar o maior número de patentes sobre o assunto desejado, no *site WIPO IP PORTAL* existe uma

ferramenta denominada “WIPO Pearl” que permite elaborar e melhorar o termo de busca por meio de mapas conceituais, obtendo a melhor expressão de busca. Um dos termos escolhidos foi “solar cell”, este termo foi concatenado com o nome do material conexo ao tema pesquisado. Este mapa é mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 Pesquisa por mapa conceitual das palavras-chave no WIPO Pearl.



Fonte: (WIPO IP Portal, 2019).

No estudo 1 foram obtidos onze diferentes categorias de material, a saber: *Perovskite solar cells*, *Dye-sensitized solar cells (DSSC)*, *Quantum dot sensitized solar cells (QDSSC)*, *Multijunction solar cells*, *Organic solar cell (OPV)*, *Hybridized solar cells*, *Heterojunction solar cells*, *Singlejunction solar cells*, *Polymer solar cells (PSC)*, *Homojunction solar cells* e *Graphene solar cells*. Estas categorias de materiais foram inseridas no banco de dados *PATENTSCOPE* para verificar a existência de patentes. Na Tabela 3.3, é mostrada a

quantidade de patentes recuperados na revisão bibliográfica no site *SCOPUS* em comparação com as patentes recuperadas na base de dados *PATENTSCOPE*.

Tabela 3.3 Comparativo de materiais e quantidade de patentes recuperadas.

Extração	Material	Eficiência média	Artigos recuperados SCOPUS	Patentes recuperadas PATENTSCOPE
Extração 01	Perovskite solar cell	13,96	31	1484
Extração 02	Multijunction solar cell	24,64	10	508
Extração 03	Homojunction solar cell	29,00	1	97
Extração 04	Single-junction solar cell	14,26	3	478
Extração 05	Dye-sensitized solar cell (DSSC)	6,50	23	5392
Extração 06	Quantum dot sensitized solar cell (QDSSC)	4,23	18	178
Extração 07	Organic solar cell (OPV)	4,18	9	6249
Extração 08	Hybridized solar cell	5,80	8	650
Extração 09	Heterojunction solar cell	6,22	6	1345
Extração 10	Polymer solar cell (PSC)	7,21	2	1123
Extração 11	Graphene solar cell	3,56	1	58

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Este estudo baseou-se nos artigos científicos recuperados no Estudo 1, os quais embasaram a procura de materiais específicos com patentes disponíveis no *site* da *World Intellectual Property Organization (WIPO)* (OMPI, do inglês Organização Mundial da Propriedade Intelectual) integrante da Organização das Nações Unidas (ONU) com sede 192 estados membros (WIPO, 2019).

Devido ao enorme volume de dados de informações contidas nas patentes, decidiu-se por limitar a pesquisa às categorias de material com maior quantidade de patentes recuperadas no banco de dados *PATENTSCOPE* com os materiais que apresentaram os melhores índices de eficiência de conversão de energia nas pesquisas obtidas no banco de dados *SCOPUS*. A máxima eficiência de conversão energética é cerca 25% obtidos para células solares de silício. Além disso, a pesquisa limitou-se ao período de busca nos anos 2013 a 2018. Foi feita a pesquisa com esses filtros e as categorias de materiais analisados foram: *Perovskite solar cell* e *Multijunction solar cell* mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Materiais selecionados para a pesquisa.

Estração	Material	Eficiência média	Artigos recuperados SCOPUS	Patentes recuperadas PATENTSCOPE
Extração 01	Perovskite solar cell	13,96	31	1484
Extração 02	Multijunction solar cell	24,64	10	508

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Após a digitação das palavras-chave e da extração das informações, adicionalmente o banco de patentes *PATENTSCOPE* gerou no site tabelas e gráficos que permitiram serem analisados. O *PATENTSCOPE* forneceu dados no formato de gráficos estáticos e tabelas, tendo como referência as informações presentes nos documentos de patentes. Com estas informações foi possível realizar as análises observando o seu conteúdo. Foi possível avaliar e conhecer as pesquisas e inovações relacionadas a novos materiais relacionados à energia solar fotovoltaica em diversos países.

Devido ao silício monocristalino (m-Si) impactar com muitos materiais tóxicos a saúde humana e o meio ambiente durante sua produção, este não foi escolhido nesta pesquisa por ser largamente utilizado na produção de células solares fotovoltaicas e amplamente estudado. Alguns dos demais materiais foram escolhidos por serem estudados com possibilidade de terem bastantes aplicações, porque existe a expectativa de terem baixo custo de produção e também terem processos produtivos mais simples, em vista disso tem um potencial de escalabilidade e aplicabilidade maior.

3.3.2 Procedimentos de análise de dados

Quanto à análise do conteúdo tecnométrico das patentes, esta se revela uma importante fonte de informação, pois se fundamenta em artigos científicos, relatórios, diplomas legais e documentos governamentais, sites especializados da internet e em banco de dados de patentes (dos Santos et al., 2014).

Para iniciar a procura das patentes que se quer recuperar, é necessário digitar uma palavra chave na base de dados *PATENTSCOPE*. A palavra-chave escolhida extrai dessa base os textos completos das patentes sobre o assunto de interesse e apresenta um resumo destes documentos para que possam ser lidos e analisados. Junto com as patentes, são disponibilizados no site diversos gráficos, por exemplo, para o material *Perovskite solar cell* na extração 01 foram disponibilizados os seguintes gráficos e tabelas: a evolução das publicações, a localização dos países, a localização dos inventores, a localização das empresas

e as principais tecnologias. Também para o material *Multijunction solar cell* na extração 02 foram gerados os seguintes gráficos e tabelas: a evolução das publicações, a localização dos países, a localização dos inventores, a localização das empresas e as principais tecnologias.

3.4 Resultados

Na Tabela 3.5 são mostradas as estratégias de pesquisa EN_ALLTXT:("Perovskite solar cell"~1) AND DP:[01.01.2013 TO 31.12.2018] e EN_ALLTXT:("Multijunction solar cell"~1) AND DP:[01.01.2013 TO 31.12.2018] que foram utilizadas para início das buscas mapeando-se 1484 e 508 patentes respectivamente, com a análise se concentrando no período de 2013 até 2018.

Tabela 3.5 Palavras-chave inseridas no *PATENTSCOPE*.

WIPO IP PORTAL			
Palavras-chave Seleccionadas	Selected Keywords	Expressão PATENTSCOPE	Qdade
Células solares Perovskita	<i>Perovskite solar cell</i>	EN_ALLTXT:("Perovskite solar cell"~1) AND DP:[01.01.2013 TO 31.12.2018]	1484
Célula solar multijunção	<i>Multijunction solar cell</i>	EN_ALLTXT:("Multijunction solar cell"~1) AND DP:[01.01.2013 TO 31.12.2018]	508

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

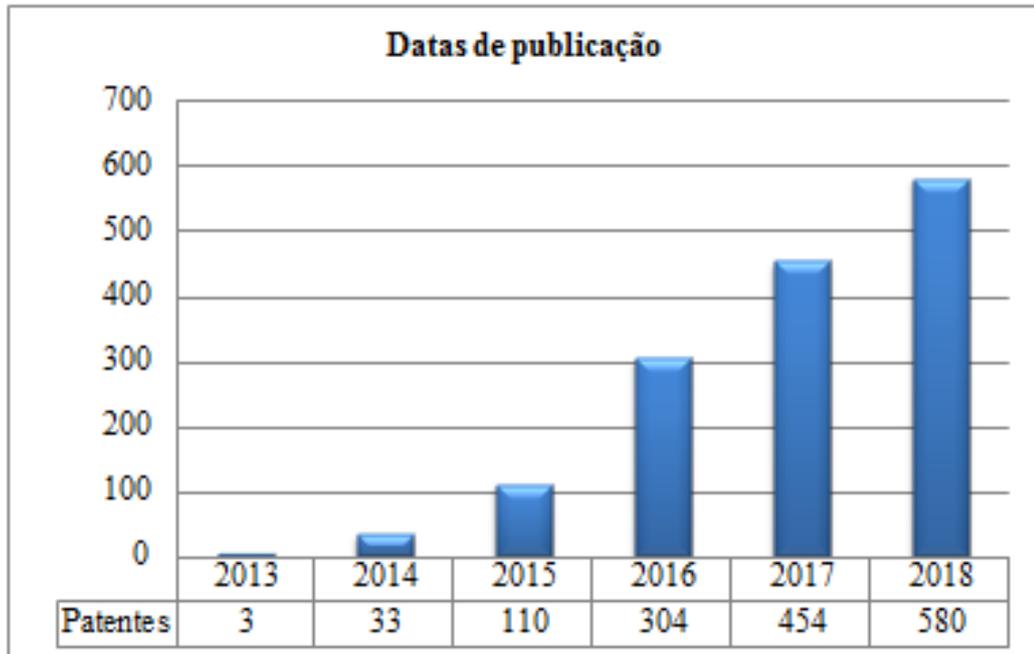
Foram mapeadas 1992 patentes relacionadas materiais alternativos à produção de células solares fotovoltaicas, onde 1484 patentes são relativas ao material *Perovskite solar cell*, e 508 sobre *Multijunction solar cell*. Foi utilizado o método tecnométrico para coleta dos dados, que significa a pesquisa de informações em um banco de dados.

3.4.1 Extração 01 - Palavra-chave para o material *Perovskite solar cell*

A) *Evolução das publicações de patentes da extração 01*

A figura 3.8 mostra quando as patentes foram publicadas e a quantidade por ano. No ano de 2013 foram publicadas três patentes com uma evolução significativa de publicações até o ano de 2018, atingindo 580 publicações.

Figura 3.8 Evolução das publicações de patentes para o material *Perovskite solar cell*.

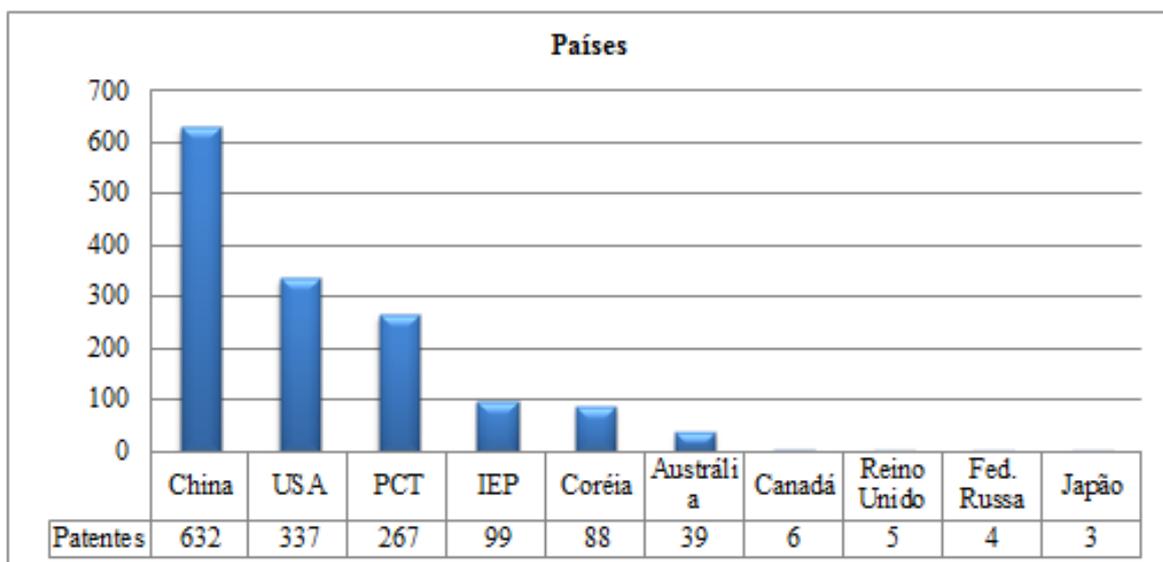


Fonte: Adaptado de WIPO (2019)

B) Localização dos países das publicações de patentes da extração 01

A Figura 3.9, permite visualizar os países aonde foram depositados os registros e as proteções patentárias para a extração 01 *Perovskite solar cell*, nesta recuperação é possível visualizar a quantidade de patentes nos países e também as que constam como protegidas mundialmente (PCT).

Figura 3.9 Países com publicações de patentes para o material *Perovskite solar cell*.



Fonte: Adaptado de WIPO (2019)

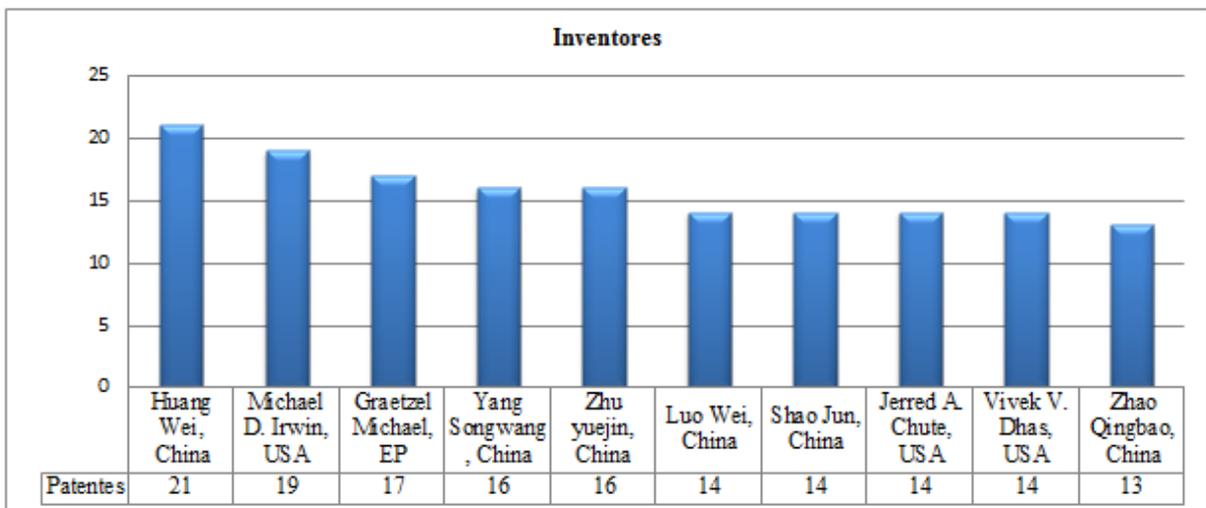
Os países com mais publicações de patentes para o material Perovskite solar cell são a China com 42,6% das publicações, seguido pelos Estados Unidos com 22,7% do total analisado. As publicações de patentes com proteção mundial (PCT) totalizam 18% das publicações.

Deve-se salientar a existência de 48 inventores sem identificação (3% do total), pois estas patentes estão mapeadas no extrato A (publicadas), sendo a Austrália o país de origem destes inventores não identificados.

C) Localização dos inventores com depósito de patentes da extração 01

A Figura 3.10, permite visualizar os inventores depositantes de pedidos de patentes para o material *perovskita* solar cell.

Figura 3.10 Países dos inventores depositantes de patentes para o material *Perovskite solar cell*.



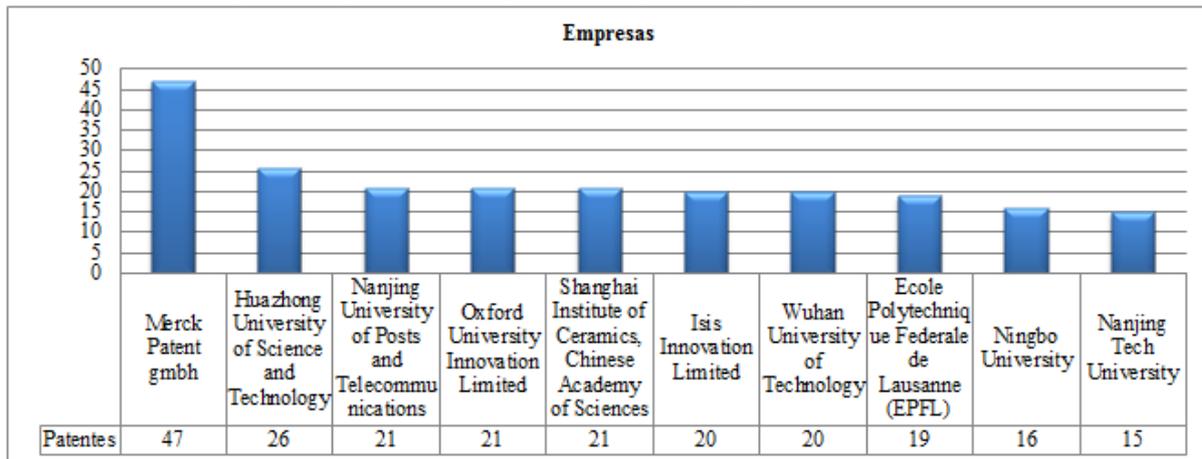
Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

Consegue-se identificar, que dos dez inventores com mais patentes publicadas a China têm seis inventores com 94 publicações, os Estados Unidos tem três inventores com 47 publicações e há um inventor Europeu com 17 publicações. Portanto, a maior parte dos inventores depositantes de pedidos de patentes são Chineses e Americanos.

D) Localização das empresas que solicitaram depósito das patentes da extração 01

Na Figura 3.11, são apresentadas as empresas que investiram em Pesquisa & Desenvolvimento e que solicitaram a proteção patentária para o material *perovskita solar cell*.

Figura 3.11 Empresas depositantes de pedidos de patentes para o material *Perovskite solar cell*.



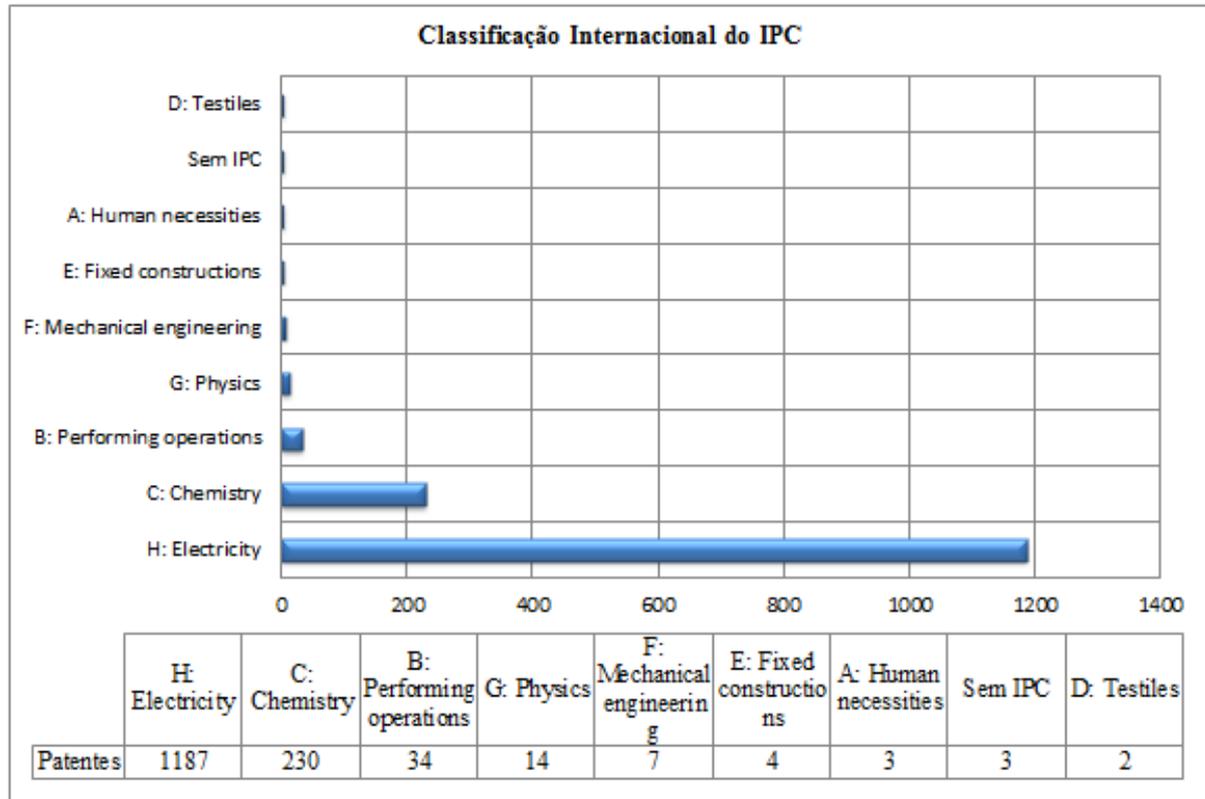
Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

Observar-se que a empresa Merck Patent GMBH depositou 47 patentes sobre o material Perovskite solar cell sendo os países de origem dos documentos os Estados Unidos da América (14 patentes), Europa (7 patentes), China (3 patentes), Austrália (1 patente), além de proteger mundialmente 28 patentes. Merece destacar que das dez empresas com mais solicitações de pedidos de patentes a maioria das empresas são Chinesas com 119 solicitações de proteção patentária.

E) Principais tecnologias das patentes publicadas na extração 01

As principais temáticas que englobam os assuntos discutidos nas patentes da extração 01 para o material *Perovskite solar cell*, estão distribuídas da seguinte maneira e podem ser vistas na Figura 3.12. Para acessar a classificação basta acessar o link <https://www.wipo.int/classifications/ipc/en/> e são as seguintes: A: *Human necessities* (3 patentes); B: *Performing operations/Transporting* (34 patentes); C: *Chemistry/Metallurgy* (230 patentes); D: *Textiles/Paper* (2 patentes); E: *Fixed constructions* (4 patentes); F: *Mechanical engineering/Lighting/Heating/Weapons/Blasting* (7 patentes); G: *Physics* (14 patentes); H: *Electricity* (1187 patentes) e 3 patentes sem indicação de temática.

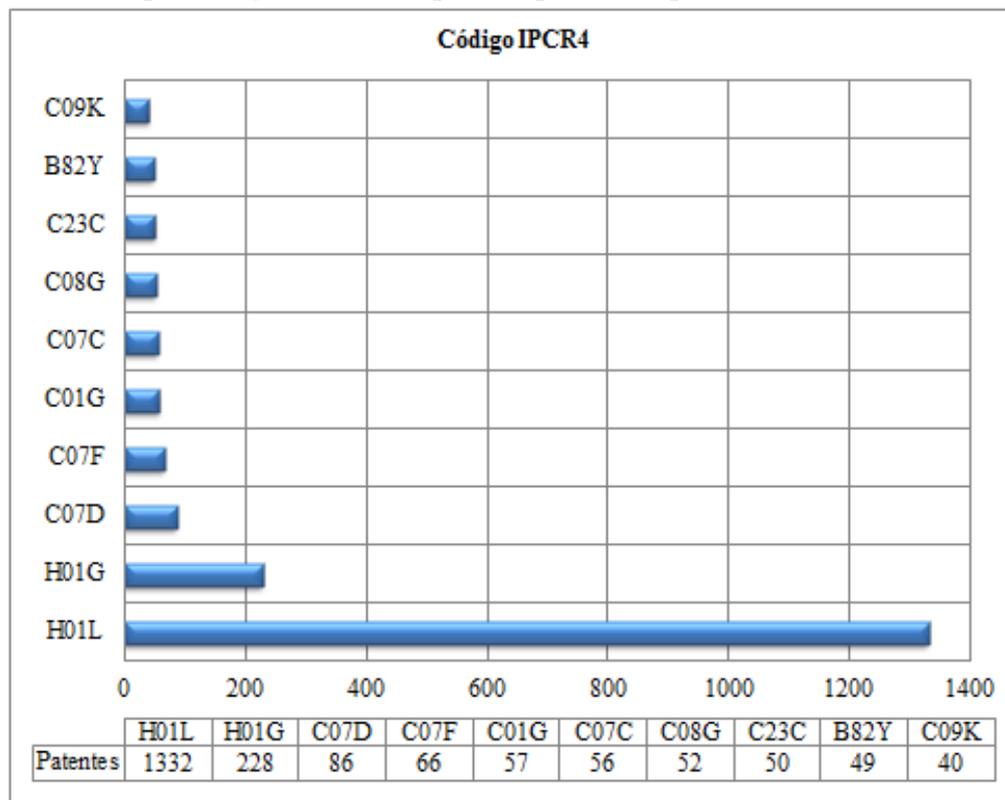
Figura 3.12 Principais assuntos das patentes publicadas para o material *Perovskite solar cell*.



Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

As patentes mapeadas na Figura 3.13, estão codificadas com base no *International Patent Code R4 (IPCR4)*, o código de classificação internacional de patentes. Na extração 01 das patentes aparecem as classes “H01L” e “H01G”, que representa as patentes relacionadas à “Energia Solar e Células Fotovoltaicas”. Quanto às patentes mapeadas, verifica-se que a classe “H01L” contém 1332 patentes relacionadas a pelo menos 30 tecnologias e a tecnologia classe “H01G” contém 228 patentes relacionadas a pelo menos 12 tecnologias relativas a Células Fotovoltaicas (*Photovoltaic Cells*).

Figura 3.13 Principais códigos IPCR4 das patentes publicadas para o material *Perovskite solar cell*.



Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

Estas tecnologias citadas referem-se a inúmeros inventores que têm se dedicado ao desenvolvimento de patentes e que estão protegidas nos Estados Unidos da América, China, Europa, Austrália, em 5 outros países, além de proteção mundial.

F) Análise das patentes não protegidas no Brasil da extração 01

Com relação à análise das patentes não protegidas no Brasil, podem-se buscar documentos que completem um “vazio tecnológico” específico, trazendo informações para solucionar problemas ou tendências tecnológicas.

No processo de busca de patentes que possuam informações que possam ser utilizadas no Brasil, a procura delas pode ser feita no site *PATENTSCOPE*, inserindo um código específico no campo *IPCR7* ou *IPCR11* ou uma palavra-chave específica no campo *Title*, essas informações podem ser usadas no processo de inovação, possibilitando a inovação.

Devido a grande quantidade de patentes da extração 01 para apresentação e análise, escolheu-se uma patente como exemplo cujos documentos foram analisados.

G) Análise de uma patente do material perovskita solar cell - CN107146847

Inicialmente, é apresentada uma patente da extração 01 sobre o material *perovskita solar cell*, esta patente foi protegida apenas na China. Ela foi depositada pelos inventores chineses Han Hongwe, Li Daiyu, Jiang Pei, Hu Yue, Rong Yaoguang, que obtiveram apoio financeiro para a pesquisa da Huazhong University of Science and Technology.

Na descrição do documento desta patente, estão envolvidas as tecnologias com a classificação IPCR11 de H01L 51/42, H01L 51/44, H01L 51/48, com o título de “*Novel all-solid-state printable perovskite solar cell based on carbon electrode*”, com *Application date* em 16/05/2017, *Publication date* em 08/09/2017 e *Grant date* em 21/05/2019. Essa tecnologia possui proteção no *Office* da China, estando livre para replicação no Brasil e está classificada como uma patente com *Publication Kind B* e com o *label CN107146847*, um código único para cada patente, que pode ser utilizado para localizá-la rapidamente. A Figura 3.14 mostra a descrição das tecnologias envolvidas na construção da patente recuperada no site *PATENTSCOPE*.

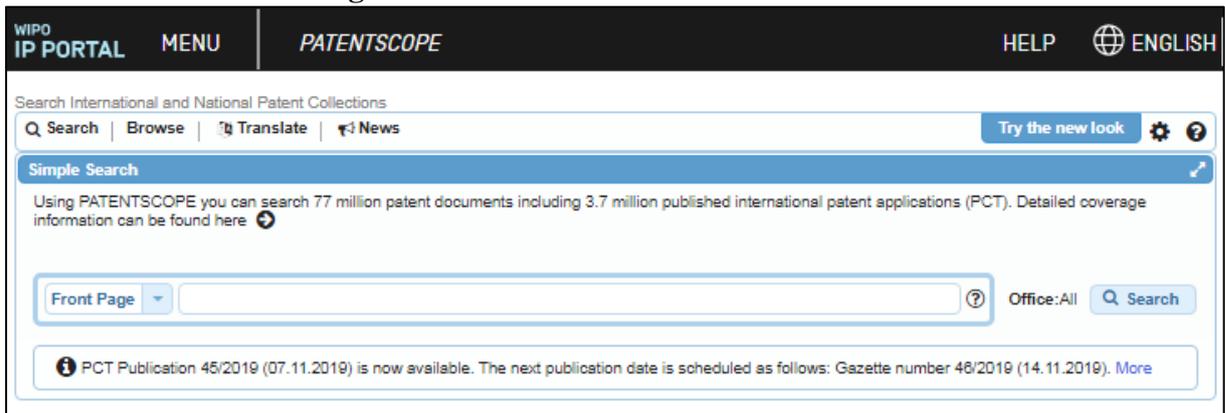
Figura 3.14 Tela inicial da *PATENTSCOPE*.

H	ELECTRICITY
01	BASIC ELECTRIC ELEMENTS
L	SEMICONDUCTOR DEVICES; ELECTRIC SOLID STATE DEVICES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
51	Solid state devices using organic materials as the active part, or using a combination of organic materials with other materials as the active part; Processes or apparatus specially adapted for the manufacture or treatment of such devices, or of parts thereof
42	specially adapted for sensing infra-red radiation, light, electromagnetic radiation of shorter wavelength, or corpuscular radiation; specially adapted either for the conversion of the energy of such radiation into electrical energy or for the control of electrical energy by such radiation
H	ELECTRICITY
01	BASIC ELECTRIC ELEMENTS
L	SEMICONDUCTOR DEVICES; ELECTRIC SOLID STATE DEVICES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
51	Solid state devices using organic materials as the active part, or using a combination of organic materials with other materials as the active part; Processes or apparatus specially adapted for the manufacture or treatment of such devices, or of parts thereof
42	specially adapted for sensing infra-red radiation, light, electromagnetic radiation of shorter wavelength, or corpuscular radiation; specially adapted either for the conversion of the energy of such radiation into electrical energy or for the control of electrical energy by such radiation
44	Details of devices
H	ELECTRICITY
01	BASIC ELECTRIC ELEMENTS
L	SEMICONDUCTOR DEVICES; ELECTRIC SOLID STATE DEVICES NOT OTHERWISE PROVIDED FOR
51	Solid state devices using organic materials as the active part, or using a combination of organic materials with other materials as the active part; Processes or apparatus specially adapted for the manufacture or treatment of such devices, or of parts thereof
42	specially adapted for sensing infra-red radiation, light, electromagnetic radiation of shorter wavelength, or corpuscular radiation; specially adapted either for the conversion of the energy of such radiation into electrical energy or for the control of electrical energy by such radiation
48	Processes or apparatus specially adapted for the manufacture or treatment of such devices or of parts thereof

Fonte: *WIPO (2019)*

A Figura 3.15 mostra a tela inicial da base de dados *PATENTSCOPE*, o site onde se pode recuperar a patente descrita anteriormente.

Figura 3.15 Tela inicial da *PATENTSCOPE*.

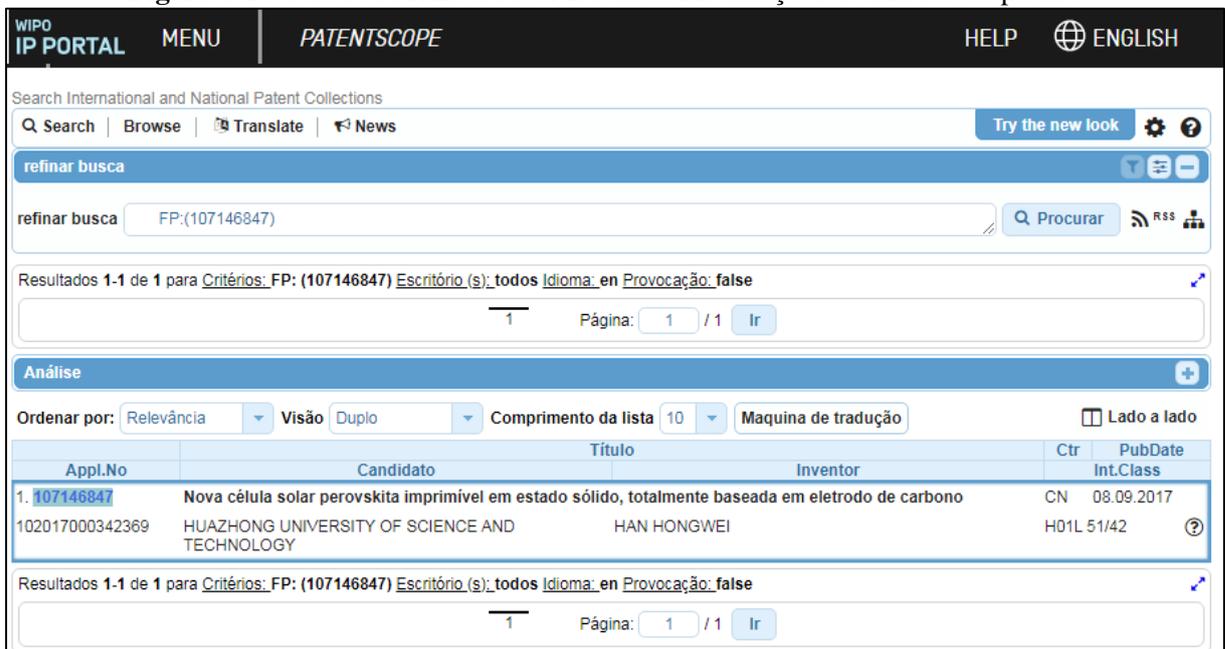


Fonte: WIPO (2019)

Nesta página inicial do *PATENTSCOPE*, cujo link de acesso é <https://patentscope.wipo.int/search/pt/search.jsf> é possível realizar a pesquisa do documento patentário desejado com a inserção dos códigos específicos.

Após a inserção do label *CN107146847* e seleção do botão de busca “pesquisa simples” na página inicial do *PATENTSCOPE*, a patente procurada é recuperada. A Figura 3.16 mostra a página com a descrição da patente recuperada.

Figura 3.16 Tela do *PATENTSCOPE* com as informações detalhadas da patente.



Fonte: WIPO (2019)

em nosso país.

Descritivo de uma patente do material *Perovskite solar cell* - CN107146847

A seguir é mostrado o descritivo da patente selecionada em extração 01 – *CN107146847* com a transcrição do texto da patente traduzida do inglês para o português:

A invenção descreve uma nova célula solar de perovskita imprimível em estado sólido com base em um eletrodo de carbono e um método de preparação da célula solar de perovskita. Um eletrodo de trabalho de TiO₂, uma camada de isolamento, um eletrodo contador de carbono poroso e um eletrodo contador de baixa temperatura são impressos empregando uma tecnologia de serigrafia, em que o contra-eletrodo poroso de carbono é uma camada de carbono porosa sinterizada a 400 °C, e o contra-eletrodo de carbono de baixa temperatura é uma camada de carbono compacta sinterizada a 150 °C ou menos. A estrutura é simples no processo de produção e tem baixo custo de material, a resistência em série de um dispositivo de célula solar é ainda mais reduzida pela redução da resistência quadrada do contra-eletrodo de carbono e, além disso, a quantidade de enchimento de uma solução de perovskita pode ser bastante reduzida. (China Patent N° CN107146847, 2019)

Campo Técnico de uma patente do material *perovskita solar cell* -

CN103746078

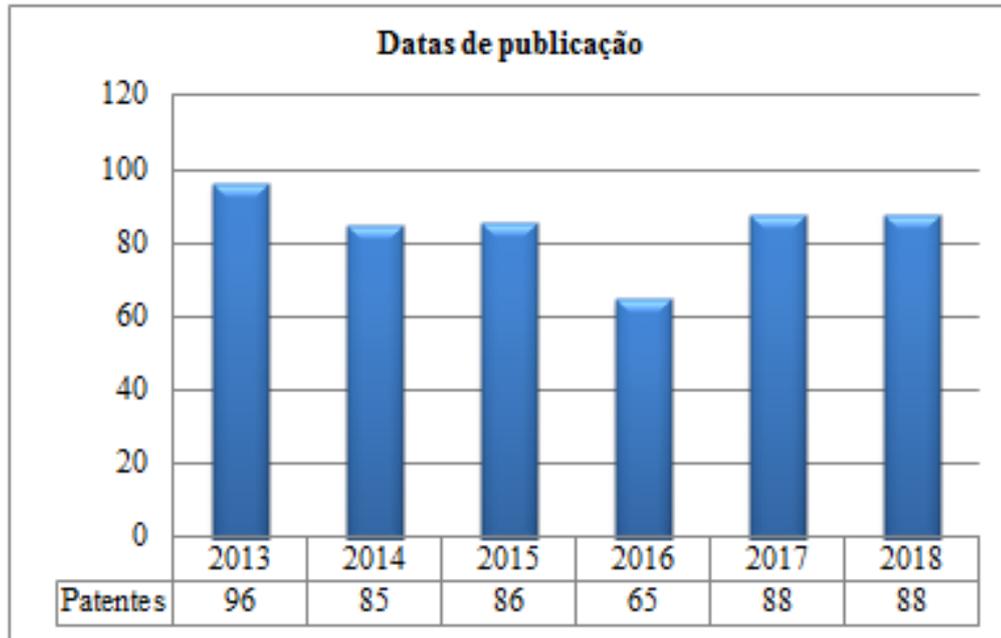
A invenção pertence ao campo das células solares de *perovskita* e, mais particularmente, a um novo eletrodo de carbono, a todas as células solares de *perovskita* imprimíveis em estado sólido e a um método de preparação das mesmas. A invenção fornece uma célula solar de perovskita de contraeletrodo de estrutura de camada de carbono composta e um método de preparação da mesma, cujo objetivo é combinar uma camada de carbono porosa e uma camada dupla de carbono com baixa camada de carbono. A fina camada de carbono poroso garante o enchimento uniforme da solução de *perovskita* e, após a impressão da solução, uma camada de carbono com temperatura relativamente baixa é impressa na camada de carbono porosa. A resistência da chapa de todo o contraeletrodo de carbono é reduzida para atender aos requisitos de transmissão lateral do furo, de modo que a quantidade de enchimento de *perovskita* que é potencialmente ameaçadora ao meio ambiente possa ser bastante reduzida com base na garantia de desempenho do eletrodo, resolvendo assim a técnica anterior. A contradição entre a espessura da camada de carbono e a resistência da chapa do eletrodo de carbono da célula solar de *perovskita* obtém melhor desempenho do eletrodo e resolve o problema técnico de poluição ambiental séria causada pelo enchimento de uma grande quantidade de líquido precursor de *perovskita*.

3.4.2 Extração 02 - Palavra-chave para o material: *Multijunction solar cell*

A) Evolução das publicações de patentes da extração 02

A figura 3.18 mostra quando as patentes foram publicadas e a quantidade de publicações por ano. No ano de 2013 foram publicadas 96 patentes, manteve-se uma constância de publicações até o ano de 2018 com 88 publicações.

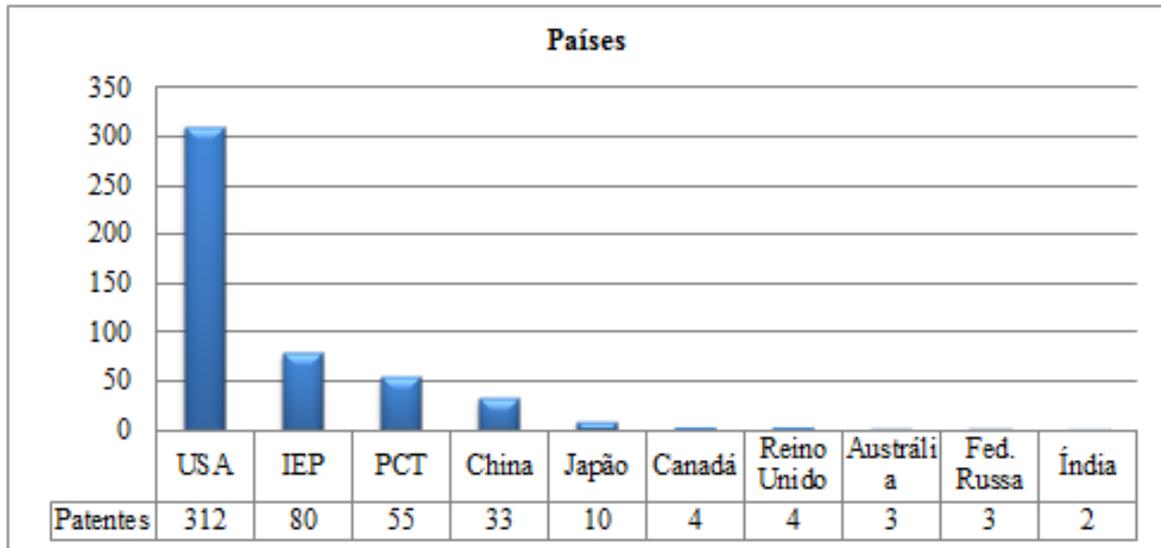
Figura 3.18 Evolução das publicações de patentes para o material *Multijunction solar cell*.



Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

B) Localização dos países das publicações de patentes da extração 02

A Figura 3.19, permite visualizar os países aonde foram depositados os registros e as proteções patentárias para a extração 02 *Multijunction solar cell*, nesta recuperação é possível visualizar a quantidade de patentes nos países e também as que constam como protegidas mundialmente (PCT).

Figura 3.19 Países com publicações de patentes para o material *Multijunction solar cell*.

Fonte: Adaptado de WIPO (2019)

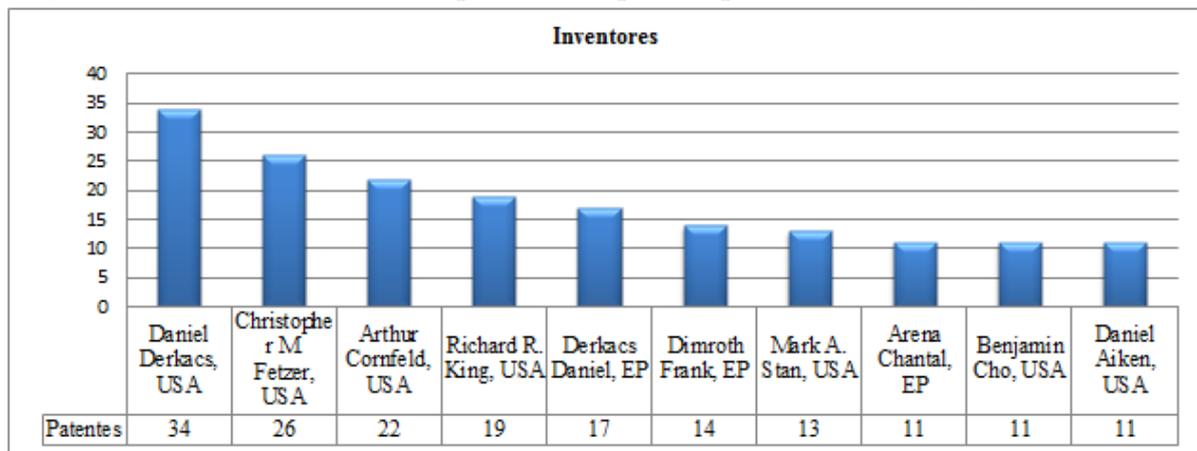
Os países que mais se destacaram com as publicações de patentes para o material *Multijunction solar cell* são os Estados Unidos da América com 61,7% das publicações, seguido pelo Instituto Europeu de Patentes (IEP) com 15,8% do total. As publicações de patentes com proteção mundial (PCT) totalizam 10,9% das publicações.

Deve-se salientar a existência de 14 inventores sem identificação (3% do total), pois estas patentes estão mapeadas no extrato A (publicadas), sendo o Canadá e os Estados Unidos da América os países de origem destes inventores não identificados.

C) Localização dos inventores com depósito de patentes da extração 02

A Figura 3.20, permite visualizar os inventores depositantes de pedidos de patentes para o material *Multijunction solar cell*.

Figura 3.20 Países dos inventores depositantes de patentes para o material *Multijunction solar cell*.



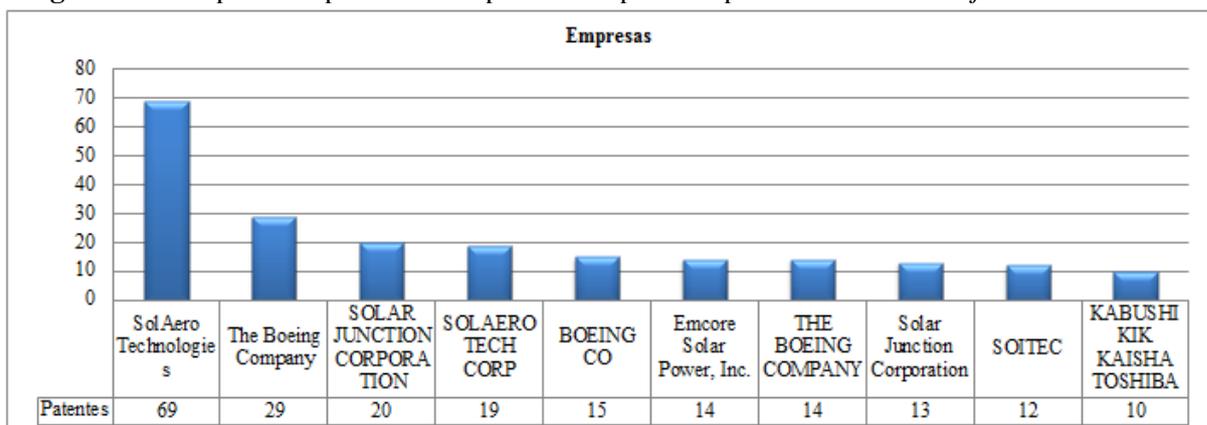
Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

Consegue-se identificar, que dos dez inventores com mais patentes publicadas, os Estados Unidos da América apresentam sete inventores com 136 publicações e os Europeus contam com três inventores e 42 publicações. Assim, a maioria dos inventores depositantes de pedidos de patentes são americanos e europeus.

D) Localização das empresas que solicitaram depósito das patentes da extração 02

Na Figura 3.21, são apresentadas as empresas que investiram em Pesquisa & Desenvolvimento e que solicitaram a proteção patentária para o material *Multijunction solar cell*.

Figura 3.21 Empresas depositantes de pedidos de patentes para o material *Multijunction solar cell*.



Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

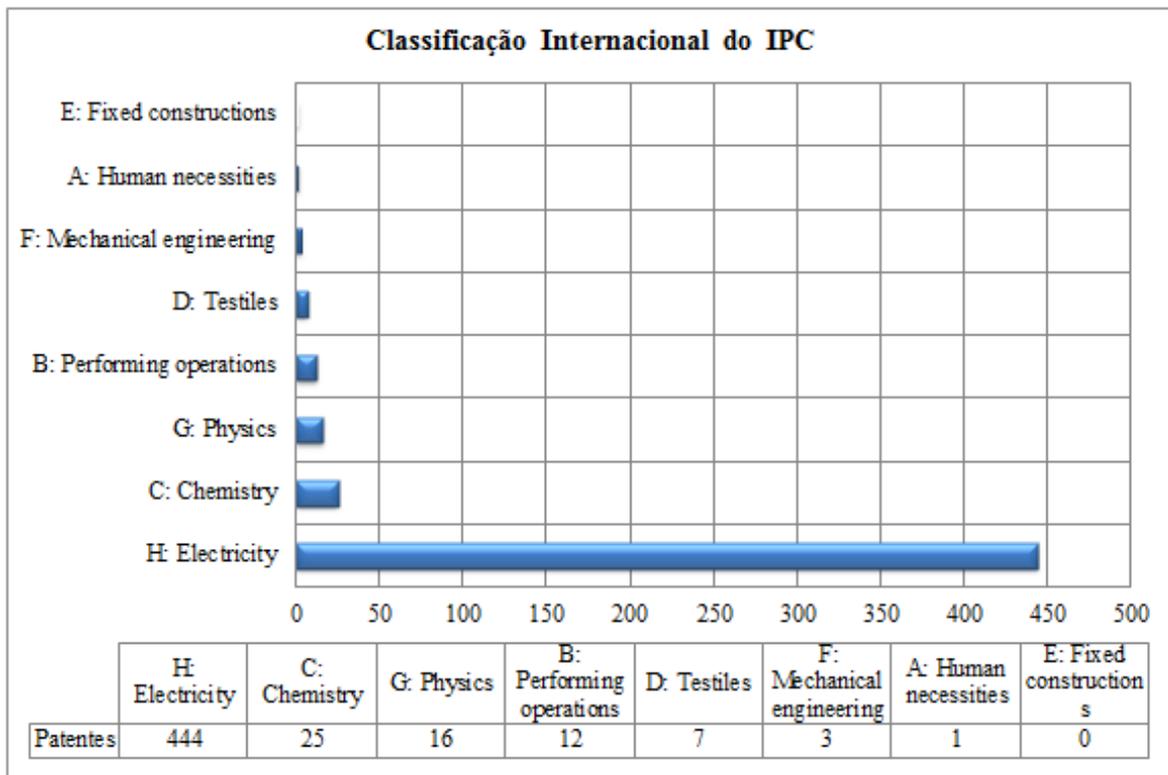
Observar-se que a empresa Merck Patent GMBH depositou 69 patentes sobre o material *Multijunction solar cell* sendo os países de depósito dos documentos os Estados Unidos da América (69 patentes) e Europa (2 patentes) e não há proteção mundial para estas patentes.

Merece destacar que das dez empresas com mais solicitações de pedidos de proteção patentária nove empresas são Americanas e uma empresa Europeia.

E) Principais tecnologias das patentes publicadas na extração 02

As principais temáticas que englobam os assuntos discutidos nas patentes da extração 02 para o material Multijunction solar cell, estão distribuídas da seguinte maneira e podem ser vistas na Figura 3.22. Para acessar a classificação basta acessar o link <https://www.wipo.int/classifications/ipc/en/> e são as seguintes: A: Human necessities (1 patente); B: Performing operations/Transporting (12 patentes); C: Chemistry/Metallurgy (25 patentes); D: Textiles/Paper (7 patentes); E: Fixed constructions (0); F: Mechanical engineering/Lighting/Heating/Weapons/Blasting (3 patentes); G: Physics (16 patentes); H: Electricity (444 patentes).

Figura 3.22 Principais assuntos das patentes publicadas para o material *Multijunction solar cell*.

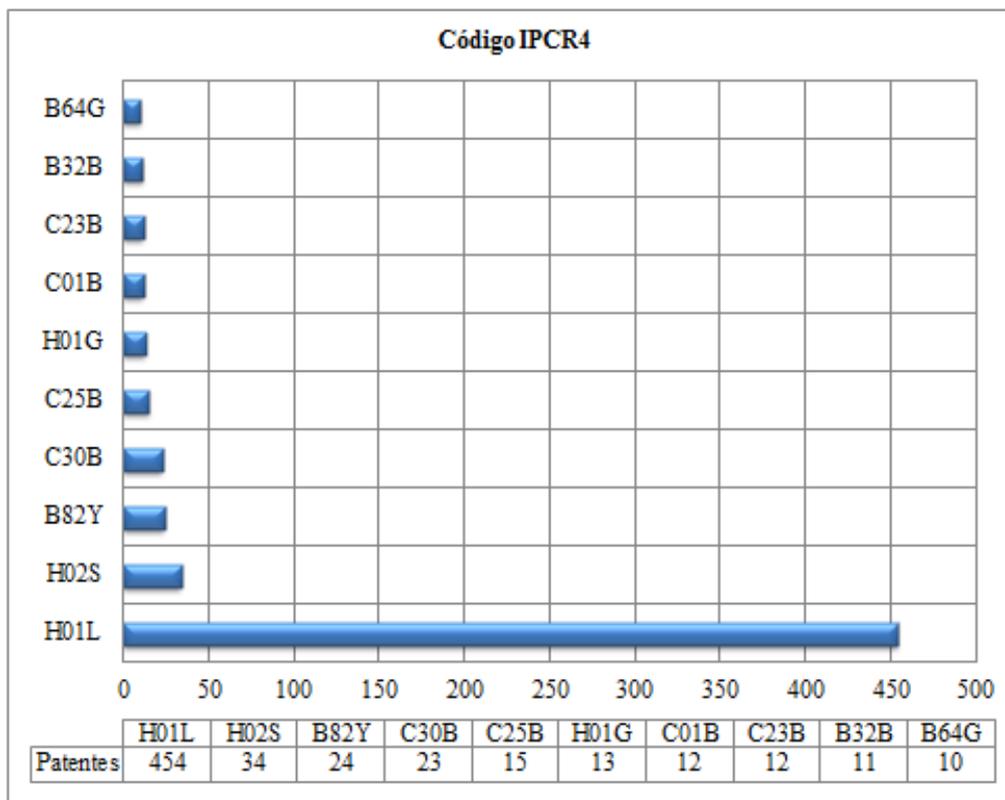


Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

As patentes mapeadas na Figura 3.23, estão codificadas com base no *International Patent Code R4 (IPCR4)*, o código de classificação internacional de patentes. Na extração 02 das patentes aparecem as classes “H01L” e “H02S”, que representa as patentes relacionadas à “Energia Solar e Células Fotovoltaicas”. Quanto às patentes mapeadas, verifica-se que a

classe “H01L” contém 454 patentes relacionadas a pelo menos 25 tecnologias e a tecnologia classe “H02S” contém 34 patentes relacionadas a pelo menos 4 tecnologias relativas a Células Fotovoltaicas (*Photovoltaic Cells*).

Figura 3.23 Principais códigos IPCR4 das patentes publicadas para o material *Multijunction solar cell*.



Fonte: Adaptado de *WIPO (2019)*

Estas tecnologias referem-se a inúmeros inventores que têm se dedicado ao desenvolvimento de patentes e estão protegidas nos Estados Unidos da América, Europa, China, Japão, e em 7 outros países, além de proteção mundial.

F) Análise das patentes não protegidas no Brasil da extração 02

Devido a grande quantidade de patentes da extração 02 para apresentação e análise, escolheu-se uma patente desta extração e este documento foi analisado.

G) Análise de uma patente do material Multijunction solar cell - US20150090321

É mostrada uma patente da extração 02 sobre o material *Multijunction solar cell*, esta patente foi protegida apenas nos Estados Unidos da América. Ela foi depositada pelos inventores americanos Benjamin Cho, Yong Lin, Pravin Patel, Mark A. Stan, Arthur Cornfeld, Daniel McGlynn e Fred Newman, que obtiveram apoio financeiro para a pesquisa da SolAero Technologies Corporation.

Na descrição do documento desta patente, estão envolvidas as tecnologias com a classificação IPCR11 de H01L 21/00, H01L 31/0687, H01L 31/18, H01L 31/078, com o título de “*Inverted metamorphic multijunction solar cells with doped alpha layer*”, com *Application date* em 02/10/2013, *Publication date* em 02/04/2015 e *Grant date* em 27/06/2017. Essa tecnologia possui proteção no *Office dos Estados Unidos da América*, estando livre para replicação no Brasil e está classificada como uma patente com *Publication Kind B2* e com o *label US20150090321*, um código único para cada patente, que pode ser utilizado para localizá-la rapidamente. A Figura 3.24 mostra a descrição das tecnologias envolvidas na construção da patente recuperada no site *PATENTSCOPE*.

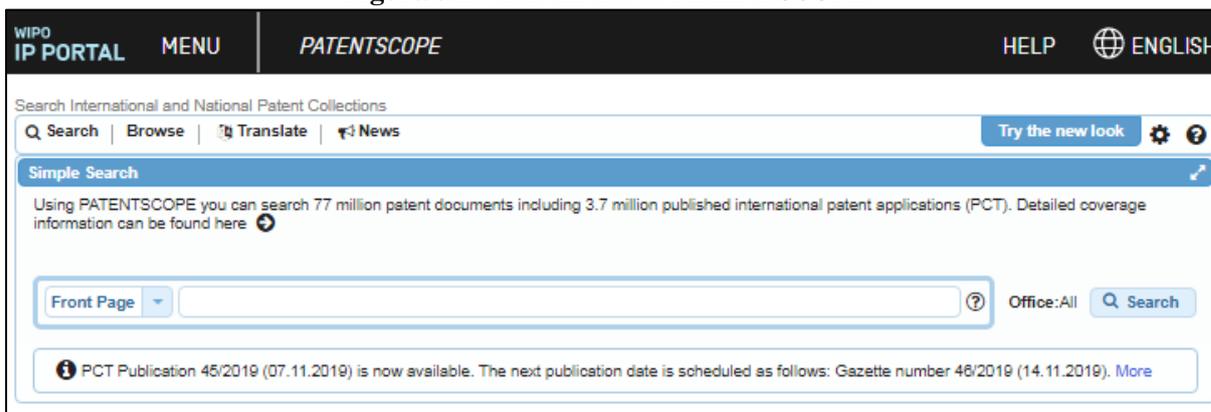
Figura 3.24 Tecnologias envolvidas na configuração da patente *US20150090321*.

H	ELECTRICIDADE
01	ELEMENTOS ELÉTRICOS BÁSICOS
L	DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES; DISPOSITIVOS ELÉTRICOS DE ESTADO SÓLIDO NÃO INCLUÍDOS EM OUTRO LOCAL
21	Processos ou aparelhos especialmente adaptados para a manufatura ou tratamento dos dispositivos semicondutores ou de dispositivos de estado sólido ou de partes dos mesmos
H	ELECTRICIDADE
01	ELEMENTOS ELÉTRICOS BÁSICOS
L	DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES; DISPOSITIVOS ELÉTRICOS DE ESTADO SÓLIDO NÃO INCLUÍDOS EM OUTRO LOCAL
31	Dispositivos semicondutores sensíveis à radiação infravermelha, luz, radiação eletromagnética de comprimento de onda mais curto ou radiação corpuscular e especialmente adaptados para a conversão da energia de tal radiação em energia elétrica ou para controle de energia elétrica por meio de tal radiação; Processos ou aparelhos especialmente adaptados para manufatura ou tratamento do mesmo ou de suas partes integrantes; Detalhes dos mesmos
04	adaptados como dispositivos de conversão
06	caracterizados por pelo menos uma barreira de potencial ou uma barreira de superfície
068	sendo as barreiras de potencial unicamente do tipo homojunção PN, p. ex. células solares por homojunção PN de silício bruto ou células solares de filmes finos por homojunção PN de silício policristalino
0687	Junções múltiplas ou células solares multi-junções ('tandem')
H	ELECTRICIDADE
01	ELEMENTOS ELÉTRICOS BÁSICOS
L	DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES; DISPOSITIVOS ELÉTRICOS DE ESTADO SÓLIDO NÃO INCLUÍDOS EM OUTRO LOCAL
31	Dispositivos semicondutores sensíveis à radiação infravermelha, luz, radiação eletromagnética de comprimento de onda mais curto ou radiação corpuscular e especialmente adaptados para a conversão da energia de tal radiação em energia elétrica ou para controle de energia elétrica por meio de tal radiação; Processos ou aparelhos especialmente adaptados para manufatura ou tratamento do mesmo ou de suas partes integrantes; Detalhes dos mesmos
18	Processos ou aparelhos especialmente adaptados para a fabricação ou o tratamento desses dispositivos ou de suas partes
H	ELECTRICIDADE
01	ELEMENTOS ELÉTRICOS BÁSICOS
L	DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES; DISPOSITIVOS ELÉTRICOS DE ESTADO SÓLIDO NÃO INCLUÍDOS EM OUTRO LOCAL
31	Dispositivos semicondutores sensíveis à radiação infravermelha, luz, radiação eletromagnética de comprimento de onda mais curto ou radiação corpuscular e especialmente adaptados para a conversão da energia de tal radiação em energia elétrica ou para controle de energia elétrica por meio de tal radiação; Processos ou aparelhos especialmente adaptados para manufatura ou tratamento do mesmo ou de suas partes integrantes; Detalhes dos mesmos
04	adaptados como dispositivos de conversão
06	caracterizados por pelo menos uma barreira de potencial ou uma barreira de superfície
078	incluindo diferentes tipos de barreiras de potencial de dois ou mais dos grupos H01L31/061-H01L31/075131

Fonte: WIPO (2019)

A Figura 3.25 mostra a tela inicial da base de dados *PATENTSCOPE*, o site onde se pode recuperar a patente descrita anteriormente.

Figura 3.25 Tela inicial da *PATENTSCOPE*.

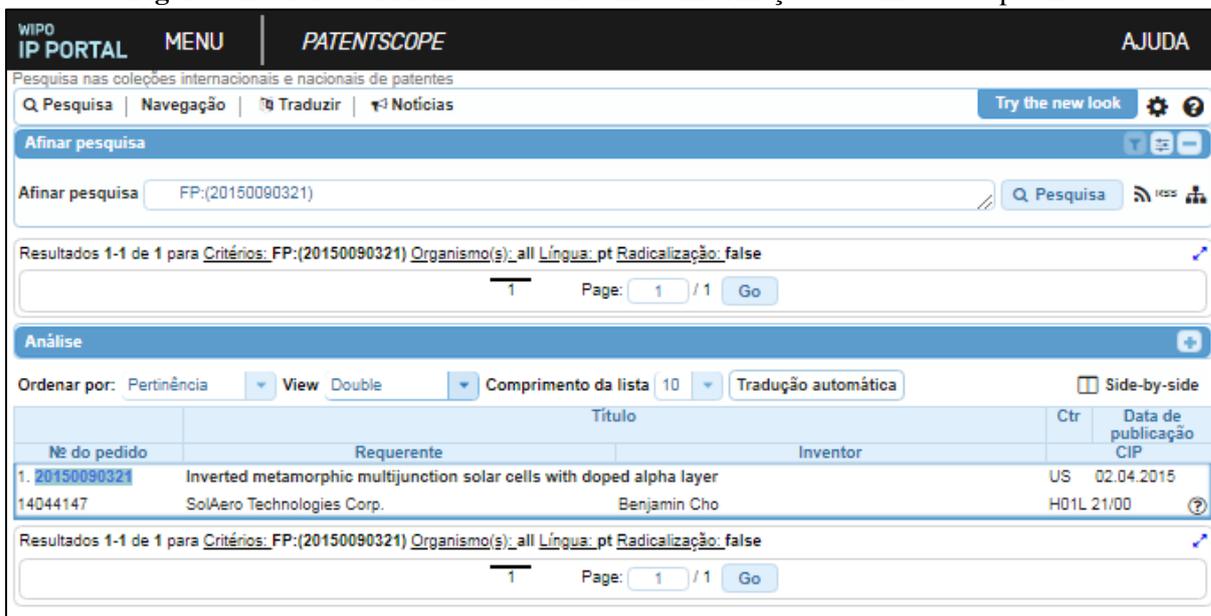


Fonte: WIPO (2019)

Nesta página inicial do *PATENTSCOPE*, cujo link de acesso é <https://patentscope.wipo.int/search/pt/search.jsf> é possível realizar a pesquisa do documento patentário desejado com a inserção dos códigos específicos.

Após a inserção do *label US20150090321* e seleção do botão de busca “pesquisa simples” na página inicial do *PATENTSCOPE*, a patente procurada é recuperada. A Figura 3.26 detalha a página da patente recuperada.

Figura 3.26 Tela do *PATENTSCOPE* com as informações detalhadas da patente.



Fonte: WIPO (2019)

A Figura 3.27, apresenta o documento de patente de uma célula solar de multijunção e um método de preparação da mesma. O *Abstract* do documento patentário é indicado selecionando-se o Título ou Nº de pedido da patente.

Figura 3.27 Tela do *PATENTSCOPE* com as informações do campo Abstract.

WIPO IP PORTAL MENU PATENTSCOPE AJUDA

pesquisa nas coleções internacionais e nacionais de patentes

Q Pesquisa | Navegação | Traduzir | Notícias Try the new look

Tradução automática

1. (US20150090321) Inverted metamorphic multijunction solar cells with doped alpha layer

Dados bibliográficos nacionais Descrição Reivindicações Desenhos Documentos

Ligação permanente

Organismo : Estados Unidos da América

Número do pedido: 14044147 Data do pedido: 02.10.2013

Número de publicação: 20150090321 Data de publicação: 02.04.2015

Número da concessão: 09891928 Data da concessão: 27.06.2017

Tipo de publicação : B2

CIP: H01L 21/00
H01L 31/0687
H01L 31/18
H01L 31/078

Requerentes: SolAero Technologies Corp.
SolAero Technologies Corp.

Inventores: Benjamin Cho
Yong Lin
Pravin Patel
Mark A. Stan
Arthur Cornfeld
Daniel McGlynn
Fred Newman

Dados da prioridade:

Título: (EN) Inverted metamorphic multijunction solar cells with doped alpha layer

Resumo: (EN)

A method of forming a multijunction solar cell comprising at least an upper subcell, a middle subcell, and a lower subcell, the method including forming a first alpha layer over said middle solar subcell using a surfactant and dopant including selenium, the first alpha layer configured to prevent threading dislocations from propagating; forming a metamorphic grading interlayer over and directly adjacent to said first alpha layer; forming a second alpha layer using a surfactant and dopant including selenium over and directly adjacent to said grading interlayer to prevent threading dislocations from propagating; and forming a lower solar subcell over said grading interlayer such that said lower solar subcell is lattice mismatched with respect to said middle solar subcell.

The diagram shows a cross-section of a multijunction solar cell with three subcells (A, B, and C) stacked on a GaAs substrate (101). Subcell A (102-107) consists of a GaAs buffer layer (102), a GaAs alpha layer (103), a GaAs window layer (104), a GaAs emitter layer (105), a GaAs window layer (106), and a GaAs contact layer (107). Subcell B (108-113) consists of a GaAs window layer (108), a GaAs emitter layer (109), a GaAs window layer (110), a GaAs emitter layer (111), a GaAs window layer (112), and a GaAs contact layer (113). Subcell C (114-119) consists of a GaAs window layer (114), a GaAs emitter layer (115), a GaAs window layer (116), a GaAs emitter layer (117), a GaAs window layer (118), and a GaAs contact layer (119). The diagram also shows a metamorphic grading interlayer (116) and a second alpha layer (117) between subcell B and subcell C.

Fonte: WIPO (2019)

Este documento de patente foi publicado em inglês, mas pode ser lido em português no site *PATENTSCOPE* com o recurso de tradução automática para diversos idiomas. Este documento em inglês com os descritivos da patente foi traduzido para o português para possibilitar a análise do conteúdo simples. A patente foi concedida em 27 de junho de 2017 e protegida nos Estados Unidos da América. Como essa proteção não foi estendida ao Brasil, ela encontra-se livre de proteção em nosso país.

Descritivo de uma patente do material *Multijunction solar cell* - US20150090321

A seguir é mostrado o descritivo da patente selecionada em extração 02 – *US20150090321* com a transcrição do texto da patente traduzida do inglês para o português:

Método de formação de uma célula solar de múltiplas junções compreendendo pelo menos uma subcélula superior, uma subcélula central e uma subcélula inferior, o método incluindo a formação de uma primeira camada alfa sobre a dita subcélula solar central utilizando um tensoativo e dopante incluindo selênio, a primeira camada alfa configurada para impedir o enroscamento de deslocamento de propagação; formação de uma camada intermediária de graduação metamórfica sobre e diretamente adjacente à dita primeira camada alfa; a formação de uma segunda camada alfa utilizando um tensoativo e dopante incluindo selênio sobre e diretamente adjacente à dita camada intermediária de classificação para impedir o enroscamento de pontos de propagação; e formar uma subcélula solar inferior sobre a referida camada intermediária de classificação de tal modo que a dita subcélula solar inferior é casada em treliça com relação à dita subcélula solar central. (Estados Unidos da América Patent N° US20150090321, 2019)

Campo Técnico de uma patente do material *Multijunction solar cell* - US20150090321

Resumidamente, e em termos gerais, a presente divulgação fornece um método para constituir uma célula solar multijunção que compreende pelo menos uma subcélula solar superior, uma subcélula solar média e uma subcélula solar inferior, o método incluindo a formação de uma primeira camada de barreira sobre a referida solar média subcélula usando um dopante/surfactante incluindo selênio, a primeira camada alfa configurada para impedir a propagação de deslocamentos de rosqueamento; formar um intercalar de classificação metamórfico sobre e diretamente adjacente à referida primeira camada alfa; e formar uma subcélula solar inferior sobre o referido intercalar de classificação, de modo que a referida subcélula solar inferior seja uma estrutura incompatível com a referida subcélula solar média.

3.4.3 Análise das patentes protegidas mundialmente das extrações 01 e 02

Foi feita a análise simples do conteúdo das informações das patentes para a interpretação nelas contidas, relativas aos materiais pesquisados. Nas extrações, as patentes com proteção mundial estão assinaladas no campo *Country* com o termo *WO* (*World*). Na Figura 3.28 é apontado um exemplo de uma patente com proteção mundial.

Figura 3.28 Patente recuperada no site *PATENTSCOPE* com proteção mundial.

Pesquisa nas coleções internacionais e nacionais de patentes

Q Pesquisa | Navegação | Traduzir | Notícias Try the new look

Afinar pesquisa

Afinar pesquisa FP:(WO/2013/171517) Pesquisa

Resultados 1-1 de 1 para Critérios: FP:(WO/2013/171517) Organismo(s): all Língua: pt Radicalização: false

1 Page: 1 / 1 Go

Análise

Ordenar por: Pertinência View: All Comprimento da lista: 10 Tradução automática Side-by-side

Nº do pedido	Requerente	Título	Inventor	Ctr	Data de publicação CIP
1. WO/2013/171517	OPTOELECTRONIC DEVICES WITH ORGANOMETAL PEROVSKITES WITH MIXED ANIONS			WO	21.11.2013
PCT/GB2013/051308	ISIS INNOVATION LIMITED	SNAITH, Henry		HD1G	9/20

The invention provides an optoelectronic device comprising a mixed-anion perovskite, wherein the mixed-anion perovskite comprises two or more different anions selected from halide anions and chalcogenide anions. The invention further provides a mixed-halide perovskite of the formula (I) [A][B][X]3 wherein: [A] is at least one organic cation; [B] is at least one divalent metal cation; and [X] is said two or more different halide anions. In another aspect, the invention provides the use of a mixed-anion perovskite as a sensitizer in an optoelectronic device, wherein the mixed-anion perovskite comprises two or more different anions selected from halide anions and chalcogenide anions. The invention also provides a photosensitizing material for an optoelectronic device comprising a mixed-anion perovskite wherein the mixed-anion perovskite comprises two or more different anions selected from halide anions and chalcogenide anions.

Resultados 1-1 de 1 para Critérios: FP:(WO/2013/171517) Organismo(s): all Língua: pt Radicalização: false

1 Page: 1 / 1 Go

Fonte: WIPO (2019)

As duas extrações de patentes para os materiais *Perovskite solar cell* e *Multijunction solar cell* pesquisadas, apresentaram documentos com a sigla *WO*, significa que estes não estão livres para reprodução no Brasil. Nestas duas extrações, com exceção das patentes marcadas com o termo *WO*, no campo *Country* não se constatou a sigla *BR*, o que indica que estas patentes nestas condições observadas não têm proteção no Brasil.

No processo de procura de patentes com a possibilidade de reprodução ou utilização da informação no Brasil, a procura pode ser realizada com o número de uma determinada tecnologia no campo *IPCR7* ou *IPCR11*, uma palavra-chave específica no campo *Title*, que equivale ao título da patente. Na análise das patentes recuperadas, é possível observar no campo *Country* os países onde as patentes foram protegidas.

Na Figura 3.29, para a extração 01 constata-se a existência de 267 patentes que equivalem a 18% e para a extração 02 verifica-se a existência de 55 patentes ou 10,8% nos países onde as patentes foram protegidas. Portanto, tem-se que 322 de 1992 patentes do total (16,2%) contam com proteção mundial.

Figura 3.29 Patentes publicadas e protegidas para as extrações 01 e 02.

	Patentes	PCT	%
Extração 1 Perovskita solar cell	1484	267	18,0%
Extração 2 Multijunction solar cell	508	55	10,8%

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Utilizando-se o site *PATENTSCOPE* para recuperar as extração 01 e 02, identificou-se que com relação à pesquisa e o desenvolvimento de materiais pode-se aproveitar as informações das publicações de patentes concedidas sem a extensão da proteção no Brasil, permitindo o aproveitamento de tais tecnologias para o desenvolvimento tecnológico nacional (Ferraz et al., 2016).

3.5 Discussão

O estudo identificou as principais tendências mundiais sobre os pedidos de patentes sobre os materiais *Perovskite solar cell* e *Multijunction solar cell*. As tecnologias descritas nestes documentos descrevem os países onde foram depositadas e, deste modo, quais não são protegidas e quais são possíveis de aproveitar a trilha tecnológica para serem replicadas no Brasil.

O *PATENTSCOPE* foi utilizado para extrair informações relacionadas às patentes sobre os materiais escolhidos para serem analisados e com o objetivo de verificar o panorama em relação à produção tecnológica mundial sobre *Perovskite solar cell* e *Multijunction solar cell*.

O *PATENTSCOPE* se mostrou eficaz no que diz respeito à extração, organização e disponibilização dos dados nos documentos patentários disponíveis para consulta na *WIPO IP PORTAL*. Foi possível verificar que as informações extraídas tornaram-se disponíveis e foram sintetizadas em uma série de gráficos relacionados à produção tecnológica sobre o assunto de interesse. A ferramenta possibilitou aferir a evolução do depósito de patentes nas últimas décadas, facilitando identificar os principais inventores, as empresas envolvidas no desenvolvimento de patentes, os países detentores das patentes, as principais tecnologias e outras funcionalidades.

Na extração 01 para o material *Perovskite solar cell* no que se refere aos resultados da pesquisa tecnométrica envolvendo documentos patentários, nota-se uma progressão significativa de publicações até o ano de 2018.

Todos os países com concessão de depósitos, de origem dos inventores e de origem dos depositantes das patentes recuperadas, sobressaem-se a China e os Estados Unidos associados às tecnologias sobre células solares fotovoltaicas. São os países que contém a maior parte das concessões de patentes, 74% das 1992 correspondem à categoria do material *Perovskite solar cell* sendo assim uma referência para a pesquisa sobre assunto.

Cabe observar a quantidade de registros de patentes com proteção mundial assinaladas no campo *Country* com o termo *WO (World)*, que totalizam 267 depósitos, equivalente a 18% do total de patentes recuperadas e também à existência de inventores sem identificação nestas patentes, a Austrália é o país de origem destes inventores não identificados. Os inventores com mais patentes publicadas são a China, os Estados Unidos, e a Europa com a maior parte dos inventores depositantes de pedidos de patentes.

Destaca-se dentre as instituições que fazem depósitos de patentes, a empresa *Merck Group*, multinacional alemã de produtos farmacêuticos e ciências químicas, que faz pesquisas sobre materiais para *Perovskite solar cell* com uma quantidade considerável de patentes. Embora tenha mais patentes registradas na amostra analisada, não se trata de desenvolvimento de células solares fotovoltaicas, mas de materiais compósitos que permitem aumentar a eficiência dessas células. Estes materiais são compostos e polímeros como semicondutores, semicondutores orgânicos de base, polímeros conjugados, material de transporte do furo, misturas semicondutoras, misturas de semicondutores com nanopartículas e fulerenos.

Ressalta-se também a participação da Universidade Chinesa *Huazhong de Ciência e Tecnologia*, produzindo diversas soluções tecnológicas e também a empresa americana *SolAero Technologies*, fornecedora de painéis solares para comunicações de defesas e indústria de telecomunicações patenteando diversas soluções para painéis solares de alta eficiência para o segmento aeroespacial e por satélite.

As patentes mapeadas nesta extração estão incluídas como sendo relativas à “Energia Solar e Células Fotovoltaicas”. Com relação às patentes não protegidas no Brasil, os documentos que no campo *Title*, não contém a expressão *WO* essas informações podem ser usadas, possibilitando a inovação.

Na extração 02 para o material *Multijunction solar cell* os resultados da pesquisa tecnométrica também mostram uma progressão das publicações até o ano de 2018.

Os países de destaque nestas publicações de patentes são os Estados Unidos da América e o Instituto Europeu de Patentes (IEP), com 26% das 1992 publicações sobre esta categoria de material, ressalta-se que também existem publicações de patentes com proteção mundial assinaladas no campo *Country* com o termo *WO (World)* e a existência de inventores sem identificação, sendo canadenses e americanos os países de origem.

A empresa alemã *Merck Patent GMBH* também depositou patentes sobre compósitos para o material *Multijunction solar cell* e as principais temáticas que englobam estes assuntos são discussões sobre a “Energia Solar e Células Fotovoltaicas”.

Estudar as patentes permitiu avaliar a competição e a interação entre os inventores, as instituições públicas e privadas. Chama a atenção que os Estados Unidos e a China caracterizam-se como países engajados na ampliação de tecnologias relacionadas a células solares fotovoltaicas, publicando uma considerável quantidade de patentes sobre o tema.

3.6 Considerações Finais

A energia solar é inesgotável e tem sido empregada de maneira crescente, pois promove a energia elétrica de maneira mais limpa no meio ambiente. Estudar as informações relacionadas às patentes sobre células solares fotovoltaicas, pode garantir o mérito ao inventor, pois essa produção técnica pode trazer soluções, de baixo custo, para diversos problemas enfrentados por uma sociedade.

Em relação à seguinte questão de pesquisa **“Quais são as patentes depositadas no banco de dados *PATENTSCOPE* da Organização Mundial de Propriedade Intelectual (OMPI) relacionada às células solares fotovoltaicas?”** este estudo conseguiu abordar as principais tecnologias estudadas sobre o tema. Na análise do conteúdo descritivo das patentes se sobressaiu a procura por novos materiais e métodos de fabricação mais eficazes. Essas patentes procuram ampliar a eficiência energética das células solares fotovoltaicas, tornando-as mais eficientes na geração da energia elétrica.

De maneira geral os principais países com depósitos e publicações de patentes são majoritariamente chineses e americanos. Os chineses são os principais fornecedores de células fotovoltaicas mundialmente, pois detêm as tecnologias de beneficiamento do silício de

elevada pureza e por possuírem muitos recursos financeiros para investimentos. Cabe ressaltar que os americanos também contam com muitas publicações de pedidos de patentes e também contam diversas instituições de pesquisa desenvolvendo tecnologia nesta área.

As pesquisas abordadas podem ter como referência principal os pedidos de depósitos de patentes chineses e americanos que se encontram livres para reprodução em outros países, como o Brasil. As patentes sem proteção mundial são livres para reprodução em outros países em conformidade com a legislação mundial de patentes.

O *PATENTSCOPE* possibilitou a recuperação de patentes que podem ser replicadas no Brasil, utilizando palavras-chave específicas ou o título da patente. Os pesquisadores e inventores podem se informar sobre as tecnologias a partir da análise dos descritivos destas patentes disponíveis nos resumos desses documentos de acordo com os interesses de cada área.

As duas extrações realizadas recuperaram uma amostra considerável de patentes no *PATENTSCOPE*, mas a verificação de todas as categorias de materiais não foi atingida para poder mapear todas as principais tecnologias para as células solares fotovoltaicas. Também foi sentida a ausência de software para análise das redes interativas entre os inventores e empresas.

Como sugestão de estudos futuros sugere-se a análise descritiva de todas as categorias de materiais encontrados nas bases de dados de patentes relativas a estes materiais e a realização de entrevistas com especialistas para validação das informações recuperadas.

Referências

- Amadei, J. R. P., & Torkomian, A. L. V. (2009). As patentes nas universidades: análise dos depósitos das universidades públicas paulistas (1995-2006). *Ciência da Informação*, 38(2), 9–18. <https://doi.org/10.1590/S0100-19652009000200001>
- Amaral, R. M. D., Possatti, M. A., Faria, L. I., Allipandrini, D. H., & Pereira, N. A. (2004). Uma visão da produção científica nos Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção através da Bibliometria. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção através da Bibliometria*, 24, 4883-4890.
- Amparo, K. K. D. S., Ribeiro, M. D. C. O., & Guarieiro, L. L. N. (2012). Estudo de caso utilizando mapeamento de prospecção tecnológica como principal ferramenta de busca científica. *Perspectivas em Ciência da Informação*, 17(4), 195-209.
- Andrei, C., Lestini, E., Crosbie, S., de Frein, C., O'Reilly, T., & Zerulla, D. (2014). Plasmonic enhancement of dye sensitized solar cells via a tailored size-distribution of chemically functionalized gold nanoparticles. *PLoS One*, 9(10) doi:<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0109836>
- Araújo, C. A. (2007) Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, v. 12, n. 1.
- Barroso, A. C. de O., Shammass, G. I. J., Marchesini, P. R. de A., Pigatto, R., & Melo, R. C. de. (2005). Fatores e ambientes que influenciam a inovação. *Pensamento & Realidade*, 16(0), 82–100.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais* (4 ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Caputo, G. M. (2006). Sistema Computacional para o processamento textual de patentes industriais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1-142.
- Caruso, L. A. C., & Tigre, P. B. (2004). Modelo SENAI de prospecção. Montevideo: CINTERFOR/OIT.
- Carvalho, P. S. L. D., Mesquita, P. P. D., & Rocio, M. A. R. (2014). A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?.
- Cassiolo, J. E., & Lastres, H. M. M. (2005). Sistemas de inovação e desenvolvimento: as implicações de política. *São Paulo em perspectiva*, 19(1), 34-45.
- Cooper, D. R., Schindler, P. S., & Pamela, S. (2011). *Métodos de Pesquisa em Administração-7ª edição*. McGraw Hill Brasil.
- Correa, F., & Gomes, S. (2013). A patente na universidade: sigilo, transparência e direito à informação. VIII ENANCIB – Encontro Nacional de Pesquisa em Ciência da Informação, 15. Recuperado de <http://repositorios.questoesemrede.uff.br/repositorios/handle/123456789/1250>
- Cortes, A. D. S. (2011). Desenvolvimento de células fotovoltaicas utilizando silício grau metalúrgico melhorado (Si-GMM).

- Costa, P. R., Porto, G. S., & Plonski, G. A. (2010). Gestão da cooperação empresa-universidade nas multinacionais brasileiras. *Revista de Administração e Inovação*, 7(3), 150-173.
- Do Brasil, A. D. E. E. (2008). Agência Nacional de Energia Elétrica. ANEEL, Brasília, Brasil. 3aEd.
- EPE. (2018). Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017. Empresa de Pesquisa Energética (EPE).
- Falleiro, A. D. M., Andrade, J. C. S., & Gastaldini, M. D. C. C. (2016). Projetos de energia renovável no âmbito do mdl-o caso do Brasil/renewable energy projects in cdm scope—the case of Brazil. *Revista Metropolitana de Sustentabilidade* (ISSN 2318-3233), 6(1), 43-58.
- Ferraz, R. R. N., Quoniam, L., Reymond, D., & Maccari, E. A. (2016). Example of open-source OPS (Open Patent Services) for patent education and information using the computational tool Patent2Net. *World Patent Information*, 46, 21-31.
- Flandoli, F. (2017). Geração, Tipos e Características de Células Fotovoltaicas. Recuperado 7 de junho de 2019, de Programa Eletricista Consciente website: <http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/2-celulas-e-modulos-fotovoltaicos/geracao-tipos-e-caracteristicas-de-celulas-fotovoltaicas/>
- Franco, D. P. (2016). Dark Web—Navegando no Lado Obscuro da Internet. *Amazônia em Foco: Ciência e Tecnologia*, 4(6), 18-33.
- Galvão, Noemi Dreyer e Marin, Heimar de Fátima. (2009). Técnica de mineração de dados: uma revisão da literatura. *Acta Paulista de Enfermagem*, 22 (5), 686-690. <https://dx.doi.org/10.1590/S0103-21002009000500014>
- Geisz, J. F., Steiner, M. A., Jain, N., Schulte, K. L., France, R. M., McMahon, W. E., ... Friedman, D. J. (2018). Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(2), 626–632. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2778567>
- Goldemberg, J., & Lucon, O. (2007). Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*, (72), 6-15.
- Hair, J., Babin, B., Money, A., & Samouel, P. (2005). Fundamentos de Métodos de Pesquisa em Administração. Recuperado de <http://centaur.reading.ac.uk/22921/>
- IBRAP. (2019). Fotovoltaico—Perfis em alumínio para estrutura de painel solar—IBRAP. Recuperado 18 de outubro de 2019, de IBRAP - Alumínio e plástico website: <http://ibrap.com.br/aluminio/fotovoltaico/>.
- Jannuzzi, G. (2012). Além de Grandes Hidrelétricas—Políticas para Fontes Renováveis de energia Elétrica no Brasil. Sumário para Tomadores de Decisão-WWF.
- Jean, J., Brown, P. R., Jaffe, R. L., Buonassisi, T., & Bulović, V. (2015). Pathways for solar photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 8(4), 1200-1219.

- Laudon, K., & Laudon, J. (2011). *Sistemas de Informações Gerenciais: Fundamentos da inteligência de negócios: gestão da informação e de banco de dados*.
- Li, X., Zhou, Y., Xue, L., & Huang, L. (2015). Integrating bibliometrics and roadmapping methods: A case of dye-sensitized solar cell technology-based industry in China. *Technological Forecasting and Social Change*, 97, 205–222. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.05.007>
- Machado, C. T., & Miranda, F. S. (2014). Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. *Revista Virtual de Química*, 7(1), 126–143. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150008>
- Massarani, L. (2012). Comunicação da ciência e apropriação social da ciência: algumas reflexões sobre o caso do Brasil. *Uni-pluriversidad*, 12(3), 92–100.
- Ministério das Minas e Energia MME. (2007). Plano Nacional de Energia - 2030. Recuperado 11 de abril de 2019, de Empresa de Pesquisa Energética EPE website: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>
- Mori, V., Santos, R. L. C. D., & Sobral, L. G. S. (2007). Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais.
- Moure, C., & Peña, O. (2015). Recent advances in perovskites: processing and properties. *Progress in Solid State Chemistry*, 43(4), 123-148.
- NREL. (2019). Cell Efficiency Chart. Recuperado 9 de novembro de 2019, de The National Renewable Energy Laboratory (NREL) website: <https://www.nrel.gov/index.html>
- OCDE, Organização para cooperação e desenvolvimento econômico. (2005). *Manual de Oslo - Diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação*.
- ONU. Inside WIPO. Disponível em: <<https://www.wipo.int/about-wipo/en/index.html>>. Acesso em: 24 out. 2019.
- Pazheri, F. R., Othman, M. F., & Malik, N. H. (2014). A review on global renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 835-845.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., de Abreu, S. L., & Rütther, R. (2006). *Atlas brasileiro de energia solar (Vol. 1)*. São José dos Campos: Inpe.
- Porter, A. L. (2004). Technology futures analysis: Toward integration of the field and new methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(3), 287–303. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2003.11.004>
- Puhlmann, A. C. A. & Moreira, C. (2004) *Noções gerais sobre proteção de tecnologia e produtos: versão inventor*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- Quoniam, L., Kniess, C. T., & Mazzieri, M. R. (2014). A patente como objeto de pesquisa em Ciências da Informação e Comunicação. *Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação*, 19(39), 243-268.

- Reich, N. H., Alsema, E. A., Van Sark, W. G. J. H. M., Turkenburg, W. C., & Sinke, W. C. (2011). Greenhouse gas emissions associated with photovoltaic electricity from crystalline silicon modules under various energy supply options. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(5), 603-613.
- Ren21, R. (2016). Global status report. REN21 secretariat, Paris.
- Rhodes, Christopher J. (2016). A conferência de mudança climática de Paris 2015: COP21. *Progresso da ciência*, 99 (1), 97.
- Ribeiro, U. G. V. (2012). Estudo de viabilidade econômica de instalação de fontes de energia renováveis... Recuperado de <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-18042013-145705/?&lang=br>
- Santos, A. M., Kniess, C. T., Mazzieri, M. R., & Quoniam, L. (2014). Análise tecnométrica de patentes: uma aplicação na recuperação de terras raras. In 17º Seminários em Administração (Vol. 17, pp. 1–15).
- Souza, M. C. O., & Corazza, R. I. (2017). Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 42.
- Vergara, S. C. (2016). *Projetos e relatórios de pesquisa em administração (16a)*. São Paulo, Brazil: Editora Atlas SA.
- Vichi, F. M., & Mansor, M. T. C. (2009). Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. *Química Nova*, 32(3), 757–767.
- WIPO, P. (2019, novembro 12). WIPO PATENTSCOPE - Search International and National Patent Collections. Recuperado 12 de novembro de 2019, de WIPO IP PORTAL website: <https://patentscope.wipo.int/search/en/search.jsf>

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa propôs a seguinte questão central de pesquisa: **“Quais materiais tem potencial de concorrer com o silício na composição de células solares para geração fotovoltaica?”** e em resposta a este questionamento, analisou as tendências tecnológicas das células solares fotovoltaicas, primeiro sob o ponto de vista exploratório procurando na literatura científica os estudos mais recentes sobre o tema e segundo com uma visão mais específica e tecnológica, analisando os documentos extraídos de um banco de dados de patentes.

O Estudo 1 realizou uma revisão sistemática da literatura sobre as tecnologias de geração de energia fotovoltaica e concluiu que novos materiais estão sendo pesquisados. A melhoria da conversão de energia das células solares fotovoltaicas utilizando novos materiais que sejam mais eficientes foi o caminho tecnológico encontrado na literatura científica. Novos materiais que podem ampliar a utilização de energia mais limpa e trazer benefícios ambientais e econômicos.

No Estudo 2 foi realizada uma pesquisa cientométrica envolvendo os documentos de patentes, foram analisados os períodos com maior depósito e concessão das patentes, os inventores e as empresas patrocinadores das pesquisas e as tecnologias utilizadas na composição destes novos materiais, constatou-se que estas informações são um complemento importante para os pesquisadores utilizarem. No caso das patentes analisadas as tecnologias se referiam à “Energia Solar e Células Fotovoltaicas” Nas duas extrações encontraram-se patentes livres para reprodução em outros países incluindo o Brasil, em conformidade com a legislação de patentes.

As novas tecnologias de 2^a e 3^a geração apresentaram as melhores características elétricas para superar a tecnologia do silício que está presente no mercado mundial há muito tempo. Países como a China e os EUA lideram as pesquisas sobre estes novos materiais. Dominar as tecnologias de produção destes materiais é muito importante para o Brasil diminuir a dependência tecnológica desses países. Estas células solares fotovoltaicas são chamadas de células de filme fino, células multijunção, células *perovskita*, células sensibilizadas por corantes, células orgânicas e células de ponto quântico, sendo os materiais mais promissores pesquisados.

A Tabela 4.1 resume a estrutura da dissertação por meio da Matriz Contributiva (MC) e está alinhada com a Tabela 1.1 (Matriz Metodológica – MM).

Tabela 4.1 Matriz Contributiva (MC).

QUESTÃO CENTRAL DE PESQUISA: "Quais materiais tem potencial estratégico de concorrer com o silício na composição de células solares para geração fotovoltaica?"			
OBJETIVO GERAL: Analisar os materiais com potencial estratégico para competir com o silício na composição de células solares fotovoltaicas.			
CONCLUSÃO PARTICULARIZADA			
Síntese dos resultados	Contribuições para o avanço do conhecimento	Limitações	Proposta de estudos futuros
Estudo 1: Materiais alternativos ao silício para produção de células solares fotovoltaicas: Revisão sistemática.	Constatação a partir da revisão sistemática da literatura na base de dados SCOPUS, de 112 artigos divididos em 11 categorias de materiais mais citados. A Tabela 2.2 sintetiza os artigos mais publicados sobre estas categorias de materiais.	A pesquisa se limitou à pesquisa na base SCOPUS. Foram encontrados muitos estudos sem as características procuradas (indicação de custo, disponibilidade e impacto ambiental).	Aprofundar a pesquisa teórica sobre as categorias de materiais encontrados em outras bases de dados. Novas pesquisas exploratórias quanto a custo, disponibilidade e impacto ambiental.
Estudo 2: Patentes alternativas ao silício para produção de células solares fotovoltaicas: Estudo Cientométrico.	Estudo Cientométrico na base de patentes PATENTSCOPE, com a recuperação de 1992 patentes sobre os 2 materiais com mais patentes concedidas. A Tabela 3.5 sintetiza as patentes mais recuperadas para estes materiais.	Obteve-se uma amostra representativa das patentes no PATENTSCOPE. A ausência de software para análise das redes interativas entre inventores e entre empresas. A limitação de tempo para verificação de todas as categorias de materiais.	Análise descritiva das categorias de materiais encontrados nas bases de dados de patentes relativas a estes materiais. Realização de entrevistas com especialistas para validação das informações recuperadas.

Fonte: Adaptado de Costa, Ramos e Pedron (2019).

Esta pesquisa cumpriu com os dois objetivos específicos que viabilizaram a entrega do objetivo geral, ou seja, um panorama no que diz respeito ao potencial estratégico para competir com o silício na composição de células solares fotovoltaicas apresentados na Tabela 1.1 (Matriz Metodológica – MM).

4.1 Conclusão integradora

Esse trabalho possibilitou um guia para os pesquisadores interessados em colher informações sobre energia solar fotovoltaica para projetos de materiais sobre *Perovskite solar cell* e *Multijunction solar cell*. Permitiu considerar uma visão de médio prazo na medida em que, se conhecendo a trilha metodológica é possível antever a evolução e os resultados de cada estudo, poupando tempo empregado em pesquisa e investimentos financeiros.

Neste contexto, com este trabalho foi possível conhecer novos materiais que permitam construir células solares fotovoltaicas mais eficientes propiciando o aumento dos sistemas de geração de energia de pequeno porte em residências, comércio e indústrias e assim contribuir com parcelas cada vez maiores de energia limpa na matriz energética brasileira.

Se nos resultados da pesquisa cientométrica envolvendo os documentos patentários, as características das invenções produzirem um aumento da eficiência de aproveitamento da energia solar fotovoltaica em pequenos sistemas geradores de energia enxergam-se boas perspectivas para as células fotovoltaicas se tornarem competitivas com outras modalidades de produção de energia elétrica no país. Assim os pesquisadores e inventores de células solares fotovoltaicas terão condições de detectar tecnologias com potencial de replicação no Brasil a partir desses documentos.

4.2 Limitações e sugestões para estudos futuros

Quanto às limitações dos estudos, no estudo 1 a revisão sistemática da literatura se limitou à base de dados *SCOPUS* onde não foram encontrados muitos estudos com as características procuradas de indicação de custo, disponibilidade de material e impacto ambiental. Já no estudo 2 o estudo patentário ficou limitado, por siso ter pesquisado somente a base de dados *PATENTSCOPE*, não incluindo as demais patentes que foram depositadas em outras bases de dados, ainda que a quantidade de patentes avaliada tenha sido bastante expressiva. Outra dificuldade encontrada foi a disponibilidade de um software gratuito com mais funcionalidades de análise das redes interativas entre inventores e entre empresas, para se determinar a interdependência das tecnologias envolvidas.

Sugere-se para estudos futuros a análise das categorias de materiais que não foram analisadas neste estudo pela baixa eficiência de conversão de energia ou pela baixa quantidade de patentes sobre a energia solar fotovoltaica, que forem publicados para acompanhar a evolução das tecnologias no mercado solar fotovoltaico.

O interesse pela energia solar fotovoltaica tem sido crescente no meio acadêmico, empresarial e governamental. Pela falta de tempo e acesso aos especialistas, sugere-se a realização de entrevistas para averiguar a opinião dos mesmos sobre os desafios e contribuições sobre o tema.

Referências

- Atlas de energia elétrica do Brasil (3a edição). (2008). Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica.
- Barbosa Filho, W. P., Ferreira, W. R., Azevedo, A. C. S. de, Costa, A. L., & Pinheiro, R. B. (2015). Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: Impactos ambientais e políticas públicas. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 4, 628. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v4e02015628-642>
- Brasil, M. (2018). Balanço Energético Nacional. MME, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília, DF. Disponível em 2018.
- Bühler, A. J., Santos, F. H. dos, & Gabe, I. J. (2018). Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Apresentado em Gramado. Recuperado de <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/267>
- Carvalho, P. S. L. de, Mesquita, P. P. D., & Rocio, M. A. R. (2014). Carvalho, P. S. L. D., Mesquita, P. P. D., & Rocio, M. A. R. (2014). A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?
- Chen, W., Hong, J., Yuan, X., & Liu, J. (2016). Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1025–1032. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.024>
- Costa, P. R. da, Ramos, H. R., & Pedron, C. D. (2019). Proposição de Estrutura Alternativa para Tese de Doutorado a Partir de Estudos Múltiplos. *Revista Ibero-Americana de Estratégia*, 18. <https://doi.org/10.5585/riae.v18i2.2783>
- Goldemberg, J., & Lucon, O. (2007). Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*, (72), 6-15.
- Goldemberg, J., & Moreira, J. R. (2005). Política energética no Brasil. *Estudos avançados*, 19(55), 215-228.
- Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., & Xu, C. (2016). Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. *Solar Energy*, 133, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.013>
- IEA. (2018). Sustainable Development Goal 7. Recuperado 9 de abril de 2019, de International Energy Agency IEA website: <https://www.iea.org/sdg/renewables/>
- Jordani, A. R. (2018). Perspectivas da microgeração e distribuição de energia solar fotovoltaica no Brasil: um estudo prospectivo via mineração de patentes.
- Kruyt, B., van Vuuren, D. P., de Vries, H. J. M., & Groenenberg, H. (2009). Indicators for energy security. *Energy Policy*, 37(6), 2166–2181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.006>
- Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Asri Mat Teridi, M., Sepeai, S., ... Sopian, K. (2018). Prospects of life cycle assessment of renewable energy from

- solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.048>
- Lunardi, M. M., Ho-Baillie, A. W. Y., Alvarez-Gaitan, J. P., Moore, S., & Corkish, R. (2017). A life cycle assessment of perovskite/silicon tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(8), 679–695. <https://doi.org/10.1002/pip.2877>
- Machete, R., Falcão, A. P., Gomes, M. G., & Moret Rodrigues, A. (2018). The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. *Energy and Buildings*, 177, 290–302. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.064>
- Millard, D. (Org.). (2018). Key world energy statistics. The International Energy Agency (IEA).
- Ministério das Minas e Energia, M. (2007). Plano Nacional de Energia - 2030. Recuperado 11 de abril de 2019, de Empresa de Pesquisa Energética EPE website: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>
- MME. (2018). Resenha Energética Brasileira 2018 Ano Base 2017. Recuperado de <http://www.mme.gov.br>
- Overholm, H. (2015). Spreading the rooftop revolution: What policies enable solar-as-a-service?. *Energy Policy*, 84, 69-79.
- Pazheri, F. R., Othman, M. F., & Malik, N. H. (2014). A review on global renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 835-845.
- Ren21, R. (2016). Global status report. REN21 secretariat, Paris.
- Rhodes, Christopher J. (2016). A conferência de mudança climática de Paris 2015: COP21. *Progresso da ciência*, 99 (1), 97.
- Sandor, D., Fulton, S., Engel-Cox, J., Peck, C., & Peterson, S. (2018). System Dynamics of Polysilicon for Solar Photovoltaics: A Framework for Investigating the Energy Security of Renewable Energy Supply Chains. *Sustainability*, 10(1), 160. <https://doi.org/10.3390/su10010160>
- Tolmasquim, M. T. (2016). Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Recuperado de <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/livro-sobre-energia-renovavel-hidraulica-biomassa-eolica-solar-oceanica>
- Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N. A., & Selvaraj, J. A. /L. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 443–461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>
- Vichi, F. M., & Mansor, M. T. C. (2009). Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. *Química Nova*, 32(3), 757–767. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300019>

Wade, A., Stolz, P., Frischknecht, R., Heath, G., & Sinha, P. (2018). The Product Environmental Footprint (PEF) of photovoltaic modules—Lessons learned from the environmental footprint pilot phase on the way to a single market for green products in the European Union. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(8), 553–564. <https://doi.org/10.1002/pip.2956>.