

IMPACTO AMBIENTAL DOS PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS: um estudo da literatura com o uso da bibliometria.

IGOR FELIPE DO CARMO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS - UFR

HEITOR LOPES FERREIRA

Introdução

A implantação da energia solar fotovoltaica (PV) cresceu a um ritmo sem precedentes desde o início dos anos 2000. À medida que o mercado fotovoltaico global cresce, espera-se que o número de painéis fotovoltaicos desativados e o volume de grandes quantidades de resíduos gerados a cada ano aumente até o início da década de 2030. O final de vida de painéis fotovoltaicos apresenta novos desafios ambientais, mas também oportunidades sem precedentes para criar valor e buscar novos caminhos econômicos (IRENA, 2016).

Problema de Pesquisa e Objetivo

Emerge uma crescente preocupação no âmbito mercadológico relacionada ao incremento no emprego de sistemas de geração distribuída, fundamentado nas inúmeras vantagens ambientais e socioeconômicas inerentes a essa tecnologia. Contudo, esse impulso ascendente inevitavelmente conduzirá à fabricação ampliada de novos painéis fotovoltaicos, o que suscita uma reflexão premente sobre o encerramento do ciclo de vida desses produtos e suas eventuais repercussões na esfera ambiental. A apreensão genuína reside, portanto, no âmbito da adequada destinação dos painéis fotovoltaicos ao final de sua vida.

Fundamentação Teórica

O artigo em questão aborda, em sua base teórica, as principais correlações entre avaliação do ciclo de vida e energia solar fotovoltaica. Esse estudo se concentra especialmente em autores amplamente citados na área, periódicos com alto fator de impacto e emprega palavras-chave, com o auxílio da bibliometria, para o alcance de seus objetivos. Buscando garantir um levantamento bibliométrico criterioso e representativo, enfatizando a abordagem de trabalhos de autores e periódicos que se mostraram mais diretamente pertinentes ao escopo do estudo, em consonância com o tema de pesquisa delineado.

Metodologia

A pesquisa e a coleta dos dados foram realizadas no mês de maio de 2023 a partir de diferentes fontes secundárias, que foram obtidas a partir da base de dados Scopus. O Scopus é um base de dados que disponibiliza resumos e citações originado em 2004. Esta base de dados contém métodos para restringir a pesquisa pela data da publicação, nome dos autores, área de estudo, tipo de documento, título da fonte da publicação, palavras-chave, e assim por diante. Optou-se pela busca de informações centrada na escolha de palavras-chave, delimitando o período de busca em cinco anos, 2018 a 2022.

Análise dos Resultados

A análise dos dados bibliométricos revela um notável aumento no número de publicações sobre energia solar fotovoltaica ao longo do período estudado. Esse cenário ascendente denota o crescente interesse da comunidade acadêmica em explorar e contribuir para o desenvolvimento dessa tecnologia sustentável. No entanto, ressalta-se a importância de manter o foco na qualidade das pesquisas e considerar questões relacionadas à viabilidade.

Conclusão

Os resultados também indicam uma produção desigual de artigos científicos, com um número reduzido de autores responsáveis pela maioria das publicações, de acordo com as leis empíricas utilizadas. No topo da distribuição, temos 412 autores, que correspondem a 29,18% do total, mas são responsáveis por apenas um artigo publicado, representando 1% do total. Isso destaca a presença de uma parcela considerável de autores que contribuem com uma quantidade relativamente baixa de publicações, indicando uma possível assimetria na produtividade científica.

Referências Bibliográficas

CAGLE ET AL. (2020); KAZEM ET AL. (2020); LUDIN ET AL. (2018); ROSSI, HELENO, ET AL. (2020); ABERILLA ET AL. (2020); LAMNATOU ET AL. (2020); MARANGHI ET AL. (2019).

Palavras Chave

Impacto, Energia, Solar

IMPACTO AMBIENTAL DOS PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS: um estudo da literatura com o uso da bibliometria.

INTRODUÇÃO

A implantação da energia solar fotovoltaica (PV) cresceu a um ritmo sem precedentes desde o início dos anos 2000. À medida que o mercado fotovoltaico global cresce, espera-se que o número de painéis fotovoltaicos desativados e o volume de grandes quantidades de resíduos gerados a cada ano aumente até o início da década de 2030. O final de vida de painéis fotovoltaicos apresenta novos desafios ambientais, mas também oportunidades sem precedentes para criar valor e buscar novos caminhos econômicos (IRENA, 2016).

O retorno financeiro é evidenciado em um estudo estratégico de geração distribuída mercado fotovoltaico, feito pela Greener (2022), acrescenta que devido as condições de irradiação as quais estamos submetidos, qualquer estado do brasileiro tem potencial de um retorno de investimento no sistema fotovoltaico de menos de 7 anos. O cálculo considerou a produtividade do local, o custo médio dos sistemas, a tarifa das concessionárias, além disso, o impacto da Lei Complementar (LC) 194 de 2022 determina a aplicação de alíquotas de ICMS pelo piso (17% ou 18%) de combustíveis, energia elétrica, comunicações e transporte coletivo.

A geração global de energia renovável totalizou 3.064 GW no ano 2021, representando 38% de toda a capacidade instalada e no primeiro trimestre de 2022 o Brasil ultrapassou a marca de 10 gigawatts (GW) de capacidade instalada em geração distribuída de micro e pequena escala (eletricidade gerada pelos próprios consumidores), suficiente para abastecer cerca de 5 milhões de unidades residenciais brasileiras, ou cerca de 20 milhões de pessoas, se tornando uma marca expressiva da história da geração distribuída no país, ainda mais quando se considera que há menos de três anos, em junho de 2019, a micro e microgeração atingiu a marca de 1 GW (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022).

PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

Diante do contexto supramencionado, emerge uma crescente preocupação no âmbito mercadológico relacionada ao incremento no emprego de sistemas de geração distribuída, fundamentado nas inúmeras vantagens ambientais e socioeconômicas inerentes a essa tecnologia.

Contudo, esse impulso ascendente inevitavelmente conduzirá à fabricação ampliada de novos painéis fotovoltaicos, o que suscita uma reflexão premente sobre o encerramento do ciclo de vida desses produtos e suas eventuais repercussões na esfera ambiental. A apreensão genuína reside, portanto, no âmbito da adequada destinação dos painéis fotovoltaicos ao final de sua vida útil, atentando-se para a potencialidade de acarretar novos problemas ambientais e saúde humana.

O presente estudo pretende realizar uma abordagem bibliométrica quantitativa sobre a avaliação do ciclo de vida de painéis solares fotovoltaicos, visando entender o panorama da pesquisa nessa área, fornecendo informações úteis para pesquisadores, instituições acadêmicas, formuladores de políticas e empresas envolvidas na indústria solar.

Além disso, almeja-se avaliar a relevância das publicações científicas por meio de métricas bibliométricas, como o número de citações e a distribuição dos estudos em periódicos de impacto, aprofundando o conhecimento científico acerca da temática, contribuindo para o

avanço da gestão e tecnologia ambiental em um contexto de crescente adoção desses sistemas no cenário energético contemporâneo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O artigo em questão aborda, em sua base teórica, as principais correlações entre avaliação do ciclo de vida e energia solar fotovoltaica. Esse estudo se concentra especialmente em autores amplamente citados na área, periódicos com alto fator de impacto e emprega palavras-chave, com o auxílio da bibliometria, para o alcance de seus objetivos. Buscando garantir um levantamento bibliométrico criterioso e representativo, enfatizando a abordagem de trabalhos de autores e periódicos que se mostraram mais diretamente pertinentes ao escopo do estudo, em consonância com o tema de pesquisa delineado.

As mudanças climáticas, os impactos da extração de combustíveis fósseis, o esgotamento dos recursos naturais e a escassez de energia surgiram como os principais problemas ambientais globais que requerem intervenção (BLAYDES ET AL., 2021; LUDIN ET AL., 2021).

Além disso, encontrar soluções de energia renovável para esses desafios provou ser fundamental para um futuro sustentável. De 2009 a 2016, o mercado fotovoltaico global continuou a se expandir, refletindo a tendência positiva do desenvolvimento fotovoltaico. Além disso, 25 países instalaram cumulativamente mais de 265 GW de energia fotovoltaica sob o Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica (PVPS) da IEA (LUDIN ET AL., 2018).

A energia solar tem vantagens notáveis, como fácil desenvolvimento, limpeza, pouco impacto ao meio ambiente, suprimento inesgotável, uso inesgotável, durabilidade e confiabilidade (ABERILLA ET AL., 2020; LAMNATOU ET AL., 2020; MARANGHI ET AL., 2019).

Essas propriedades tornam a energia solar um fator-chave viável para atender à crescente demanda mundial por energia elétrica impulsionada pelo crescimento populacional e pela expansão da infraestrutura (LAMNATOU ET AL., 2020; LUDIN ET AL., 2018).

Lamnato et al. (2020), destaca que, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede não requerem armazenamento em bateria e, além disso, têm a vantagem de conseguir preços de eletricidade mais altos vendendo a eletricidade gerada para a rede.

No entanto, em sistemas fotovoltaicos fora da rede, as baterias desempenham um papel fundamental. Em geral, o uso de armazenamento em bateria em fotovoltaicos residenciais oferece flexibilidade, pois o excesso de energia dos painéis fotovoltaicos pode ser armazenado e fornecido em períodos de baixa ou nula disponibilidade de energia. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de uso próprio estão sendo cada vez mais usados (CAGLE ET AL., 2020; KAZEM ET AL., 2020; LUDIN ET AL., 2018; ROSSI, HELENO, ET AL., 2020).

Uma das principais razões para promoção da energia solar fotovoltaica é que eles podem ajudar a mitigar as mudanças climáticas devido às suas baixas emissões de carbono com base no ciclo de vida, conforme demonstrado por vários estudos de avaliação do ciclo de vida, no entanto, os sistemas fotovoltaicos também têm uma desvantagem principal, ela é intermitente (ABERILLA ET AL., 2020; KAZEM ET AL., 2020; MARANGHI ET AL., 2019; ROSSI, PARISI, ET AL., 2020).

Rossi et al. (2020) e Uçtug & Azapagic (2018), descrevem que os sistemas de captação fotovoltaica não podem gerar eletricidade continuamente, pois a radiação solar pode não estar presente ou nesse nível necessário a qualquer hora do dia, deste modo, é comum o acoplamento de um sistema fotovoltaico com uma bateria é para diminuir a dependência da rede e equilibrar a oferta e a demanda, os sistemas de armazenamento de energia podem ser usados no gerenciamento inteligente de energia para acumular energia de fontes renováveis.

A China tem a maior capacidade fotovoltaica instalada cumulativa, liderando o mercado fotovoltaico global com um aumento de duas vezes de 43,5 GW em 2015 para 78,1 GW em 2016, seguida pelo Japão com 42,8 GW e Alemanha com 41,2 GW em 2016 watts. Outros países, como os Estados Unidos da América (EUA) e a Índia instalaram sistemas fotovoltaicos com mais de 50% de crescimento relatado a partir de 2015 (LUDIN ET AL., 2018).

Países como Itália, Reino Unido, França, Austrália e Espanha, cresceram significativamente e têm capacidade instalada acumulada de 19,3, 11,6, 7,1, 5,9 e 5,4 GW, respectivamente, a partir de 2016 (LUDIN ET AL., 2018).

Apesar desse crescimento significativo, as tecnologias solares fotovoltaicas têm um potencial considerável como fontes de energia renovável para atender à demanda mundial de energia (BLAYDES ET AL., 2021; EXLEY ET AL., 2021; LAMNATOU ET AL., 2022; SONG ET AL., 2021).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para Ludin et al. (2018) e Rossi et al., (2020), é uma abordagem integrada Avaliar e analisar o desempenho ambiental e o consumo energia ao longo do ciclo de vida de um produto, processo ou sistema, geralmente segue "do berço ao túmulo". Ou seja, Extração, transporte e processamento de matérias-primas Materiais, fabricação, distribuição, uso e disposição final.

Maranghi et al. (2019), sugere que o ACV deve ser usado em conjunto com outras ferramentas metodológicas e toxicológicas, podem contribuir adequadamente para a avaliação de todos os impactos ambientais associados à introdução desta tecnologia fotovoltaica no mercado, por outro lado, Lamnatou et al. (2020), ressalta que a vida útil de um sistema de armazenamento de bateria e a substituição da bateria durante o uso podem afetar significativamente o desempenho ambiental do sistema como um todo.

A ACV é um método padronizado adequado para avaliar o desempenho ambiental de um produto, processo ou atividade. Além disso, pode ser gerido como uma análise de sistemas para identificar e quantificar todos os recursos utilizados ao longo do ciclo de vida de um produto, processo, serviço ou cadeia (fluxos de entrada de matérias-primas, energia, água etc.), que podem ser usados para avaliar o consumo, emissões e geração de resíduos potenciais impactos ambientais causados por fluxos de produção (DI FLORIO ET AL., 2021; LAMNATOU ET AL., 2020; LUDIN ET AL., 2018; MARANGHI ET AL., 2019; ROSSI, PARISI, ET AL., 2020).

Ludin et al., (2018) detalham o ciclo de vida do painel fotovoltaico começando com a extração de matérias-primas (berço) e terminando com o descarte ou reciclagem de módulos PV (sepultura).

Durante a fase de produção, as entradas de matéria-prima, fontes de alimentação, fabricação de painéis, sistemas de montagem, cabos, inversores e todos os outros componentes necessários para a geração de energia devem estar contidos nos limites do sistema (LUDIN ET AL., 2018; SONG ET AL., 2021).

Além disso, transporte, construção e instalação, incluindo fundações e estruturas de suporte, devem ser incluídos na fase de construção (LUDIN ET AL., 2018; SONG ET AL., 2021).

Certas peças, como requisitos de energia auxiliar, limpeza do painel, manutenção e reparo e substituição (se houver) devem ser incluídas dentro dos limites do sistema durante a etapa de uso. Finalmente, a reciclagem e a reutilização, o tratamento e o transporte de resíduos devem ser integrados na fase de fim de vida (LUDIN ET AL., 2018; ROSSI, PARISI, ET AL., 2020).

Um estudo de Uçtug e Azapagic (2018), considerou o impacto ambiental do ciclo de vida de um sistema de célula fotovoltaica em escala doméstica na Turquia que integra fotovoltaica policristalina e baterias de íon-lítio. Os impactos nas instalações individuais e no

nível do país foram estimados levando em consideração diferentes partes do país e considerando sua insolação e outras diferenças climáticas.

Em outro estudo de Lamnatou et al., 2019, foi observado que o ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos de silício cristalino inclui diferentes fases. Por exemplo, a etapa de compra de matérias-primas (areia de sílica etc.). A energia é então necessária para fabricar os componentes do módulo/sistema fotovoltaico.

Os sistemas fotovoltaicos incluem ainda o apoio do sistema (suporte estrutural, cablagens, inversores etc.), bem como os insumos relacionados com o transporte e a instalação, com maiores impactos ambientais relacionados com as etapas anteriores à fase operacional. Existem exceções na fase de operação, como substituição de inversores, substituição de componentes danificados, porém em menor escala.

Esta pesquisa se configura como um estudo bibliométrico, método quantitativo e estatístico para medir os índices de produção e disseminação do conhecimento científico, conforme definido por Araújo (2006). A investigação se concentrou na análise e quantificação do comportamento e desenvolvimento de trabalhos presentes na base de dados Scopus.

De acordo com Cobo et al. (2018), o mapeamento científico ou bibliométrico é uma representação espacial que destaca como disciplinas, campos de especialidade, documentos individuais ou autores estão interconectados.

A adoção de métodos de bibliometria possibilitam uma análise objetiva dos resultados, reduzindo a probabilidade de viés tendencioso nas pesquisas de revisão.

Essa abordagem inclui etapas como a recuperação e busca de dados, pré-processamento, extração de redes, normalização, mapeamento, análise e visualização das informações, as quais são interpretadas e moldadas para a obtenção das conclusões.

A pesquisa e a coleta dos dados foram realizadas no mês de maio de 2023 a partir de diferentes fontes secundárias, que foram obtidas a partir da base de dados Scopus. O Scopus é um base de dados que disponibiliza resumos e citações originado em 2004.

Esta base de dados contém métodos para restringir a pesquisa pela data da publicação, nome dos autores, área de estudo, tipo de documento, título da fonte da publicação, palavras-chave, e assim por diante.

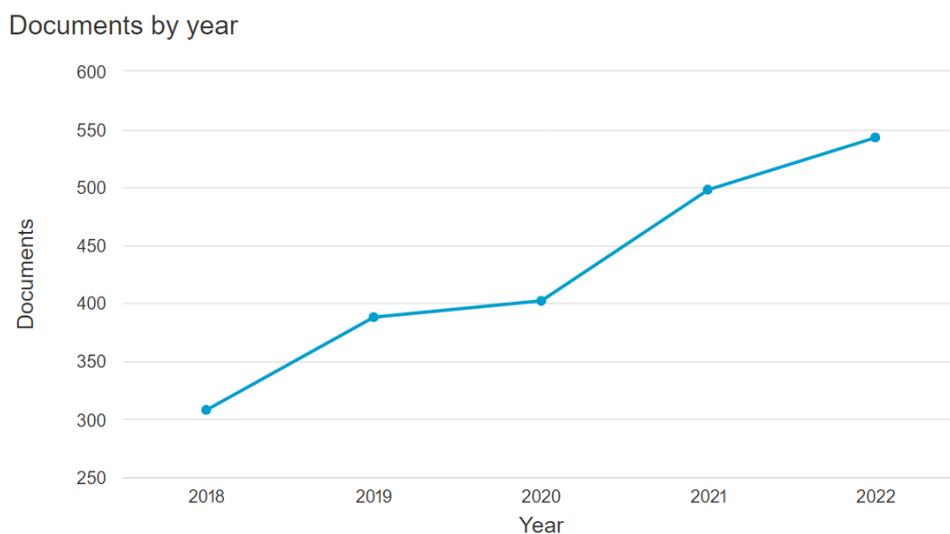
Optou-se pela busca de informações centrada na escolha de palavras-chave, delimitando o período de busca em cinco anos, 2018 a 2022.

A investigação é justificada pelo desejo de observar a recente evolução das palavras-chave relativas à área, a partir de palavras-chave iniciais com base em critérios subjetivos, que são exigidos no conjunto das publicações, no caso "impact" (impacto), "Environmental" (Ambiental), "photovoltaic" (Fotovoltaico), ao todo foram identificados 2.139 resultados de documentos.

Observa-se um aumento notável no número de publicações sobre energia solar fotovoltaica ao longo do período analisado. De acordo com a gráfico 1 apresentada, retrata-se um cenário ascendente, evidenciando um interesse crescente por parte da comunidade acadêmica em explorar e contribuir para o desenvolvimento dessa tecnologia sustentável.

A partir de um número relativamente baixo de publicações no início do período, pode-se constatar uma trajetória ascendente consistente, com um pico notável alcançado nos últimos anos.

Gráfico 1 - Publicações no período de busca 2018-2022 na base



Fonte: Scopus

Esse padrão de crescimento sustentado reflete tanto a importância da energia solar fotovoltaica como uma solução viável e renovável para a crise energética global, quanto o progresso significativo alcançado nas pesquisas e avanços tecnológicos relacionados a essa fonte de energia.

O aumento nas publicações sugere uma maior disseminação de conhecimentos, o compartilhamento de descobertas científicas e a intensificação do diálogo entre especialistas do campo, o que pode levar a novas oportunidades de aprimoramento e inovação no setor da energia solar fotovoltaica.

Além disso, esse crescimento também pode ser atribuído ao crescente reconhecimento das questões ambientais e às políticas públicas incentivadoras da transição energética sustentável. No entanto, é importante ressaltar que esse crescimento quantitativo de publicações também requer um foco contínuo na qualidade das pesquisas, bem como a consideração de questões relacionadas à viabilidade econômica, eficiência e integração da energia solar fotovoltaica no contexto energético global.

Portanto, o gráfico apresentado ilustra claramente a crescente relevância e interesse acadêmico na energia solar fotovoltaica, evidenciando a necessidade contínua de pesquisas e inovações nessa área para alcançar um futuro mais sustentável e renovável.

Após a consulta de documentos relevantes, procedeu-se à importação dos dados bibliográficos para a aplicação de planilha eletrônica. Esta ferramenta auxilia na execução das diversas fases do processo de mapeamento científico, abrangendo desde a obtenção e pré-processamento dos dados até a visualização e interpretação dos resultados.

Além disso, utilizou-se o software Iramuteq (Interface de R para Análises Multidimensionais de Textos e Questionários) foi criado em 2009 por Pierre Ratinaud. É um software livre de código aberto, licenciado sob a GNU GPL (v2), utilizando o ambiente estatístico do software R, que, como outros softwares de código aberto, pode ser alterado e estendido através da linguagem Python (RATINAUD, 2008).

É utilizado para pesquisas em ciências humanas e sociais e utiliza os mesmos algoritmos do software Alceste para análise estatística de texto, porém, além do CHD (Classificação Hierárquica Descendente), contém também outros de análise lexical e interpretação do texto para auxiliar na análise, o qual possibilita a realização de análises estatísticas em corpora textuais, bem como em tabelas que relacionam indivíduos e palavras-chave (RATINAUD, 2008).

Aplicando-se neste arquivo as leis da bibliometria como: a Lei de Lotka e Lei de Price (produtividade científica de autores), a Lei de Bradford (produtividade de periódicos) e a Lei de Zipf (distribuição e a frequência de palavras em textos).

Começa-se com a Lei de Lotka e Lei de Price que verifica a produtividade científica de autores. Para verificar esta lei:

1. Obteve-se os dados na base de dados Scopus (Analyze-Author) com as respectivas produtividades;
2. Usar a ferramenta de Tabela dinâmica na planilha eletrônica para obter as frequências;
3. Verificar os coeficientes da Lei de Lotka e Lei de Price.

Para a Lei de Bradford que verifica a produtividade de periódicos de tal modo que se forem organizados em ordem de produtividade decrescente de artigos sobre um determinado assunto, o conjunto poderá ser dividido em um núcleo de periódicos mais particularmente dedicados ao assunto e vários grupos ou zonas contendo o mesmo número de artigos que o núcleo, então o número de periódicos no núcleo e em zonas sucessivas será proporcional a: $1: n: n^2: n^3: \dots$ (n é chamado multiplicador de Bradford).

Para verificar a lei de Bradford:

1. Foi obtido o arquivo na base de dados Scopus (Analyze-Source), este arquivo contém os periódicos e as quantidades de artigos;
2. Ordenar os periódicos em ordem decrescente de produtividade;
3. Dividir a listagem em três zonas, cada qual contendo o mesmo número de artigos, representado $1/3$ da produção total.
4. Verificar quais são os periódicos mais dedicados ao assunto (núcleo)

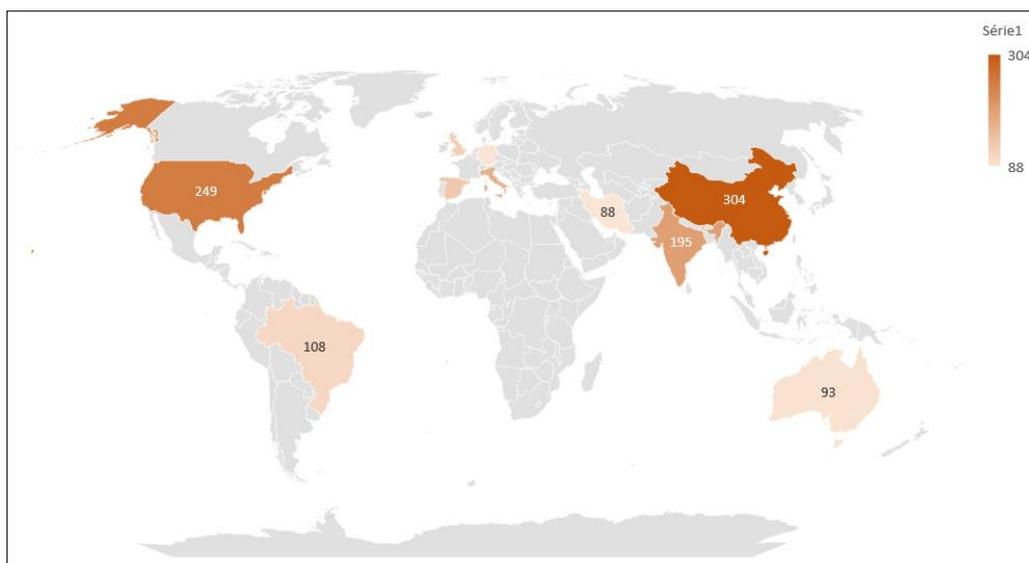
Para a Lei de Zipf que relaciona a frequência de palavras usou-se o software *Iramuteq* onde primeiro se fez a construção do corpus do texto que é o conjunto de unidades de contexto inicial que se pretende analisar, optou-se em analisar os resumos de cada artigo, também se pode fazer uma análise das palavras-chaves colocadas pelos autores.

DISCUSSÃO

A China lidera o número de publicações, com um total de 304 artigos, seguida pelos Estados Unidos, com 249 publicações, e pela Índia, com 195 publicações.

Esses três países demonstram um forte compromisso com a pesquisa e o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica, refletindo seu papel de destaque na transição para fontes de energia renováveis. Conforme a gráfico 2 verifica-se uma distribuição variada de publicações sobre energia solar fotovoltaica entre diferentes países.

Gráfico 2 - Publicações no período de busca 2018-2022 por Países.



Fonte: Scopus

Pode-se observar uma distribuição variada de publicações sobre energia solar fotovoltaica entre diferentes países. Esses três países demonstram um forte compromisso com a pesquisa e o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica, refletindo seu papel de destaque na transição para fontes de energia renováveis.

Em seguida, destacam-se a Itália, com 169 publicações, a Espanha, com 132 publicações, e o Reino Unido, com 122 publicações, indicando o crescente interesse desses países na temática.

Além disso, é relevante notar a presença do Brasil, com 108 publicações, somente no ano de 2022 registrou a maior quantidade de publicações, totalizando 28 documentos ao longo dos doze meses do ano. O ano anterior, 2021, apresentou um número expressivo de publicações, somando 25 documentos. Já no ano de 2020, foram registradas 18 publicações, evidenciando uma tendência ascendente ao longo dos anos. No ano de 2019, ocorreu a publicação de 22 documentos, caracterizando um aumento em relação ao ano anterior, 2018, que contabilizou 15 publicações.

Essa progressão indica um crescente interesse e dedicação da comunidade acadêmica e científica brasileira na abordagem da temática em estudo.

A Austrália, com 93 publicações, a Alemanha, com 90 publicações, e o Irã, com 88 publicações, mostrando o envolvimento de diversas nações em pesquisas relacionadas à energia solar fotovoltaica.

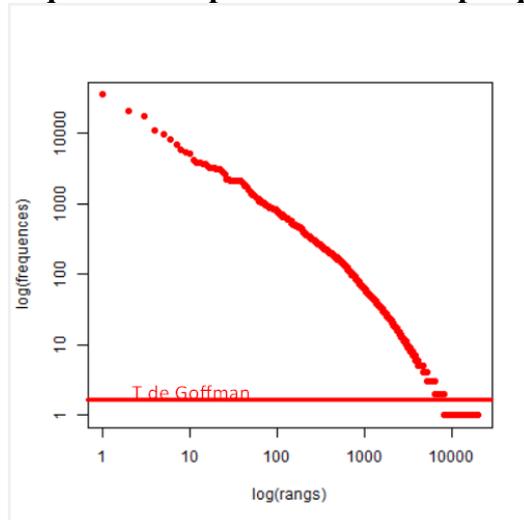
Esses resultados reforçam a importância global atribuída a essa fonte de energia renovável e sustentável, uma vez que os países mencionados estão ampliando seus esforços para diversificar suas matrizes energéticas e mitigar os impactos ambientais causados pela geração de energia convencional. O gráfico reflete, assim, a crescente conscientização sobre a necessidade de soluções energéticas mais limpas e a relevância da energia solar fotovoltaica no contexto global.

Zipf propôs duas leis acerca da sua teoria: a primeira relacionada às palavras de alta frequência, ou seja, o número de palavras multiplicado pela frequência era igual a uma constante e a segunda relacionada às de baixa frequência, que propõe que as palavras de baixa frequência tem a mesma frequência (MOREIRA; SALERNO; TSUNODA, 2020).

Gráfico 3 - Nuvem de Palavras.

Essa técnica é útil para investigar padrões de mudanças na distribuição de palavras ao longo de um texto. O Ponto T é identificado no gráfico como o ponto de inflexão, onde a curva começa a subir mais acentuadamente. Esse ponto representa a transição das palavras de baixa frequência para as palavras de alta frequência no texto.

Gráfico 4 - Frequência das palavras Lei de Zipf e ponto T de Goffman.



Fonte: Scopus

Observa-se que a maioria dos artigos é produzida por um pequeno número de autores, enquanto muitos autores contribuem com uma proporção menor de publicações. Essa desigualdade na produção científica é um fenômeno recorrente em diversas áreas do conhecimento e pode ser analisada por meio desses dados. A tabela 1 apresenta dados relacionados à distribuição do número de autores e ao percentual do número de artigos publicados. Os resultados refletem a relação entre o número de autores e o número de publicações em um determinado contexto acadêmico.

No topo da distribuição, temos 412 autores, que correspondem a 29,18% do total, mas são responsáveis por apenas um artigo publicado, representando 1% do total. Isso destaca a presença de uma parcela considerável de autores que contribuem com uma quantidade relativamente baixa de publicações, indicando uma possível assimetria na produtividade científica.

Tabela 1 – Produtividade Científica de Autores.

Nº Autores	% Autores	Nº Artigos Publicados	% Artigos Publicados	Lei de Lotka $\frac{1}{(n^2)}$	Lei de Price $\frac{1}{(n^3)}$
412	29,18%	1	1,82%	-	-
676	47,88%	2	3,64%	353,00	176,5
189	13,39%	3	5,45%	156,89	52,3
60	4,25%	4	7,27%	88,25	22,1
35	2,48%	5	9,09%	56,48	11,3
18	1,27%	6	10,91%	39,22	6,5
9	0,64%	7	12,73%	28,82	4,1
9	0,64%	8	14,55%	22,06	2,8
1	0,07%	9	16,36%	17,43	1,9
3	0,21%	10	18,18%	14,12	1,4
1412	100%	55	100%	-	-

Fonte: produzido pelo Autor.

Por outro lado, na parte inferior da distribuição, observa-se uma maior quantidade de autores com um número crescente de artigos publicados. Por exemplo, 676 autores representam 47,88% do total e contribuem com dois artigos, representando 2% do total. Esse padrão sugere que um grupo seleto de autores concentra uma parcela significativa das publicações.

É importante ressaltar que a desigualdade na produção científica não é incomum e pode ser influenciada por diversos fatores, como recursos disponíveis, oportunidades de colaboração, acesso a financiamento e reconhecimento acadêmico.

Cabe ressaltar que a quantidade de publicações pode ser um indicativo da dedicação, engajamento e contribuição desses autores para o avanço do conhecimento no campo de estudo em questão. Contudo, a qualidade e a relevância das publicações também devem ser consideradas em uma análise mais abrangente. Além disso, é importante mencionar que este ranking é baseado em dados específicos disponíveis até a data do levantamento, e novas publicações ou atualizações podem alterar a classificação ao longo do tempo.

A coluna "Lei de Lotka ($\frac{1}{n^2}$)" apresenta os resultados obtidos aplicando a fórmula ($\frac{1}{n^2}$), em que "n" representa o número de autores. Essa fórmula é derivada da Lei de Lotka e estima a quantidade esperada de publicações de acordo com o número de autores. Por exemplo, para o valor de "n" igual a 2, é calculado o valor de 353,00. Isso indica que, de acordo com a Lei de Lotka, espera-se que um grupo de 676 autores produza aproximadamente 353 artigos.

A coluna "Lei de Price ($\frac{1}{n^3}$)" apresenta os resultados obtidos aplicando a fórmula ($\frac{1}{n^3}$), onde "n" representa o número de autores. Essa fórmula é derivada da Lei de Price e busca estimar a frequência de publicação com base no número de autores. Por exemplo, para o valor de "n" igual a 2, é calculado o valor de 176,5. Isso sugere que, de acordo com a Lei de Price, é esperado que um grupo de 676 autores tenha uma frequência de publicação de aproximadamente 176,5 artigos.

Esses cálculos realizados com base nas leis empíricas fornecem uma perspectiva sobre a distribuição esperada de publicações em relação ao número de autores. Eles evidenciam a tendência de uma produção desigual de artigos científicos, com um número reduzido de autores contribuindo com a maioria das publicações. Além disso, essas leis também sugerem que, à medida que o número de autores aumenta, a frequência de publicação por autor diminui exponencialmente.

Os principais autores que se destacaram em termos de publicações acadêmicas sobre o tema específico em questão; Wang Y., com um impressionante número de 20 publicações, seguido por Li J., que possui 15 publicações em seu nome. Wang Z. e Zhang J. ocupam a terceira posição, ambos com 14 publicações. Em seguida, temos Li Y. e Wang J., ambos com 12 publicações, seguidos por Li Z., Liu J. e Wang S., cada um com 11 publicações. Kumar A. e Li X. fecham o ranking com 10 publicações cada.

Os dados mostram que a área de energia registrou o maior número de publicações, totalizando 1.226, seguida de perto pela área de engenharia, com 1.066 publicações. Em terceiro lugar, encontra-se a ciência ambiental, com 730 publicações, seguida pela ciência da computação, com 322 publicações. A área de matemática também demonstrou uma contribuição significativa, com 283 publicações, enquanto a ciência de materiais e as ciências sociais apresentaram 267 e 205 publicações, respectivamente.

O FWCI (Fator de Impacto de Citação Ponderado por Campo) é uma métrica utilizada para avaliar o quão bem um determinado documento é citado em comparação com outros documentos similares.

Um valor FWCI superior a 1,00 indica que o documento em questão é mais citado do que o esperado, considerando a média de citações para documentos semelhantes. Essa métrica

leva em consideração alguns elementos importantes, tais como o ano de publicação do documento, o tipo de documento em si e as disciplinas associadas à fonte onde foi publicado.

A obtenção do FWCI é realizada ao calcular a proporção das citações recebidas pelo documento ao número médio de citações recebidas por todos os documentos similares, em um período de três anos. Um aspecto relevante do FWCI é que cada disciplina contribui de forma igual para a métrica, o que permite eliminar possíveis discrepâncias no comportamento de citação entre diferentes pesquisadores.

A tabela apresenta os artigos mais citados sobre a temática analisada no período de 2018 a 2022, juntamente com informações relevantes sobre cada artigo. O FWCI (Fator de Impacto de Citação Ponderado por Campo) é fornecido para demonstrar a relevância e a influência dos documentos em relação a outros trabalhos similares.

Tabela 2 – Periódicos com maiores números de publicações.

Título do Documento	Autores	Ano de publicação	Citações	FWCI
Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries	Chen, Mengyuan Ma, Xiaotu Chen, Bin Arsenault, Renata Karlson, Peter Simon, Nakia Wang, Yan	2019	401	6,08
Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions	Shahsavari, Amir Akbari, Morteza	2018	401	2,91
Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – A comprehensive review	Ali, Hafiz Muhammad	2022	310	5,8
Environmental impacts of solar energy systems: A review	Rabaia, Malek Kamal Hussien Abdelkareem, Mohammad Ali Sayed, Enas Taha Elsaid, Khaled Chae, Kyu-Jung Wilberforce, Tabbi Olabi A.G.	2021	288	23,13
Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources	Adefarati T. Bansal R.C.	2019	260	15,53

Fonte: Scopus.

O primeiro artigo, intitulado "Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries," foi publicado em 2019 e possui 401 citações, resultando em um FWCI de 6,08. Os autores envolvidos no estudo são Chen Mengyuan, Ma Xiaotu, Chen Bin, Arsenault Renata, Karlson Peter, Simon Nakia e Wang Yan. O elevado FWCI indica que o artigo teve um impacto significativo e atraiu um número considerável de citações em comparação com outros documentos similares durante o período analisado.

O segundo artigo, intitulado "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions," foi publicado em 2018 e registrou 401 citações, apresentando um FWCI de 2,91. Os autores Shahsavari Amir e Akbari Morteza abordaram a relevância da energia solar para países em desenvolvimento, focando na redução de emissões

relacionadas à energia. Embora tenha recebido um número considerável de citações, o FWCI sugere que, em comparação com o primeiro artigo, sua taxa de citação não foi tão alta.

O terceiro artigo, intitulado "Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – A comprehensive review," de autoria de Ali Hafiz Muhammad, foi publicado em 2022, acumulando 310 citações e atingindo um FWCI de 5,8. Esse artigo descreve avanços recentes na refrigeração de painéis fotovoltaicos (PV) e no aprimoramento da eficiência, com a integração de materiais de mudança de fase. O FWCI indica que o trabalho recebeu um número significativo de citações em comparação com outros artigos similares em um período relativamente curto após sua publicação.

O quarto artigo, intitulado "Environmental impacts of solar energy systems: A review," publicado em 2021, é de autoria de Rabaia Malek Kamal Hussien, Abdelkareem Mohammad Ali, Sayed Enas Taha, Elsaid Khaled, Chae Kyu-Jung, Wilberforce Tabbi e Olabi A.G. Esse trabalho acumulou 288 citações, alcançando um impressionante FWCI de 23,13. A análise ambiental de sistemas de energia solar foi abordada de forma abrangente no artigo, e sua alta taxa de citação reflete sua significativa relevância e impacto no campo de pesquisa.

Por fim, o quinto artigo, intitulado "Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources," foi publicado em 2019 e possui 260 citações, obtendo um FWCI de 15,53. A pesquisa, de autoria de Adefarati T. e Bansal R.C., abordou a análise de confiabilidade, aspectos econômicos e impactos ambientais de um sistema de micro redes na presença de recursos de energia renovável. O FWCI elevado sugere que esse trabalho teve um impacto substancial e foi amplamente citado em comparação com outros artigos similares durante o período analisado.

Em geral, os dados apresentados na tabela refletem a relevância e a influência desses artigos sobre a temática estudada, demonstrando como cada trabalho foi citado em relação à média de documentos semelhantes. Essa análise fornece informações valiosas sobre o impacto da pesquisa no campo de estudo e pode ser usada para avaliar a importância e o alcance das contribuições de cada artigo no período de 2018 a 2022.

O Fator de Impacto mede o número médio de citações recebidas em um determinado ano por artigos publicados na revista durante os dois anos anteriores e o CiteScore mede a média de citações recebidas por documento revisado por pares publicado neste título. Os valores do CiteScore são baseados em contagens de citações em um intervalo de quatro para documentos revisados por pares (artigos, revisões, documentos de conferências, documentos de dados e capítulos de livros) publicados nos mesmos quatro anos civis, divididos pelo número desses documentos nesses mesmos quatro anos.

No topo do ranking, encontra-se o periódico "Energies" com um total de 108 publicações. Esse periódico demonstra uma liderança significativa em termos de produção científica na área em análise, refletindo sua importância e relevância na comunidade acadêmica.

Em seguida, temos o "Journal of Cleaner Production" com 80 publicações e o "Sustainability (Switzerland)" com 78 publicações. Ambos os periódicos desempenham um papel importante na divulgação de pesquisas relacionadas à produção limpa e à sustentabilidade, evidenciando a preocupação com a temática ambiental na área de estudo.

Tabela 3 – Os periódicos com maiores números de publicações.

Título da Fonte	Quantidade de publicações	Ano de Fundação	Fator de Impacto atual	CiteScore
Energies	108	2008	3,2	5,5
Journal of Cleaner Production	80	1993	11,1	18,5
Sustainability (Switzerland)	78	2009	3,9	5,8

Renewable Energy	53	1991	8,7	16,1
Solar Energy	51	1954	6,7	13,1

Fonte: Scopus.

Outros periódicos de destaque incluem "Renewable Energy" com 53 publicações e "Solar Energy" com 51 publicações. Esses periódicos têm um papel fundamental na disseminação de conhecimentos sobre energia renovável, energia solar e aplicação de energia em diversos setores.

Esses periódicos têm sido plataformas importantes para a publicação de pesquisas relacionadas à temática abordada, proporcionando uma base sólida para a troca de conhecimentos, o avanço científico e o debate acadêmico.

A Lei de Bradford é um princípio bibliométrico que descreve a distribuição das publicações científicas em diferentes zonas de concentração. A tabela fornecida apresenta a aplicação da Lei de Bradford para classificar periódicos com base no número de publicações sobre um determinado assunto, dividindo-os em três zonas: Zona 1, Zona 2 e Zona 3.

Tabela 4 – Zonas dos periódicos com maiores números de publicações.

Zonas	Título da Fonte	Publicações
Zona 1	Energies	108
	Journal of Cleaner Production	80
	Sustainability (Switzerland)	78
	Renewable Energy	53
	Solar Energy	51
	Applied Energy	46
	Renewable and Sustainable Energy Reviews	46
	Energy	45
	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	41
	Science of the Total Environment	35
	Energy Conversion and Management	32
	Sustainable Energy Technologies and Assessments	31
	Energy Reports	22
	Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists	18
	Energy Policy	18
Zona 2	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	17
	Energy and Buildings	16
	Environmental Science and Pollution Research	16
	Progress in Photovoltaics: Research and Applications	16
	E3S Web of Conferences	15
	ECOS 2019 - Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems	15
	Journal of Environmental Management	14
	IEEE Access	13
	Journal of Energy Storage	13
	ECOS 2018 - Proceedings of the 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems	12
	ECOS 2020 - Proceedings of the 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems	12

	Resources, Conservation and Recycling	12
	Advances in Intelligent Systems and Computing	11

Fonte: Scopus.

A Zona 1 representa a zona de maior concentração, incluindo os periódicos que mais publicaram sobre o assunto em questão. Com um total de 721 publicações, essa zona possui a maior quantidade de artigos, o que corresponde a 34% do total de publicações. Essa zona concentra os principais periódicos na área de estudo, que têm um papel de destaque na disseminação do conhecimento científico sobre o tema.

As Zonas 2 e 3 são as zonas subsequentes em termos de concentração de publicações. Ambas apresentam números de publicações semelhantes, com 713 e 705 artigos, respectivamente, representando aproximadamente 33% do total cada uma. Essas zonas incluem periódicos que, embora publiquem menos que os da Zona 1, ainda contribuem significativamente para o corpo de conhecimento na área em análise.

A aplicação da Lei de Bradford permite identificar a distribuição desigual de publicações em diferentes periódicos e ajuda a identificar os principais veículos de comunicação científica na área de estudo. A Zona 1 representa os periódicos de maior relevância, enquanto as Zonas 2 e 3 incluem periódicos de importância progressivamente menor. Isso reflete a estrutura hierárquica da publicação científica, onde alguns periódicos têm um impacto e alcance maiores do que outros.

CONCLUSÃO

Diante da análise bibliométrica realizada, fica evidente a crescente preocupação no âmbito mercadológico em relação ao emprego de sistemas de geração distribuída, particularmente os painéis solares fotovoltaicos, devido às suas inúmeras vantagens ambientais e socioeconômicas. Contudo, esse aumento na utilização desses sistemas inevitavelmente levanta questões sobre o encerramento adequado do ciclo de vida dos painéis, considerando os potenciais impactos ambientais e na saúde humana.

A análise dos dados bibliométricos revela um notável aumento no número de publicações sobre energia solar fotovoltaica ao longo do período estudado. Esse cenário ascendente denota o crescente interesse da comunidade acadêmica em explorar e contribuir para o desenvolvimento dessa tecnologia sustentável. No entanto, ressalta-se a importância de manter o foco na qualidade das pesquisas e considerar questões relacionadas à viabilidade econômica, eficiência e integração da energia solar fotovoltaica no contexto energético global.

Os resultados também indicam uma produção desigual de artigos científicos, com um número reduzido de autores responsáveis pela maioria das publicações, de acordo com as leis empíricas utilizadas. Essa constatação reforça a necessidade de incentivar e fomentar a pesquisa colaborativa e a interdisciplinaridade, buscando uma maior diversidade e amplitude de estudos na área de impacto ambiental dos painéis solares fotovoltaicos. Em suma, a análise bibliométrica revela a importância crescente da energia solar fotovoltaica no âmbito acadêmico e no contexto mercadológico, destacando a necessidade contínua de avanços científicos, inovações tecnológicas e práticas sustentáveis para garantir um futuro mais ambientalmente responsável e renovável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aberilla, J. M., Gallego-Schmid, A., Stamford, L., & Azapagic, A. (2020). Design and environmental sustainability assessment of small-scale off-grid energy systems for remote rural communities. *Applied Energy*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114004>.
- ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, 12, n. 1, p. 11-32, 12/10 2006.
- Blaydes, H., Potts, S. G., Whyatt, J. D., & Armstrong, A. (2021). Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 145). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>.
- Cagle, A. E., Armstrong, A., Exley, G., Grodsky, S. M., Macknick, J., Sherwin, J., & Hernandez, R. R. (2020). The land sparing, water surface use efficiency, and water surface transformation of floating photovoltaic solar energy installations. *Sustainability (Switzerland)*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/su12198154>
- COBO, M. J.; JÜRGENS, B.; HERRERO-SOLANA, V.; MARTÍNEZ, M. A. *et al.* Industry 4.0: a perspective based on bibliometric analysis. *Procedia Computer Science*, 139, p. 364-371, 2018/01/01/ 2018.
- Di Florio, G., Macchi, E. G., Mongibello, L., Baratto, M. C., Basosi, R., Busi, E., Caliano, M., Cigolotti, V., Testi, M., & Trini, M. (2021). Comparative life cycle assessment of two different SOFC-based cogeneration systems with thermal energy storage integrated into a single-family house nanogrid. *Applied Energy*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116378>
- Exley, G., Armstrong, A., Page, T., & Jones, I. D. (2021). Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. *Solar Energy*, 219, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.076>
- GREENER. Estudo Estratégico. *In: Geração Distribuída 2022 | Mercado Fotovoltaico 1º Semestre*. São Paulo, 1 ago. 2022. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-1-semester/>. Acesso em: 7 nov. 2022.
- IRENA, Agência Internacional de Energia Renovável. Publications: 2016. *In: End of life management Solar Photovoltaic Panels*. [S. l.], 1 jun. 2016. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>. Acesso em: 11 nov. 2022.
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., & Sopian, K. (2020). A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 276). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>
- Lamnatou, C., Chemisana, D., & Cristofari, C. (2022). Smart grids and smart technologies in relation to photovoltaics, storage systems, buildings and the environment. In *Renewable Energy* (Vol. 185, pp. 1376–1391). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.019>
- Lamnatou, C., Notton, G., Chemisana, D., & Cristofari, C. (2020). Storage systems for building-integrated photovoltaic (BIPV) and building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) installations: Environmental profile and other aspects. In *Science of the Total Environment* (Vol. 699). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134269>

Lamnatou, C., Smyth, M., & Chemisana, D. (2019). Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT): LCA of a façade-integrated prototype and issues about human health, ecosystems, resources. *Science of the Total Environment*, 660, 1576–1592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.461>

Ludin, N. A., Affandi, N. A. A., Purvis-Roberts, K., Ahmad, A., Ibrahim, M. A., Sopian, K., & Jusoh, S. (2021). Environmental impact and levelised cost of energy analysis of solar photovoltaic systems in selected asia pacific region: A cradle-to-grave approach. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su13010396>

Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Asri Mat Teridi, M., Sepeai, S., Zaharim, A., & Sopian, K. (2018). Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 96, pp. 11–28). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.048>

Maranghi, S., Parisi, M. L., Basosi, R., & Sinicropi, A. (2019). Environmental profile of the manufacturing process of perovskite photovoltaics: Harmonization of life cycle assessment studies. *Energies*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/en12193746>

Ministério De Minas E Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Notícias: 2022. *In: Brasil ultrapassa marca de 10 GW em micro e minigeração distribuída: Atuação da ANEEL possibilitou avanço da geração distribuída no país.* 1. [S. l.], 31 mar. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-ultrapassa-marca-de-10-gw-em-micro-e-minigeracao-distribuida>. Acesso em: 9 ago. 2022.

MOREIRA, P. S. D. C.; SALERNO, B. N.; TSUNODA, D. F. Internet das coisas e aprendizado de máquina na área da saúde: uma análise bibliométrica da produção científica de 2009 a 2019. *Revista Eletrônica de Comunicação, Informação e Inovação em Saúde*, 14, n. 1, 03/31 2020.

RATINAUD, P. Iramuteq: Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires. Un logiciel libre construit avec des logiciels libres.. *In: Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires. Un logiciel libre construit avec des logiciels libres.* [S. l.], 1 jan. 2008. Disponível em: <http://www.iramuteq.org/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

Rossi, F., Heleno, M., Basosi, R., & Sinicropi, A. (2020). Environmental and economic optima of solar home systems design: A combined LCA and LCC approach. *Science of the Total Environment*, 744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140569>

Rossi, F., Parisi, M. L., Maranghi, S., Basosi, R., & Sinicropi, A. (2020). Environmental analysis of a nano-grid: A Life Cycle Assessment. *Science of the Total Environment*, 700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134814>

Song, Z., Liu, J., & Yang, H. (2021). Air pollution and soiling implications for solar photovoltaic power generation: A comprehensive review. *Applied Energy*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117247>

Üçtuğ, F. G., & Azapagic, A. (2018). Environmental impacts of small-scale hybrid energy systems: Coupling solar photovoltaics and lithium-ion batteries. *Science of the Total Environment*, 643, 1579–1589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.29>