



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)
CENTRO DE GESTÃO E NEGÓCIOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO ORGANIZACIONAL

ÁLVARO GUILHERME ROCHA

**DIVERSIFICAÇÃO DAS FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NA
MATRIZ ENERGÉTICA DE UM PAÍS EM DESENVOLVIMENTO: ESTUDO DE
CASO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL**

CATALÃO (GO)

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO

CENTRO DE GESTÃO E NEGÓCIOS

Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, número 1120, - Bairro Setor Universitário, Catalão/GO, CEP 75704-020
Telefone: - - <https://www.ufcat.edu.br>

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA)

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E DISSERTAÇÕES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Catalão (UFCAT) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFCAT), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFCAT é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o(a) autor(a) e o(a) orientador(a) Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação ou Tese?

Dissertação

2. Nome completo do autor: Álvaro Guilherme Rocha

Nome completo do(a) orientador(a): André Barra Neto

3. Título do trabalho

Título: DIVERSIFICAÇÃO DAS FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA DE UM PAÍS EM DESENVOLVIMENTO: ESTUDO DE CASO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento: [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs.: Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor



Documento assinado eletronicamente por **Álvaro Guilherme Rocha, Usuário Externo**, em 05/07/2024, às 14:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDRE BARRA NETO, Orientador(a)**, em 08/07/2024, às 09:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0086015** e o código CRC **68B5DE1C**.

ÁLVARO GUILHERME ROCHA

**DIVERSIFICAÇÃO DAS FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NA
MATRIZ ENERGÉTICA DE UM PAÍS EM DESENVOLVIMENTO: ESTUDO DE
CASO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional, do Centro de Gestão e Negócios da Universidade Federal de Catalão, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Gestão Organizacional.

Área de Concentração: Gestão Organizacional.

Linha de Pesquisa: Inovação, Desenvolvimento e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. André Barra Neto

CATALÃO (GO)

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Rocha, Álvaro Guilherme
DIVERSIFICAÇÃO DAS FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA
RENOVÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA DE UM PAÍS EM
DESENVOLVIMENTO: ESTUDO DE CASO DA ENERGIA
FOTOVOLTAICA NO BRASIL / Álvaro Guilherme Rocha. - 2024.
96, XCVI f.

Orientador: Prof. Dr. André Barra Neto.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão, Centro
de Gestão e Negócios, Catalão, Programa de Pós-Graduação em
Gestão Organizacional, Catalão, 2024.

Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. energia fotovoltaica. 2. políticas públicas. 3. segurança
alimentar. 4. economia circular. 5. Brasil. I. Neto, André Barra, orient.
II. Título.

CDU 005

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **002/2024** da sessão de Defesa de Dissertação de **Álvaro Guilherme Rocha**, que confere o título de Mestre em Gestão Organizacional, na área de concentração em Gestão Organizacional.

Aos **vinte e nove** dias do mês de **fevereiro** do ano de **dois mil e vinte e quatro**, a partir das **dezessete** horas, à distância, via webconferência, realizou-se a sessão pública de **Defesa** de Dissertação intitulada **“DIVERSIFICAÇÃO DAS FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA DE UM PAÍS EM DESENVOLVIMENTO: ESTUDO DE CASO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL”**. Os trabalhos foram instalados pelo (a) Orientador (a), **Professor Doutor André Barra Neto** (CGEN/UFCAT) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Professor Doutor Bruno Garcia de Oliveira** (CGEN/UFCAT), membro titular externo, **Professor Doutor José Eduardo Ferreira Lopes** (Universidade Federal de Uberlândia), membro titular externo e **Doutora Luciana Carvalho** (Universidade Federal de Uberlândia). A participação de todos os membros da banca ocorreu via webconferência. Durante a arguição, os membros da banca **não** fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o (a) candidato (a) **aprovado (a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo (a) **Professor Doutor André Barra Neto**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e nove** dias do mês de **fevereiro** do ano de **dois mil e vinte e quatro**.



Documento assinado eletronicamente por **ANDRE BARRA NETO, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/02/2024, às 19:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **BRUNO GARCIA DE OLIVEIRA, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/03/2024, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Profa Dra Luciana Carvalho registrado(a) civilmente como Luciana Carvalho, Usuário Externo**, em 01/03/2024, às 11:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Eduardo Ferreira Lopes, Usuário Externo**, em 01/03/2024, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0043432** e o código CRC **13AE763A**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a Deus, pela oportunidade e pelas experiências obtidas durante os dois anos dedicados ao Mestrado Profissional em Gestão Organizacional, na Universidade Federal de Catalão. Esse período representou uma jornada repleta de desafios, alegrias e novas experiências no contexto acadêmico.

O crescimento experimentado ao longo desta jornada contribuiu de maneira significativa para a consolidação de mais um passo em direção ao meu sonho de tornar-me um pesquisador acadêmico. Cada desafio superado e cada conquista alcançada fortaleceram o meu compromisso com a excelência acadêmica e reforçaram a minha determinação em contribuir para o desenvolvimento e a disseminação do conhecimento.

À minha amada esposa, Camila Barbosa, não tenho palavras suficientes para agradecer pela sua paciência, compreensão e apoio inabalável durante os desafios e sucessos que este mestrado trouxe.

Aos meus filhos pequenos, Arthur e João Guilherme, expresso a minha profunda gratidão por serem não apenas a minha fonte constante de inspiração, mas também pela imensa alegria que trazem aos meus dias. Vocês são a razão por trás de cada passo que dou e é para vocês que dedico cada conquista alcançada nesta jornada acadêmica.

Aos meus queridos pais, Marta e Baltasar, e ao meu irmão, Victor, agradeço por compartilharem não apenas o meu caminho, mas por também oferecerem valiosas contribuições e por serem fontes inestimáveis de estímulo.

Agradeço a todos os professores do PPGGO e colegas de turma que compartilharam esta jornada comigo. As suas valiosas contribuições ao longo desses dois anos foram fundamentais para a construção da presente dissertação e para a conclusão bem-sucedida do mestrado.

De forma especial, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. André Barra Neto, ao qual expresso a minha profunda gratidão. Cada conselho e feedback valioso não só aprimoraram a qualidade deste trabalho, mas também contribuíram para o meu crescimento como pesquisador e profissional.

Aos professores Dr. Bruno Garcia de Oliveira, Dr. José Eduardo Ferreira Lopes e Dra. Luciana Carvalho, agradeço pela oportunidade de receber valiosos insights e pela contribuição significativa na qualidade desta dissertação. As suas análises críticas foram fundamentais para o refinamento do trabalho.

“O dia em que descobriremos exatamente o que é a eletricidade, isso irá marcar um evento provavelmente maior, mais importante que qualquer outro na História da Humanidade. Então, será apenas uma questão de tempo para que o Homem consiga ligar suas máquinas diretamente à própria natureza”.

(Tesla, 1926)

RESUMO

O objetivo geral deste estudo foi aprofundar a compreensão dos mecanismos que impulsionam o crescimento da energia fotovoltaica no Brasil, considerando os seus possíveis impactos na formulação de políticas públicas, na geração de alimentos e no desenvolvimento da economia circular. A pesquisa buscou explorar não apenas as dinâmicas que promoviam o avanço dessa fonte de energia, mas também entender de maneira abrangente as implicações resultantes desse crescimento em diversos aspectos. Este estudo abordou dinâmicas cruciais em três áreas. Primeiramente, avaliou-se o papel das instituições públicas na redução de emissões por sistemas fotovoltaicos. Uma revisão da literatura analisou políticas globais de energia fotovoltaica, contrastando-as com a Agenda Ambiental na Administração Pública brasileira (A3P). Os resultados demonstram baixa adesão ao programa ambiental, com apenas 3% das instituições públicas que possuem sistemas fotovoltaicos. No entanto, os sistemas existentes evitaram anualmente a emissão de 17.943 toneladas de CO₂, destacando a necessidade de políticas públicas centralizadas e de longo prazo para uma transição sustentável. Em seguida, investigou-se a introdução de sistemas fotovoltaicos em áreas agrícolas. A revisão de 4.741 artigos evidenciou a ausência de diretrizes para usinas fotovoltaicas em zonas agrícolas. O estudo visa formular políticas que promovam a integração sustentável dessas tecnologias, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do agronegócio. Por fim, projetou-se a quantidade de resíduos fotovoltaicos no Brasil para o período de 2034 a 2065. A projeção, fundamentada na expansão da energia fotovoltaica até 2040, indicou a urgência de um sistema eficaz para tratar 12.9 milhões de toneladas de resíduos, principalmente no centro-sul, propondo práticas de economia circular. Em síntese, os estudos abordados revelam uma análise profunda sobre o crescimento e os impactos da energia fotovoltaica no contexto brasileiro, destacando uma série de questões interligadas, que vão desde a eficácia das políticas públicas até a gestão sustentável dos resíduos associados a essa fonte de energia. Essa abordagem integrada não apenas enriquece o debate sobre a sustentabilidade da energia fotovoltaica no Brasil, mas também aponta para direções cruciais para o seu crescimento sustentável. Outra contribuição é que a metodologia desenvolvida pode servir como um modelo replicável para estudos similares envolvendo outras fontes de energias renováveis, ampliando o escopo de análise e disponibilizando conhecimentos valiosos para políticas públicas e práticas industriais em nível global. Estudos conduzidos em regiões específicas podem trazer dados ainda mais expressivos, considerando as nuances locais e as particularidades socioeconômicas de diferentes áreas do país. Para a academia, esses estudos fornecem uma base sólida para pesquisas adicionais que explorem mais a fundo as implicações sociais, econômicas e ambientais da energia solar na sociedade brasileira. Investigar os impactos e as oportunidades emergentes da crescente adoção da energia solar pode contribuir para a formulação de políticas e práticas mais eficazes e sustentáveis, promovendo, assim, um desenvolvimento mais equitativo e ambientalmente consciente. Adicionalmente, a partir do estudo, foi desenvolvido um produto tecnológico, que permite o cálculo da quantidade de gás carbônico evitado pelos sistemas fotovoltaicos, além de realizar projeções dos resíduos fotovoltaicos futuros, fornecendo ferramentas essenciais para a gestão e o monitoramento contínuos desses sistemas.

Palavras-chave: energia fotovoltaica; políticas públicas; segurança alimentar; economia circular; Brasil.

ABSTRACT

The overall objective of this study was to deepen the understanding of the mechanisms driving the growth of photovoltaic energy in Brazil, considering its potential impacts on public policy formulation, food generation, and the development of the circular economy. The research aimed to explore not only the dynamics promoting the advancement of this energy source but also to comprehensively understand the resulting implications of this growth across various aspects. This study addressed crucial dynamics in three areas. Firstly, the role of public institutions in reducing emissions from photovoltaic systems was evaluated. A literature review analyzed global photovoltaic energy policies, contrasting them with the Brazilian Public Administration Environmental Agenda (A3P). The results demonstrate low adherence to the environmental program, with only 3% of public institutions having photovoltaic systems. However, existing systems annually avoided emitting 17,943 tons of CO₂, highlighting the need for centralized, long-term public policies for a sustainable transition. Secondly, the introduction of photovoltaic systems in agricultural areas was investigated. The review of 4,741 articles revealed the absence of guidelines for photovoltaic plants in agricultural zones. The study aims to formulate policies promoting the sustainable integration of these technologies, contributing to the sustainable development of agribusiness. Lastly, the quantity of photovoltaic waste in Brazil was projected for the period from 2034 to 2065. The projection, based on the expansion of photovoltaic energy until 2040, indicated the urgency of an effective system to handle 12.9 million tons of waste, mainly in the central-southern region, proposing circular economy practices. In summary, the studies conducted reveal a thorough analysis of the growth and impacts of photovoltaic energy in the Brazilian context, highlighting a series of interconnected issues ranging from the effectiveness of public policies to the sustainable management of associated waste. This integrated approach not only enriches the debate on the sustainability of photovoltaic energy in Brazil but also points to crucial directions for its sustainable growth. Another contribution is that the developed methodology can serve as a replicable model for similar studies involving other renewable energy sources, expanding the scope of analysis and providing valuable insights for global public policies and industrial practices. Studies conducted in specific regions can bring even more significant data, considering local nuances and socio-economic particularities of different areas of the country. For academia, these studies provide a solid foundation for further research exploring the social, economic, and environmental implications of solar energy in Brazilian society. Investigating the impacts and emerging opportunities of the growing adoption of solar energy can contribute to the formulation of more effective and sustainable policies and practices, thus promoting more equitable and environmentally conscious development. Additionally, a technological product has been developed from the study, allowing the calculation of the amount of carbon dioxide avoided by photovoltaic systems, as well as projections of future photovoltaic waste, providing essential tools for the continuous management and monitoring of these systems.

Keywords: photovoltaic energy, public policies, food security, circular economy, Brazil.

LISTA DE GRÁFICOS - CAPÍTULO 02

Gráfico 1 - Representação geográfica tCO2 evitados pelas instituições públicas.....	35
---	----

LISTA DE QUADROS - CAPÍTULO 02

Quadro 1 – Metas ODS 7 e situação do Brasil.....	24
--	----

LISTA DE TABELAS - CAPÍTULO 02

Tabela 1 – Descrição dos Eixos Temáticos da A3P e conexão com os ODS.....	25
Tabela 2 – Crescimento da Geração Distribuída - série histórica - 2012 a 2022	29
Tabela 3 – Filtros da pesquisa ANEEL	31
Tabela 4 – CO2 Evitados pelas instituições públicas com sistemas de energia fotovoltaico...	33
Tabela 5 – CO2 evitados no Brasil de 2009-2022.....	34
Tabela 6 – Instituições aderidas a A3P.....	35

LISTA DE FIGURAS - CAPÍTULO 03

Figura 1 – Metodologia de construção do conhecimento Proknow-C	45
Figura 2 – Relacionamento autores no portfólio	58
Figura 3 – Principais Palavras-Chave do Portfólio	62

LISTA DE GRÁFICOS - CAPÍTULO 03

Gráfico 1 - Principais Palavras-Chave do Portfólio	62
--	----

LISTA DE TABELAS - CAPÍTULO 03

Tabela 1 – Resumo da Pesquisa do banco de dados.....	47
Tabela 2 – Portfólio Bibliográfico do tema de pesquisa	48
Tabela 3 – Número de publicações por revista.....	55
Tabela 4 – Distribuição temporal da localização geográfica por autoria	56

Tabela 5 – Principais autores do portfólio.....	57
Tabela 6 – Trabalhos mais citados no portfólio	59

LISTA DE FIGURAS - CAPÍTULO 04

Figura 1 – Filtros da pesquisa ANEEL.....	73
Figura 2 – Distribuição Geográfica dos resíduos solares fotovoltaicos nos estados brasileiros em 2065	81

LISTA DE GRÁFICOS - CAPÍTULO 04

Gráfico 1 – Potência instalada entre 2009 e 2022.....	78
Gráfico 2 – Projeção potência dos sistemas fotovoltaicos no Brasil 2022-2040.....	79
Gráfico 3 – Potência de energia solar instalada no Brasil (2022 e 2040).....	79

LISTA DE QUADROS - CAPÍTULO 04

Quadro 1 – Classificação dos WEEE - Anexo I da Diretiva Europeia (2012/19/EU)	70
Quadro 2 – Classificação dos WEEE - Anexo III da Diretiva Europeia (2012/19/EU).....	70
Quadro 3 – Metas Anuais da Diretiva Europeia.....	71

LISTA DE TABELAS - CAPÍTULO 04

Tabela 1 – Crescimento da Geração Distribuída -série histórica – 2012 a 2022	68
Tabela 2 – Valores de a e b	75
Tabela 3 – Potência instalada entre 2009 e 2022 módulos em operação no Brasil.....	77
Tabela 4 – Projeção resíduos solares fotovoltaicos no Brasil	80

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização do tema de pesquisa.....	15
1.2 Objetivo Geral.....	16
1.3 Objetivo Específicos.....	16
1.4 Relevância do Estudo.....	17
1.5 Estrutura do Trabalho.....	17
CAPÍTULO 2: AS POLÍTICAS PÚBLICAS E O CUMPRIMENTO DO ACORDO DE PARIS PELO BRASIL: O PAPEL DAS INSTITUIÇÕES PÚBLICAS NA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	19
2.1 Introdução	21
2.2 Referencial Teórico.....	23
2.3 Procedimentos Metodológicos	31
2.4 Resultados da pesquisa.....	33
2.5 Considerações Finais	37
CAPÍTULO 3: CONCILIANDO O CRESCIMENTO ENERGÉTICO SUSTENTÁVEL E A SEGURANÇA ALIMENTAR: DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM TERRAS AGRÍCOLAS NO BRASIL	40
3.1 Introdução	41
3.2 Referencial Teórico.....	42
3.3 Procedimentos Metodológicos	44
3.3.1 Seleção do Portfólio Bibliográfico	46
3.3.2 Análise bibliométrica do PB.....	46
3.4 Resultados da pesquisa.....	54
3.5 Considerações Finais	63
CAPÍTULO 4: RESÍDUOS DA CADEIA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL: POTENCIAL PARA A ECONOMIA CIRCULAR	65
4.1 Introdução	66
4.2 Referencial Teórico.....	67
4.3 Procedimentos Metodológicos	72
4.3.1 Cálculo da Capacidade Instalada Atual	73
4.3.2 Projeção da Capacidade Instalada	73
4.3.3 Projeção do número de módulos para o período	76

4.4 Resultados da pesquisa.....	77
4.5 Discussão	82
4.6 Considerações Finais	84
CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
REFERÊNCIAS	88

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema de pesquisa

O cenário global contemporâneo enfrenta desafios iminentes relacionados ao aumento vertiginoso do consumo de energia, evidenciado pelo crescimento de 2,3% em 2018 e 4,5% em 2021 (González Celis, 2020; IEA, 2021). Esse aumento, muitas vezes sustentado por fontes de energia não renováveis, contribui para a escalada das emissões de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, para os desafios ambientais. No contexto brasileiro, a crise hídrica dos últimos dez anos levou a uma significativa expansão das termelétricas, financiadas em parte pelo governo brasileiro, resultando em um acréscimo de 166.349 KW de potência instalada entre 2014 e 2023 (ANEEL, 2023).

Nesse contexto, surge a necessidade premente de buscar alternativas sustentáveis e eficientes para suprir a crescente demanda energética. Nos últimos anos, as tecnologias de energia limpa, notadamente a energia solar fotovoltaica, têm se destacado como uma solução promissora (Raturi, 2019). Os avanços técnicos nessa área, particularmente no uso de módulos fotovoltaicos, têm proporcionado uma fonte de energia limpa, sustentável e economicamente viável, desempenhando um papel crucial na expansão da matriz energética global (Gasparin, 2022; Malu; Sharma; Pearce, 2017).

Essa transição para fontes renováveis é corroborada pelas projeções da Agência Internacional de Energia (IEA), que aponta que a energia solar será responsável por 16% da demanda mundial até 2050, gerando cerca de 6.000 TWh (ENERGY, 2014). Países como China, Estados Unidos, Brasil e Vietnã têm desempenhado papéis fundamentais nesse movimento, contribuindo para o aumento de 18% na geração mundial de energia em 2021, ultrapassando 1 terawatt (TW) de potência instalada (IEA, 2021).

O Brasil, especificamente, destaca-se no panorama global, possuindo atualmente 28,9 GW de potência instalada em energia solar fotovoltaica, representando 13,1% da sua matriz energética (ABSOLAR, 2023). Projeções da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam que esse número ultrapassará 45 GW até 2031. No entanto, esse crescimento exponencial da energia solar não pode ser analisado de forma isolada, requerendo uma abordagem holística que considere os aspectos políticos, ambientais e sociais.

Comprometido com o Acordo Climático de Paris desde 2015, o Brasil busca reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 45%, ampliar o uso de energias limpas e promover um crescimento sustentável (CQNUMC, 2016). A implementação da Agenda Ambiental da Administração Pública (A3P), pelo Ministério do Meio Ambiente, reflete o esforço

governamental em alinhar as ações públicas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) estabelecidos pela ONU (Nahmias; Ferreira, 2022).

Entretanto, a literatura carece de uma análise aprofundada sobre as aquisições de sistemas fotovoltaicos realizadas por órgãos públicos e o seu impacto na redução de gases de efeito estufa, alinhando-se aos compromissos do Acordo de Paris. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral compreender os mecanismos que impulsionam o crescimento da energia fotovoltaica no Brasil, explorando os seus desdobramentos nas políticas públicas, no *trade-off* entre a produção de alimentos e a geração de energia limpa e na economia circular.

Dessa forma, este estudo busca contribuir com uma compreensão mais abrangente dos impactos sociais, econômicos e ambientais da energia solar na sociedade brasileira, considerando não apenas as vantagens comerciais e industriais, mas também as implicações cruciais para o desenvolvimento sustentável do país.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo foi aprofundar a compreensão dos mecanismos que estão impulsionando o crescimento da energia fotovoltaica no contexto brasileiro, considerando os seus possíveis impactos na formulação de políticas públicas, na geração de alimentos e no desenvolvimento da economia circular.

1.3 Objetivo Específicos

- a) Analisar as transformações nas políticas públicas no Brasil com a inserção e crescimento da energia fotovoltaica;
- b) Investigar o desafio da introdução de sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas brasileiras, considerando a influência do país como líder global na produção de alimentos e avaliar possível *trade-off* entre produção de alimentos x geração de energia fotovoltaica;
- c) Identificar os impactos na economia circular dos resíduos da cadeia da energia fotovoltaica no Brasil e as políticas aplicadas no mundo.

1.4 Relevância do Estudo

A importância deste estudo reside na disseminação de informações fundamentais que visam orientar gestores públicos e empreendedores na realização de projeções e planejamentos em longo prazo. Essa orientação é importante para garantir investimentos substanciais na indústria nacional e estimular inovações tecnológicas, especialmente considerando o potencial significativo que o Brasil possui para a expansão da energia solar. Além disso, as conclusões deste trabalho têm o propósito de subsidiar decisões estratégicas relacionadas às agendas ambientais e à segurança alimentar, enfatizando a necessidade de um enfoque sustentável e integrado.

Um aspecto distintivo desta pesquisa é a sua contribuição para a discussão sobre o uso de terras para a produção de energia. Os resultados obtidos revelam os impactos desse uso, permitindo uma avaliação mais precisa dos *trade-offs* entre a produção de energia limpa e a preservação de áreas destinadas à produção de alimentos. Essa abordagem busca o debate para a formulação de políticas públicas e estratégias de planejamento que equilibrem eficazmente as necessidades energéticas do país com a preservação dos recursos agrícolas.

Ao abordar práticas como o gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos, este estudo contribui para a literatura. A análise detalhada das legislações e práticas aplicadas globalmente proporciona insights valiosos sobre como essas experiências podem ser adaptadas e aplicadas no contexto brasileiro. Além disso, o trabalho destaca a urgência de modernizar as políticas públicas, incorporando, de maneira efetiva, uma fonte de energia renovável, como a solar fotovoltaica, para promover uma transição mais sustentável e alinhada com os compromissos internacionais do país.

Assim, como diferencial de pesquisa e contribuição para a sociedade, os resultados obtidos não apenas enriquecem o corpo de conhecimento existente, mas também servem como um guia estratégico para o desenvolvimento de políticas públicas e planejamentos estratégicos no setor comercial. Essa abordagem abrangente visa catalisar uma transformação significativa, impulsionando o Brasil em direção a um futuro mais sustentável e resiliente do ponto de vista ambiental e econômico.

1.5 Estrutura do Trabalho

A dissertação está organizada em cinco capítulos, delimitando de forma estruturada o desenvolvimento deste estudo.

O Capítulo 1 estabelece a introdução geral, contextualizando o crescimento da energia

fotovoltaica global e, mais especificamente, no cenário brasileiro. Nesse contexto, são apresentados os objetivos geral e específicos da pesquisa, além de destacar a relevância do estudo proposto.

No Capítulo 2, a análise se concentra no papel das instituições públicas na redução das emissões de CO₂ pela implementação de sistemas fotovoltaicos. A ênfase recai sobre a importância de políticas públicas centralizadas. O referencial teórico é construído com base em artigos relevantes da literatura, utilizando a plataforma Web of Science. Dois bancos de dados são elaborados, um com informações dos Diários Oficiais e outro com dados da ANEEL, permitindo identificar as instituições públicas envolvidas e calcular as emissões evitadas de gás carbônico.

No Capítulo 3, a avaliação se volta para o uso de terras agrícolas na geração de energia solar fotovoltaica, explorando os conflitos com a produção de alimentos. Um levantamento bibliométrico na base de dados Web of Science resulta na seleção de 4.741 artigos. Após o tratamento dos artigos, foi construído um portfólio bibliográfico de 74 artigos alinhados ao tema da pesquisa.

No Capítulo 4, propõe-se explorar a economia circular dos resíduos fotovoltaicos, projetando cenários para o Brasil e analisando as políticas públicas adotadas globalmente. A metodologia empregada envolve um levantamento bibliométrico sobre o tema. O quantitativo de resíduos após o fim da vida útil dos módulos solares é projetado para contribuir com a gestão de resíduos no Brasil.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho, destacando as conclusões obtidas a partir da abordagem dos problemas nos respectivos capítulos de pesquisa, e revisita os objetivos inicialmente definidos como guias da investigação.

CAPÍTULO 2: AS POLÍTICAS PÚBLICAS E O CUMPRIMENTO DO ACORDO DE PARIS PELO BRASIL: O PAPEL DAS INSTITUIÇÕES PÚBLICAS NA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

RESUMO

Este capítulo analisa o papel das instituições públicas na redução de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas fotovoltaicos. Uma revisão abrangente da literatura examina as políticas globais de energia fotovoltaica, contrapondo com a Agenda Ambiental na Administração Pública brasileira (A3P). Simulações quantificam o dióxido de carbono evitado pelas instituições públicas brasileiras no período de 2009 a 2022. Os principais resultados destacam: (1) no cenário global, China, Alemanha e Índia lideram a transição da matriz energética de combustíveis fósseis para energias renováveis, enquanto no Brasil, a falta de política nacional centralizada e planejamento estruturado revela desalinhamento com metas ambientais; (2) apenas 3% das instituições públicas com sistemas fotovoltaicos integram a A3P, evidenciando baixa adesão ao programa do Ministério do Meio Ambiente e (3) no Brasil, os sistemas fotovoltaicos implementados pelas instituições públicas evitam anualmente a emissão de 17.943 toneladas de CO₂. A série histórica de 2009 a 2022 demonstra que o país conseguiu evitar a emissão de 1.938.048 toneladas de CO₂ por meio de todos os sistemas fotovoltaicos implantados no país. Esses resultados têm implicações importantes para o desenvolvimento de políticas públicas direcionadas à promoção de sistemas fotovoltaicos em órgãos governamentais, contribuindo, assim, para as metas estabelecidas no Acordo de Paris. Além disso, o estudo destaca a urgência de políticas públicas em longo prazo no Brasil, que envolvam entidades federais, estaduais e municipais, para uma transição energética sustentável. Adicionalmente, aponta-se para áreas de pesquisa futura, incluindo planejamento estratégico, investimentos na indústria nacional e inovações tecnológicas, considerando a capacidade do país para expandir a sua capacidade de energia fotovoltaica. O estudo preenche uma lacuna na pesquisa, ao não encontrar na literatura a investigação sobre as aquisições de sistemas fotovoltaicos realizadas por órgãos públicos e se tais aquisições estão contribuindo para a redução de gases de efeito estufa, correlacionando os resultados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável do Acordo de Paris.

Palavras-chave: energia fotovoltaica; redução de CO₂; políticas públicas; Agenda 2030; A3P.

**PUBLIC POLICIES AND THE FULFILLMENT OF THE PARIS AGREEMENT BY
BRAZIL: THE ROLE OF PUBLIC INSTITUTIONS IN REDUCING CO₂
EMISSIONS THROUGH PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

ABSTRACT

The study analyzes the role of public institutions in reducing greenhouse gas emissions through the adoption of photovoltaic systems. A comprehensive literature review examines global photovoltaic energy policies, contrasting them with the Brazilian Public Administration Environmental Agenda (A3P). Simulations quantify the carbon dioxide avoided by Brazilian public institutions in the period from 2009 to 2022. The main results highlight: (1) On the global stage, China, Germany and India lead the transition of the energy matrix from fossil fuels to renewable energies, while in the Brazil, the lack of centralized national policy and structured planning reveals misalignment with environmental goals; (2) Only 3% of public institutions with photovoltaic systems are part of A3P, showing low adherence to the Ministry of the Environment's program; (3) In Brazil, photovoltaic systems implemented by public institutions prevent the emission of 17,943 tons of CO₂ annually. The historical series from 2009 to 2022 shows that the country managed to avoid the emission of 1,938,048 tons of CO₂ through all photovoltaic systems implemented in the country. These results have important implications for the development of public policies aimed at promoting photovoltaic systems in government bodies, thus contributing to the goals established in the Paris Agreement. Furthermore, the study highlights the urgency of long-term public policies in Brazil, involving federal, state and municipal entities, for a sustainable energy transition. Additionally, it points to areas of future research, including strategic planning, investments in national industry and technological innovations, considering the country's ability to expand its photovoltaic energy capacity. The study fills a gap in the research, as there is no investigation in the literature on the acquisitions of photovoltaic systems carried out by public bodies and whether such acquisitions are contributing to the reduction of greenhouse gases, correlating the results with the Sustainable Development Goals of the Paris Agreement.

Keywords: photovoltaic energy; CO₂ reduction, public policies; Agenda 2030; A3P.

2.1 Introdução

Ao longo do século XX e no início do século XXI, discussões sobre a relação sociedade e natureza apresentaram diferentes interpretações de valores, alterando os fluxos econômicos, sociais e culturais (Cichoski; Corona; Mello, 2022). Com isso, as Nações Unidas ratificaram em 2015, a Agenda 2030, estabelecendo um conjunto de 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas que envolvem governos e instituições internacionais (Christ; Piffer, 2022), a fim de impulsionar esforços para formular políticas públicas em nível global para contribuir com as mudanças do clima (Duarte, 2019).

O consumo de energia mundial cresceu 2,3% em 2018 (González Celis, 2020) e 4,6% em 2021 (IEA, 2021), fatores que proporcionam uma insegurança energética e busca por fontes de energias renováveis. No entanto, a matriz energética mundial ainda se baseia no consumo de fontes não renováveis. Combustíveis fósseis, como petróleo, representam 32%, carvão 27%, gás natural 23%, energia nuclear 5%, energia hidrelétrica 2%, biocombustíveis 9% e outras fontes de energia 2% (IEA, 2020).

Nesse cenário, o setor de energia é um dos principais setores para combater o aquecimento global, uma vez que as principais fontes de poluição estão relacionadas à utilização de combustíveis fósseis. Nesse sentido, os governos e o setor buscam alternativas de energias renováveis.

As fontes fósseis possuem reservas limitadas e a utilização desses recursos contribuem para a destruição do meio ambiente, uma vez que 85% do enxofre liberado na atmosfera provém da queima de combustíveis fósseis, assim como 75% das emissões de CO₂, principal responsável pelo efeito estufa (Goldemberg; Villanueva, 2003). Com as políticas internacionais de redução da emissão de carbono, estima-se que até 2040, metade da produção da matriz elétrica mundial seja produzida por energias renováveis (Gehrke; Goretti; Avila, 2021).

O presente estudo ocupa uma lacuna na pesquisa sobre o tema, pois não se identificou na literatura a verificação sobre as aquisições de sistemas fotovoltaicos realizados por órgãos públicos e tampouco se tais aquisições estão contribuindo com a redução de gases de efeito estufa, correlacionando-se os resultados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável do Acordo de Paris.

O Acordo Climático de Paris, assinado em 2015 por representantes de 196 países, propõe a diminuição de 45% das emissões de gases de efeito estufa e dobrar as fontes de energias renováveis no mundo até o ano de 2030, a fim de reduzir o aumento da temperatura global (CQNUMC, 2016). No entanto, pode-se verificar que em 2019 houve somente a redução

de 1% nas emissões de CO₂ do setor elétrico, já em 2020 esse número caiu 7%, sendo reflexo da redução na geração de energia a carvão e crescimento das energias renováveis (Maka; Alabid, 2022). O Brasil assumiu compromissos voluntários perante a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025 e em 50% até 2030, em relação aos níveis de 2005, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2023).

A implementação de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento, a produção e a distribuição de tecnologias desempenham um papel crucial no avanço das fontes de energia renovável, promovendo desenvolvimento sustentável, conforme destacado por Gasparin (2022). Além disso, essas ações são essenciais para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 7, Energia Limpa e Acessível, estabelecido pelas Nações Unidas. A energia fotovoltaica se apresenta como uma alternativa para a redução da emissão de CO₂, demonstrando capacidade técnica, financeira e benefícios ao meio ambiente (Heffron *et al.*, 2021).

Em 2021, a geração de energia solar fotovoltaica gerou 1 TWh, correspondendo a 3,6% de toda a geração de energia elétrica no mundo (IEA, 2022), demonstrando forte crescimento com 26,5% a.a durante o período 2012 a 2021 (Bezerra, 2022). Na última década, os investimentos em sistemas de geração de energia fotovoltaica se tornaram mais atraentes economicamente do que construir usinas de combustíveis fósseis, sendo outro fator que contribuiu para esse crescimento (Bianco *et al.*, 2019).

O Brasil possui experiência com a utilização de fontes limpas de produção energética, possuindo 81% da sua matriz sustentável (ABSOLAR, 2022), fator determinante para que o país possua médias de aproveitamento dessas fontes acima das médias globais, tanto na produção primária quanto em uso (Pesquisa Energética, 2021).

A disseminação da energia solar fotovoltaica no Brasil teve um marco importante com a publicação da Resolução Normativa (REN) nº 482 em 17 de abril de 2012, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Essa resolução estabeleceu as condições gerais para o acesso da micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Posteriormente, a REN nº 687, datada de 24 de novembro de 2015, também emitida pela ANEEL, trouxe atualizações significativas a esse cenário.

Essas regulamentações tiveram um impacto determinante no crescimento da utilização da energia solar fotovoltaica no país, conforme destacado por Scolari; Tonolo; Pan e Urbanetz Júnior (2018). Elas estabeleceram o sistema de compensação de energia elétrica, que permitiu aos proprietários de sistemas de geração solar injetar o excedente de energia na rede elétrica e

receber créditos, o que incentivou investimentos em painéis solares residenciais e comerciais.

Essas medidas representam um avanço importante na busca por fontes de energia mais limpas e renováveis, ao mesmo tempo em que promovem a ampliação da variedade de fontes energéticas e desempenham um papel fundamental na preservação ambiental e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa no Brasil.

Dessa forma, o presente capítulo apresenta, em primeiro momento, a Agenda 2030 e os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU para o desenvolvimento sustentável, combatendo a pobreza e protegendo o meio ambiente. Na segunda parte, evidencia-se o programa Agenda Ambiental da Administração Pública (A3P), instituído pelo Ministério de Meio Ambiente para estimular as instituições públicas a implementarem práticas sustentáveis. Na terceira parte, são analisadas as políticas públicas adotadas nos principais países que gerenciaram alterações nas suas matrizes energéticas, a fim de promover a redução de emissão dos gases de efeito estufa e o aumento da produção de energias renováveis, buscando verificar se o modelo brasileiro está em consonância com os países que estão impulsionando a energia fotovoltaica em órgãos públicos. Por fim, são apresentadas as aquisições de sistemas fotovoltaicos por instituições públicas brasileiras e a discussão da efetividade de tais aquisições para o cumprimento do acordo de Paris, principalmente na redução de emissões de CO₂.

2.2 Referencial Teórico

A Agenda 2030 se estrutura em 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável apontando para a necessidade de ações que levem em consideração o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável (ONU, 2015).

As metas relacionadas ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS 7) apresentam questões técnicas e de infraestrutura, no entanto, vinculam-se à necessidade humana de poder usufruir da energia elétrica, demonstrando grande impacto social ao descrever como aspectos do cotidiano (geração de renda e a prestação de serviços em escolas e hospitais, por exemplo) são afetados pela falta de energia (Souza, 2020). Portanto, evidencia-se que o cumprimento do ODS 7 é fundamental para o desenvolvimento social e econômico de um país.

As metas propostas pelo ODS 7 relacionam compromissos assumidos pelos representantes de diversos países perante a Organização das Nações Unidas (ONU) e o Brasil, voluntariamente, comprometeu-se com a Agenda 2030.

Quadro 1 - Metas ODS 7 e situação do Brasil

Metas da ODS 7	Análise situação brasileira
Meta 7.1 - Garantir que todos tenham acesso à energia confiável, moderna e acessível até 2030	Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2018, 99,7% da população brasileira possui acesso à energia.
Meta 7.2 - Até 2030, ampliar consideravelmente a participação das energias renováveis na matriz energética global	A partir de 2014, evidencia-se ascensão das energias limpas como a solar e eólica. Em 2022, a matriz energética brasileira possuía potência de 202.061MW, sendo 81% de fontes limpas (hídrica 52,2%, eólica 11%, solar fotovoltaica 10,2% e 8% gás natural) (ABSOLAR, 2022).
Meta 7.3 - Até 2030, duplicar a taxa global de aumento da eficiência energética	O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2030) prevê a necessidade da matriz energética brasileira atingir 328 MW de potência e indica a necessidade de investimento da ordem de R\$ 2,7 trilhões no setor de energia para os próximos 10 anos, sendo somente R\$ 365 bilhões em geração centralizada, geração distribuída e transmissão de energia elétrica, os demais recursos deverão ser investidos em petróleo, gás natural e biocombustíveis.
Meta 7.a - Até 2030, fortalecer a cooperação internacional para o acesso a pesquisas e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis mais limpos, bem como promover investimentos em infraestrutura e tecnologias de energia sustentável	Nos últimos anos, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e as universidades públicas tiveram cortes orçamentários impactando diretamente na pesquisa brasileira, consequentemente, isso impacta negativamente as pesquisas energéticas. Há um potencial pouco aproveitada no Brasil em relação à energia eólica e solar, no entanto, em 2021, o Brasil foi o quarto país que mais desenvolveu capacidade de energia solar fotovoltaica em âmbito global, com novos 5,7 GW, sendo que, atualmente, essa fonte solar já se apresenta em 21GW. No ranking mundial da fonte solar, o Brasil está na décima terceira colocação, com possibilidade de subir para entre os dez primeiros nos próximos anos (ABSOLAR, 2022), prevendo alcançar em 2031 a potência de 37,2 GW (EPE, 2022).
Meta 7.b - Até 2030, ampliar a infraestrutura e modernizar a tecnologia para oferecer serviços de energia modernos e sustentáveis de forma abrangente	O país necessita de investimentos estruturais para promover o aumento de sua capacidade energética, as fontes de energia eólica e solar demonstram grande potencial para que o país alcance a meta ODS 7, no entanto, políticas públicas para ampliarem a eficiência energética devem ser pautadas em crescimentos sustentáveis e humano nacional (Souza, 2020).

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da Agenda 2030 (2023)

Considerando a sustentabilidade no âmbito governamental, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) instituiu a Agenda Ambiental da Administração Pública (A3P) com o objetivo de incentivar as instituições públicas do país a adotarem práticas sustentáveis,

demonstrando o compromisso da instituição em ser eficiente em suas atividades públicas e, ao mesmo tempo, promover a preservação do meio ambiente.

De acordo com Nahmias e Ferreira (2022), a A3P está alinhada com os ODS, destacando a sua importância na busca por um futuro mais sustentável. O programa foi inicialmente estruturado em cinco eixos e, em 2017, acrescentou um sexto eixo: 1) Uso racional dos recursos naturais e bens públicos; 2) Gestão de resíduos gerados; 3) Qualidade de vida no ambiente de trabalho; 4) Sensibilização e capacitação dos servidores; 5) Compras públicas sustentáveis e 6) Construções sustentáveis.

Tabela 1 - Descrição dos Eixos Temáticos da A3P e conexão com os ODS

EIXOS DA A3P E DESCRIÇÃO	CONEXÃO COM OS ODS
<p>Eixo 1 - A promoção do uso racional dos recursos naturais e bens públicos é uma prática fundamental para a sustentabilidade e o bem-estar da sociedade. Isso implica em utilizar esses recursos de maneira econômica e sensata, evitando seu desperdício. Essa abordagem abrange diversas áreas, incluindo o consumo consciente de energia, água e madeira, bem como a redução do uso de papel, copos plásticos e outros materiais de escritório. O uso racional desses recursos envolve a adoção de medidas que visem à eficiência no seu uso, a conservação dos mesmos e a minimização do impacto ambiental. Isso pode ser alcançado por meio da implementação de práticas sustentáveis, como a utilização de fontes de energia renovável, a redução do desperdício de água, a escolha de materiais sustentáveis na construção e a promoção da reciclagem.</p>	
<p>Eixo 2 - A eficaz gestão dos resíduos gerados é essencial para promover a sustentabilidade ambiental. Isso requer a adoção da política dos 5R's: Repensar, Reduzir, Reutilizar, Reciclar e Recusar. É fundamental compreender que a gestão adequada dos resíduos começa com a prevenção, ou seja, reduzir o consumo e evitar o desperdício sempre que possível. Somente depois de esgotar essas opções é que devemos direcionar os resíduos restantes para destinação correta, seja por meio da reciclagem, compostagem ou outros métodos ambientalmente responsáveis. Ao adotar essa abordagem abrangente, contribuímos para a preservação do meio ambiente e a construção de um futuro mais sustentável.</p>	
<p>Eixo 3 - Melhorando a descrição da qualidade de vida no ambiente de trabalho: A qualidade de vida no ambiente de trabalho é uma abordagem que visa criar um ambiente propício para facilitar e satisfazer as necessidades dos trabalhadores enquanto desempenham suas atividades dentro da organização. Isso é alcançado por meio de uma</p>	

série de ações e iniciativas voltadas para o desenvolvimento pessoal e profissional dos colaboradores.

Eixo 4 - Sensibilização e Capacitação dos Servidores:

O objetivo principal da sensibilização e capacitação dos servidores é promover a conscientização sobre a responsabilidade socioambiental entre os funcionários e ao mesmo tempo desenvolver competências institucionais e individuais que permitam um desempenho mais eficaz das suas atividades.

Esta iniciativa visa não apenas criar, mas também consolidar a consciência cidadã dos servidores em relação à responsabilidade socioambiental. Através de programas de capacitação, proporcionamos aos funcionários a oportunidade de adquirir as habilidades e atitudes necessárias para melhorar a execução de suas funções.

Em suma, a sensibilização e capacitação dos servidores não só reforçam a conscientização sobre a responsabilidade socioambiental, mas também capacitam os funcionários para alcançar um desempenho mais eficaz e alinhado com os valores e metas da organização.

Eixo 5 - Licitações Sustentáveis:

É fundamental que a administração pública promova a responsabilidade socioambiental em suas aquisições e compras. Nesse contexto, as licitações desempenham um papel crucial, uma vez que devem resultar na obtenção de produtos e serviços sustentáveis. Essa abordagem não apenas contribui para a preservação do meio ambiente, mas também oferece uma relação custo/benefício superior a médio e longo prazos, em comparação com aquelas baseadas apenas no critério de menor preço. A promoção de licitações sustentáveis reflete o compromisso da administração pública em considerar não apenas os custos imediatos, mas também os impactos sociais e ambientais a longo prazo. Optar por produtos e serviços sustentáveis não só reduz o impacto ambiental negativo, mas também pode resultar em economias significativas ao longo do tempo, por meio da eficiência energética, durabilidade e menor necessidade de manutenção.

Eixo 6 - Construção Sustentável: Abrange desde o planejamento e o projeto até a construção e a operação do edifício. Baseia-se em princípios como eficiência energética, uso responsável de materiais, gestão de resíduos, utilização de fontes de energia renovável, entre outros. As práticas comuns incluem a instalação de sistemas de energia solar, isolamento térmico eficaz, coleta e reutilização de água da chuva, uso de materiais sustentáveis e a criação de ambientes internos saudáveis e confortáveis. A construção sustentável não apenas reduz o impacto ambiental das edificações, como também pode



resultar em economias significativas a longo prazo, por meio da eficiência no uso de recursos e da redução dos custos operacionais. Além disso, promove um ambiente mais saudável e agradável para os ocupantes, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida.

Fonte: Almeida *et al.* (2022)

As compras sustentáveis passaram a assumir um protagonismo maior na sociedade, exigindo que o administrador público passasse a ter o dever de observar o critério da sustentabilidade na realização das licitações públicas, como exposto no “Guia Nacional de Licitações Sustentáveis” da Advocacia-Geral da União (Schossler *et al.*, 2021). A sustentabilidade passou a ser um princípio observado para que a empresa participante seja a vencedora da licitação.

Tal ação teve início em 2003, em Marrocos, onde foi instituído o Processo de Marrakesh, para dar aplicabilidade e expressão concreta ao conceito de Produção e Consumo Sustentáveis (PCS). Ele solicita e estimula que cada país membro das Nações Unidas, e participante do processo, desenvolva seu plano de ação, o qual será compartilhado com os demais países, em nível regional e mundial, gerando subsídios para a construção do *10-Year Framework of Programmes on SCP - 10YFP* (Silva; Young, 2022).

O Brasil aderiu ao Processo de Marrakesh em 2007 e elaborou o Plano de ação para produção e consumo sustentáveis (PPCS), publicado em 23 de novembro de 2011, colocando as compras públicas sustentáveis como uma das seis prioridades do Plano, prevendo ações de capacitação e facilitação da utilização destas, inserindo-as, incisivamente, na gestão pública (Dutra, 2020). Ademais, o Brasil alterou a lei de licitações e editou vários decretos instituindo que para a fase inicial do processo fossem avaliadas as compras ou contratações sustentáveis, exigindo dos gestores maior planejamento e alteração cultural das organizações.

A A3P, no que diz respeito às licitações sustentáveis, destaca que a administração pública deve promover a responsabilidade socioambiental das suas compras. Diante da sua importância, a A3P foi incluída no PPA Federal 2004-2007 e 2008-2011, em que tal ação garantiu recursos para a sua implantação efetiva, contudo, nos PPAs 2016-2019 e 2020-2023 não constam ações previstas.

A preocupação com o meio ambiente aumentou as discussões sobre as alterações nas políticas climáticas (Hart; Pomponi, 2021) e, para alcançar as metas com energias limpas, as políticas públicas de incentivo se tornam fator fundamental, uma vez que o Estado pode influenciar no mercado de energia elétrica com criações de normas e regulação de tarifas (Gasparin, 2022).

A China e a Alemanha adotaram políticas públicas para a redução de emissão de CO₂ e adoção de energia limpa. A China emitiu, em 2006, a Lei de Energias Renováveis com o objetivo de desenvolvimento de energias limpas, principalmente a energia solar e, no mesmo ano, criou os programas *Golden Sun e Building Integrated Photovoltaics*, com o objetivo de subsidiar em até 70% os custos de implantação dos sistemas de energia fotovoltaico em regiões remotas (Gasparin, 2022). Em relação à geração distribuída, a China, por sua vez, implantou o programa *Photovoltaic Poverty Alleviation Initiative* (PVPA), possibilitando financiamentos para províncias desfavorecidas economicamente e redistribuição dos lucros obtidos com a geração de energia com os residentes (Lo, 2021).

Já na Alemanha, a adoção de políticas públicas em busca de energias renováveis se iniciou mais cedo, em 1991, com a emissão da Lei de Alimentação de Energia, em que o governo estabelece compensação de energia pelo mecanismo *feed in*. Logo após, a nação criou o programa 100.000 telhados, com o intuito de aumentar a produção de energia fotovoltaica, subsidiando até 79% dos financiamentos para instalações de sistemas fotovoltaicos (Pereira, 2019). Atualmente, está em vigor a Lei das Fontes de Energia Renováveis, a qual permite que produtores realizem acordos e leilões com os consumidores interessados, sendo a diferença entre o valor da energia vendida pelo produtor e o seu valor de mercado repassado a ele pela concessionária sob o nome de “Market Premium” (Batist *et al.*, 2019).

Outro país importante que merece atenção é a Índia, na qual foi instituída uma política baseada na redução de imposto sobre as receitas provenientes de determinadas fontes de energia renováveis, como painéis solares e biogás. Segundo Irena (2021), essa política proporcionou à Índia um aumento de geração de energia renovável de 70.560 GWh em 2014 para 90.748 GWh em 2016. Nos EUA, dois métodos foram importantes para justificar a adoção de geração distribuída: o *Community Solar* e o *Virtual Net-Metering* (Hefron *et al.*, 2021). O primeiro programa permite que vários consumidores invistam em um único sistema fotovoltaico e o segundo programa apresenta a possibilidade do consumidor investir em GD, sem que seja instalada na sua unidade consumidora (NREL, 2021).

De acordo com Corrêa e Cário (2022), embora persistam obstáculos significativos, diversos indicadores apontam que há energias renováveis não hidrelétricas, como a energia solar e eólica, que desfrutam de condições favoráveis no Brasil. Isso inclui iniciativas governamentais como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) de 2002, leilões de energia, políticas de conteúdo local e financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), além do programa Inova Energia (2013). Essas iniciativas desempenham um papel importante na facilitação da transição

energética em direção às fontes renováveis. Por outro lado, conforme apontado por Aquila *et al.* (2017), no que diz respeito à energia solar fotovoltaica no Brasil, há uma histórica falta de incentivos que precisa ser abordada.

Um marco significativo no avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil foi a promulgação da Resolução Normativa nº 482/2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), juntamente com a sua posterior atualização, a Resolução Normativa nº 687/2015. Essas resoluções desempenharam um papel importante ao impulsionar a energia fotovoltaica no país, permitindo a conexão de sistemas na rede elétrica. Isso abriu caminho para empresários e cidadãos produzirem energia para atender às suas necessidades por sistemas fotovoltaicos.

Em busca de aprimorar a Resolução nº 482 e de facilitar o acesso às linhas de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o governo brasileiro lançou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), pelo Decreto Ministerial nº 538, de 2015.

Pode-se identificar a evolução da geração distribuída no Brasil após a instituição da Resolução n.º 482/2012, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Crescimento da Geração Distribuída - série histórica - 2012 a 2022

Ano	GD	Municípios	Potência (KW)
2012	23	20	662
2013	67	49	2.055
2014	342	165	4.649
2015	1.687	506	13.942
2016	8.267	1.239	62.597
2017	21.883	2.067	186.482
2018	57.682	3.294	584.956
2019	182.075	4.635	2.135.201
2020	406.093	5.237	4.923.701
2021	835.752	5.457	9.186.691
(set/2022)	1.223.533	5.501	12.780.880

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da ANEEL (2023)

Segundo Silva (2019), dado o sucesso dos leilões experimentados nos projetos de energia eólica, o governo brasileiro impulsionou os leilões para a fonte solar fotovoltaica centralizada, tornando essa fonte de energia o principal meio de promoção da geração centralizada no país.

Portanto, as ações governamentais devem existir para que a transição sustentável dos combustíveis fósseis para energia limpa possa ser alcançada com a instalação de energias renováveis baseadas em sistemas de energia eólica natural, hidrelétrica e solar fotovoltaica

(IRENA, 2016). No entanto, com a promulgação da Lei Federal n.º 14.300, de 06/01/2022, alguns componentes tarifários de forma progressiva não serão mais compensados integralmente (Bezerra, 2022), o que pode promover um desaquecimento da geração distribuída no Brasil, principalmente a energia solar, fonte de energia que mais cresce no país. Gutierrez (2022) aponta que o setor elétrico brasileiro apresenta barreiras à entrada e concentração de mercado muito acima dos países-membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e a principal causa dessa concentração é a falta de liberdade de compra do pequeno consumidor.

Outro ponto que merece destaque é a utilização de termelétricas para a geração de energia, com a identificação de investimentos em minas de carvão e a promoção de programas como o PROCARVÃO-RS (Brose, 2022), que questiona as políticas públicas brasileiras para o cumprimento das metas assumidas junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC).

A China se encontra na liderança mundial com maior potência instalada de geração de energia solar (Ribeiro Filho; Pereira; Velázquez, 2022), liderando o ranking geral com 306 GW e como maior produtor de painéis e inversores solares (IEA, 2021).

Liu *et al.* (2022), pesquisando a contribuição das energias eólica e solar para a neutralidade de carbono na China identificaram que para limitar o aquecimento atmosférico abaixo de 1,5 °C, a geração de energia pode precisar atingir aproximadamente 5,4–9,7 PWh até 2050, o que resultaria em uma redução de 4,54–8,15 Gt de CO₂ emitido por ano. Os autores identificaram, ainda, que com implantações de políticas de financiamento verde, como precificação de carbono, certificado verde e crédito verde, pode-se reduzir fortemente o LCOE¹ de energia eólica *offshore* e energia solar.

O crescimento das energias renováveis na China, como solar e eólica, está diretamente ligado às políticas econômicas governamentais. Além disso, prevê-se que podem ser aumentadas com a implementação de políticas de finanças verdes (precificação do carbono e crédito verde), possibilitando a redução do LCOE de energia eólica e solar, bem como acelerando a eliminação do carvão (Liu *et al.*, 2022).

À medida que o mundo faz a transição dos combustíveis emissores de carbono para as energias renováveis e neutras em carbono, os esforços nas pesquisas mudaram o foco e a

¹ Levelized Cost of Energy, ou Custo Nivelado da Energia. Mede os custos médios para construir e operar uma usina geradora de energia ao longo de sua vida útil. Também é comumente usados para comparar os custos de eletricidade de diferentes tecnologias de energia de forma consistente.

perspectiva geral é especificar os impactos da inovação tecnológica no consumo de energias renováveis. As instituições públicas devem adequar os processos e consumo energético reduzidos, sendo necessário avançar com medidas de adaptação aos impactos das alterações climáticas. É importante a avaliação econômica do uso da energia fotovoltaica nos prédios públicos, a fim de instituir construções sustentáveis e uso racional dos recursos naturais (MMA, 2022).

As políticas públicas aplicadas em diversos países, que demonstram apoio a pesquisa e desenvolvimento do setor de energia fotovoltaica, poderão servir como aprendizado para implementações das políticas públicas nacionais aplicadas a fontes renováveis, principalmente para a geração de energia solar, uma vez que o país possui grande capacidade de crescimento.

2.3 Procedimentos Metodológicos

Este trabalho pode ser definido como uma pesquisa de caráter descritivo, que usou métodos quantitativos. Segundo Richardson, Peres e Wanderley (1985), este método se caracteriza pelo emprego da quantificação nas modalidades de coleta de informações e no tratamento dos dados a partir de técnicas estatísticas ou outras técnicas matemáticas.

A amostra coletada foi composta por informações divulgadas pela ANEEL, que dispunha de dados dos sistemas fotovoltaicos implantados por órgãos públicos, entre 2012 e 2022, ou seja, após a resolução 482/2012, que possibilitou a conexão à rede das concessionárias de energia de sistemas de geração fotovoltaica. Os filtros da pesquisa para coleta das informações no sítio eletrônico da ANEEL estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 - Filtros da pesquisa ANEEL

Filtros	Pesquisa
Tipo de Geração	UFV
Classe de Consumo	Poder Público Serviço Público Iluminação Pública
Modalidade de Geração	Todos
Fonte de Geração	Radiação Solar

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da ANEEL (2023)

Os dados coletados permitiram a construção do banco de dados, contendo: período da homologação do sistema fotovoltaico; município; estado; órgão público titular do empreendimento e a potência instalada.

As informações coletadas nos permitiram calcular a quantidade de emissões de CO₂, que pode ser evitada pelas instituições públicas na adoção de sistemas fotovoltaicos. Esses cálculos foram baseados em estudos realizados por vários autores (Liu *et al.*, 2022; Marinovski; Salamoni; Rüther, 2004; Masutti; Tabarelli; Santos, 2016).

Equação 1: Consumo Médio

$$E = Pot * R * Irrad$$

Em que E = consumo médio durante o ano (MWh/ano); Pot = potência instalada (KW); R = rendimento do sistema (%) e $Irrad$ = média anual de radiação solar (KW/m²/ano).

Com essa equação, foi possível estimar a energia gerada anualmente por cada sistema fotovoltaico adquirido pelos órgãos públicos, utilizando-se de rendimento dos sistemas de 80%, demonstrando que o rendimento dos sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil é superior ao de alguns estudos na África e no Mundo (Mhundwa; Simon; Yongoua, 2020).

A análise das emissões de CO₂ evitadas foi verificada segundo as metodologias adaptadas por Buiatti *et al.* (2016); Lira *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2022; Sanquetta *et al.*, 2017), descritas na Equação 2, a seguir.

Equação 2: Emissões de CO₂

$$E(tCO_2) = E * Fe$$

Em que $E(tCO_2)$ = emissões anuais de dióxido de carbono evitadas; E = energia gerada anual (MWh) e Fe = fator de emissão (tCO₂).

A partir da equação acima, calcula-se as emissões evitadas de cada sistema fotovoltaico adquirido pelos órgãos públicos. O fator de emissão de CO₂ foi calculado a partir da média entre os anos 2019 e 2021 dos registros do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo apurado o valor de 0,084275, ou seja, cada 1 KWh de eletricidade de energia solar renovável pode compensar aproximadamente 842 g de CO₂, fator de emissão próximo ao da China que está em 841g de CO₂ (COUNCIL, 2019).

Os dados de irradiação solar de cada Município foram extraídos do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira, 2017), uma vez que a variabilidade espaço-temporal e a disponibilidade do recurso solar têm um papel fundamental para a previsibilidade da geração de energia solar (Freire *et al.*, 2022).

Ademais, foi feito um levantamento bibliográfico nos principais países que implantaram energia fotovoltaica no mundo, das políticas públicas nacionais e quais as instituições públicas que aderiram à A3P, correlacionando-as a quais instituições promoveram aquisições de

sistemas fotovoltaicos (Brasil, 2019).

2.4 Resultados da pesquisa

Os resultados apontam que as instituições públicas que adquiriram sistemas fotovoltaicos evitam, por ano, a emissão de 17.943 toneladas de CO₂.

As instituições federais possuem maior número de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - CO₂ Evitados pelas instituições públicas com sistemas de energia fotovoltaico

ESTADOS DO BRASIL	Poder Federal (tCO₂)	Poder Estadual (tCO₂)	Poder Municipal (tCO₂)
ACRE	90,91	2,61	0
ALAGOAS	89,14	12,69	50,44
AMAPÁ	146,53	37,72	0
AMAZONAS	31,65	27,37	43,21
BAHIA	158,25	47,61	200,17
CEARÁ	565,28	305,13	119,82
DISTRITO FEDERAL	867,19	24,51	0
ESPÍRITO SANTO	652,78	107,79	306,07
GOIÁS	420,07	187,45	79,32
MARANHÃO	311,7	88,78	295,47
MATO GROSSO	377,08	245,75	504,61
MATO GROSSO DO SUL	231,85	48,85	88,73
MINAS GERAIS	700,14	341,15	993,49
PARÁ	127,42	8,7	64,77
PARAIBA	181,36	46,15	171,94
PARANÁ	175,19	115,73	394,57
PERNAMBUCO	211,46	410,25	60,41
PIAUI	254,05	73,33	117,61
RIO DE JANEIRO	208,41	55,41	64,1
RIO GRANDE DO NORTE	425,37	374,12	26,2
RIO GRANDE DO SUL	333,76	157,3	1013,5
RONDÔNIA	11,64	106,16	5,34
RORAIMA	19,43	18,41	960,95
SANTA CATARINA	73,48	18,11	91,6
SÃO PAULO	284,26	549,51	1325,46
SERGIPE	97,81	42,41	0
TOCANTINS	209,23	97,24	159,41

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

Observa-se que o estado de São Paulo foi o ente da federação que mais aplicou recursos

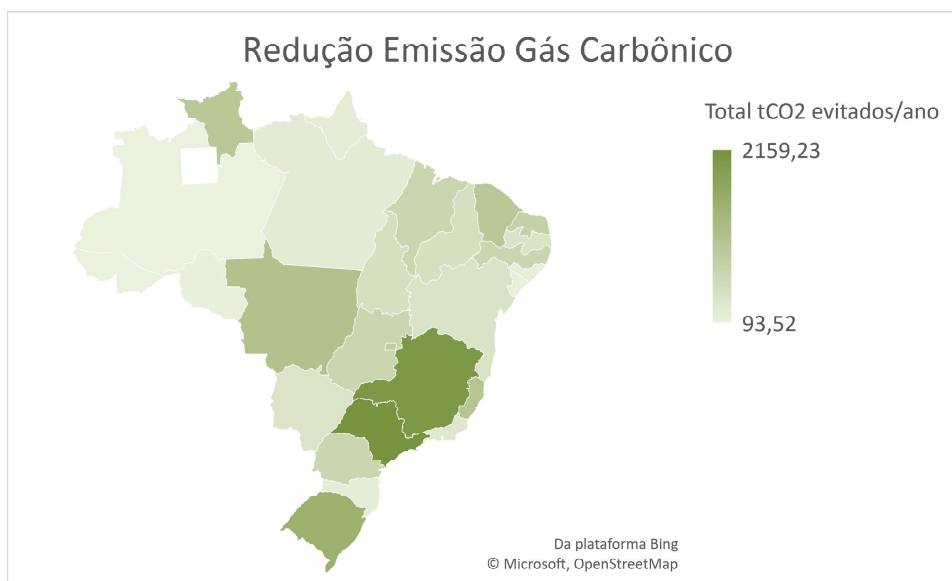
públicos para as aquisições de sistemas fotovoltaicos, instalando 18,71 MW de potência, embora no ranking nacional ocupe a segunda colocação com maior potência instalada, 1.971,6 MW. Já o estado de Minas Gerais, com 2.227,3 MW de potência instalada, ocupa a primeira colocação geral com maior geração de energia por sistemas fotovoltaicos, no entanto, as instituições públicas colaboraram somente com 17,48 MW de potência instalada. Assim, constatou-se que os maiores investimentos em sistemas fotovoltaicos provêm da iniciativa privada, enquanto as entidades públicas contribuem com uma potência instalada de 155,6 MW (ABSOLAR, 2022), sendo esse quantitativo representativo de somente 1% de toda a potência instalada no Brasil, reforçando a falta de investimentos públicos nas aquisições dos sistemas fotovoltaicos e, conseqüentemente, possibilitando a conclusão de que esse setor poderia estar contribuindo mais efetivamente com a redução de CO₂ no país.

Tabela 5 - CO₂ evitados no Brasil de 2009-2022

Ano	EMISSIONES EVITADAS (tCO ₂)
2009	3
2010	2
2011	11
2012	52
2013	162
2014	302
2015	1071
2016	5628
2017	14289
2018	45836
2019	180452
2020	330775
2021	529245
2022	830222

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

Os resultados apontam que o Brasil, a partir de 2009, com a produção de energia limpa por sistemas fotovoltaicos evitou, aproximadamente, a emissão de 1.938.048 toneladas de CO₂.

Gráfico 1 - Representação geográfica tCO₂ evitados pelas instituições públicas

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

Na Tabela 6, identifica-se que as instituições públicas em nível Distrital e Municipal são as que mais aderiram à Agenda Ambiental na Administração Pública, no entanto, visualiza-se que é baixa a adesão entre os diversos poderes. Observa-se que a A3P não está conseguindo alcançar o seu objetivo principal, que é adotar uma agenda ambiental entre as instituições para promover práticas sustentáveis e, assim, contribuir para que o Brasil atinja as metas estabelecidas pela sua NDC.

Tabela 6 - Instituições aderidas a A3P

Nível de Governo	N.º de Instituições	Percentual	Poder	N.º de Instituições	Percentual
Federal	74	30%	Executivo	190	77%
Estadual	62	25%	Legislativo	22	9%
Distrital	8	3%	Judiciário	18	7%
Municipal	103	42%	Independente	17	7%

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

Na base de dados levantada, nota-se que somente 3% das instituições públicas que realizaram processos de aquisições de sistemas fotovoltaicos estão aderidas na A3P, demonstrando baixa adesão ao Programa do Ministério do Meio Ambiente.

Outro dado que se destaca são os números de empreendimentos promovidos pelos órgãos públicos, que representam somente 0,18% de todos os sistemas homologados na ANEEL, sendo instalados em 1.177 municípios, ou seja, somente 21% dos municípios brasileiros possuem sistemas fotovoltaicos adquiridos por órgãos públicos, demonstrando a falta de alinhamento estratégico em relação às políticas ambientais do país.

Em relação às políticas públicas para a promoção das energias renováveis, identifica-se que no Brasil há uma ausência de objetivos em longo prazo para o desenvolvimento do setor, possuindo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), mas, conforme Corrêa e Cário (2022), o documento é indicativo e informativo, não determinando ou planejando a expansão futura do setor.

Nota-se que os órgãos públicos municipais representam 42% das instituições que aderiram à A3P, tendo maior representatividade que os governos estaduais e federais, o que demonstra uma falta de estrutura nacional sobre a implementação de políticas públicas. A União, como ente com maior arrecadação e estrutura, tem um papel fundamental na construção das políticas de promoção das energias renováveis e na definição de objetivos estratégicos em longo prazo, com indicadores a serem alcançados pelas fontes de energia renováveis. O Governo Federal necessita instituir uma estrutura centralizada, a fim de compatibilizar os objetivos estratégicos, metas e os instrumentos sobre energias renováveis, pois se observa uma desarticulação e descoordenação entre os instrumentos e políticas (Corrêa; Cário, 2022).

Apesar do país ter estabelecido metas voluntárias no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) e realizar leilões para aquisição de energia solar e eólica, é importante observar que também promove leilões para fontes de energia fóssil, como gás natural e campos de petróleo (ANEEL, 2021). Isso tem resultado no aumento da presença de fontes de energia fóssil na matriz energética brasileira.

Nota-se que os investimentos em aquisições de energias fotovoltaicas são ações individualizadas dos órgãos públicos, não havendo políticas públicas estruturadas e articuladas que envolvam todos os entes da federação e que favoreçam o crescimento do setor de energias renováveis, indo na contramão dos principais países em desenvolvimento econômico. A China possui alta tecnologia e indústrias verdes que vêm sendo construídas desde o início dos anos 2000, quando o país asiático identificou a necessidade da transição energética de combustíveis fósseis para a energia limpa.

Os pesquisadores Silva (2019) e Corrêa e Cário (2022) apontam os leilões como o principal instrumento de expansão das energias renováveis, no entanto, não analisam a necessidade de políticas públicas estruturadas para o desenvolvimento da energia fotovoltaica.

Portanto, no presente estudo, destaca-se a ausência de um modelo eficaz para a geração de energia sustentável, o que leva as organizações a buscarem alternativas sazonais, como a utilização de sistemas fotovoltaicos para a produção de energia limpa. No entanto, vale ressaltar que esses sistemas representam apenas 1,78% de toda a capacidade instalada no país.

Um ponto de destaque adicional é a falta de objetivos em longo prazo para o

desenvolvimento das energias renováveis no Brasil. Conforme Brose (2022), o país promove investimentos em minas de carvão e na utilização de termelétricas para a geração de energia, em contraste com as políticas adotadas por outros países que promoveram a redução das emissões de gases de efeito estufa, pela adoção de sistemas de geração de energia limpa, como eólica e solar. Isso levanta questões sobre a eficácia do Programa Agenda Ambiental na Administração Pública (A3P).

2.5 Considerações Finais

As instituições públicas possuem um papel importante para o cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). No entanto, a ausência de um modelo governamental claro para a adoção de energia sustentável resulta na falta de um planejamento integrado entre as diferentes esferas de poder (federal, estadual e municipal). Isso, frequentemente, leva essas organizações a buscarem abordagens descentralizadas para a implementação de sistemas, muitas vezes sem um planejamento global e com iniciativas isoladas.

Essas aquisições influenciam no progresso em direção às metas estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. No entanto, para maximizar o seu impacto positivo, seria fundamental contar com uma estrutura governamental mais coesa que promova a coordenação e o alinhamento estratégico entre os diferentes níveis de governo. Tal abordagem otimizaria a contribuição das instituições públicas para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Entretanto, a ausência de uma política centralizada por parte do governo federal representa um desafio substancial para a consecução dessa coordenação e sinergia almejadas, ressaltando a importância de abordar essa questão em busca de um desenvolvimento mais sustentável.

As ações identificadas no Brasil, como descritas neste estudo, já resultaram na redução de 1.938.048 toneladas de CO₂. No entanto, é notável que a contribuição das entidades públicas representa apenas 1,78% da capacidade instalada de energia fotovoltaica no país, o que ressalta a falta de investimentos e políticas verdadeiramente eficazes em sustentabilidade.

Enquanto países como China, Alemanha e Índia lideram a transição global da matriz energética de combustíveis fósseis para energias renováveis com políticas robustas e investimentos significativos, o Brasil enfrenta desafios em desenvolver tecnologias de energia renovável, devido às iniciativas individuais desarticuladas, sem um planejamento nacional coordenado.

É relevante observar que 42% das ações relacionadas às energias renováveis no Brasil são realizadas em nível municipal, superando os esforços dos governos estaduais (25%) e federal (30%). Esse cenário destaca a importância das autoridades locais na promoção das energias renováveis e reforça a necessidade de uma coordenação mais eficaz em âmbito nacional para impulsionar uma transição energética mais abrangente.

Embora o Ministério do Meio Ambiente tenha estabelecido o Programa Agenda Ambiental na Administração Pública (A3P) para promover uma agenda ambiental entre as instituições e adotar práticas sustentáveis, observa-se uma adesão limitada, com apenas 247 instituições públicas associadas ao programa, uma vez que a participação não é obrigatória. Além disso, somente 3% das instituições públicas que adquiriram sistemas fotovoltaicos estão associadas à A3P. Essa realidade revela a ausência de uma política ambiental e sustentável centralizada no país, com cada órgão ou mesmo localidades dentro de um órgão implementando políticas independentes, o que pode resultar no uso ineficiente de recursos financeiros e na redução da eficácia das ações.

Os resultados apresentados neste estudo podem servir como base para a formulação de políticas públicas destinadas a promover e financiar a adoção de sistemas fotovoltaicos em órgãos públicos. Essa abordagem oferece vantagens econômicas e ambientais significativas, contribuindo para a redução das emissões de CO₂ na atmosfera e alinhando o Brasil com as metas do Acordo de Paris.

No contexto do debate sobre a centralização das ações do Governo Federal e o desenvolvimento de políticas para fontes de energia renovável, este capítulo ressalta a necessidade de políticas públicas brasileiras com uma visão em longo prazo para uma transição energética sustentável.

Possíveis áreas de pesquisa futura podem abranger o planejamento estratégico, investimentos na indústria nacional e inovações tecnológicas, considerando a vasta capacidade do país para expandir a energia solar.

Além disso, o estudo preenche uma lacuna na pesquisa sobre o tema ao não encontrar na literatura a verificação sobre as aquisições de sistemas fotovoltaicos realizados por órgãos públicos e tampouco se tais aquisições estão contribuindo com a redução de gases de efeito estufa, correlacionando-se os resultados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável do Acordo de Paris.

Adicionalmente, a partir do estudo foi desenvolvido um produto tecnológico que permite o cálculo da quantidade de gás carbônico evitado pelos sistemas fotovoltaicos, disponibilizando uma ferramenta de gestão ambiental, promovendo a transparência de dados

concretos sobre a quantidade de CO₂ evitado e os benefícios ambientais tangíveis dos sistemas fotovoltaicos.

CAPÍTULO 3: CONCILIANDO O CRESCIMENTO ENERGÉTICO SUSTENTÁVEL E A SEGURANÇA ALIMENTAR: DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM TERRAS AGRÍCOLAS NO BRASIL

Resumo

Este estudo teve como objetivo central analisar o desafio da introdução de sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas brasileiras, considerando a posição do país como líder global na produção de alimentos, e examinar o possível *trade-off* entre a produção agrícola e a geração de energia fotovoltaica. Destaca-se a relevância do país como líder global na produção de alimentos e maior produtor de soja. Nesse contexto, a pesquisa ressalta a necessidade de explorar estratégias sustentáveis e inovadoras para integrar eficientemente a energia solar nas atividades agrícolas brasileiras, considerando a influência única do Brasil no cenário agrícola global. A pesquisa abordou essa questão complexa pela análise de 4.741 artigos revisados por pares, publicados em inglês, com o intuito de avaliar a existência de políticas públicas e regulamentações para projetos de energia fotovoltaica em terras agrícolas brasileiras. Os resultados revelaram uma lacuna importante nesse aspecto, destacando a ausência de diretrizes específicas para a regulação de usinas fotovoltaicas em áreas destinadas à produção de alimentos. Essa falta de orientação emergiu como uma possível causa do dilema identificado. Diante desse cenário, a pesquisa sugere a promoção de diálogos entre o governo, produtores rurais, sociedade civil e empresários do setor fotovoltaico e a realização de novas pesquisas para identificar as melhores regiões e áreas para a implantações de sistemas fotovoltaicos. O objetivo dessas discussões é formular políticas públicas que promovam a integração sustentável dessas tecnologias em terras agrícolas. As informações apresentadas enfatizam a necessidade de encontrar soluções eficazes que conciliem a produção de alimentos e a expansão da energia fotovoltaica, visando o desenvolvimento sustentável do agronegócio brasileiro.

Palavras-chave: energia fotovoltaica; *trade-off*; conflito de uso da terra; produção de alimentos; geração de energia.

Reconciling sustainable energy growth and food security: Challenges of implementing photovoltaic energy on agricultural land in Brazil

Abstract

This study's central objective was to analyze the challenge of introducing photovoltaic systems on Brazilian agricultural land, considering the country's position as a global leader in food production, and to examine the possible trade-off between agricultural production and photovoltaic energy generation. The country's relevance as a global leader in food production and the largest producer of soybeans stands out. In this context, the research highlights the need to explore sustainable and innovative strategies to efficiently integrate solar energy into Brazilian agricultural activities, considering Brazil's unique influence on the global agricultural scenario. The research addressed this complex issue through the analysis of 4,741 peer-reviewed articles, published in English, with the aim of evaluating the existence of public policies and regulations for photovoltaic energy projects on Brazilian agricultural land. The

results revealed an important gap in this aspect, highlighting the absence of specific guidelines for the regulation of photovoltaic plants in areas destined for food production. This lack of guidance emerged as a possible cause of the identified dilemma. Given this scenario, the research suggests promoting dialogues between the government, rural producers, civil society and businesspeople in the photovoltaic sector and carrying out new research to identify the best regions and areas for implementing photovoltaic systems. The objective of these discussions is to formulate public policies that promote the sustainable integration of these technologies on agricultural lands. The information presented emphasizes the need to find effective solutions that reconcile food production and the expansion of photovoltaic energy, aiming for the sustainable development of Brazilian agribusiness.

Keywords: photovoltaic energy; trade-off; land use conflict; food production; energy generation.

3.1 Introdução

A necessidade da descarbonização do setor elétrico, o custo da energia ao consumidor e a realização de acordos internacionais para promover a redução dos gases de efeito estufa provocaram uma busca por fontes renováveis de energia. As fontes comumente usadas, como biomassa, energia hidrelétrica, geotérmica, eólica e solar têm se destacado nesse contexto.

Com a redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos e das despesas de instalação, além do aumento na conscientização sobre a necessidade da transição para fontes sustentáveis, observa-se um impulso para a adoção da energia solar fotovoltaica como uma opção viável e atrativa.

Em 2021, a energia fotovoltaica contribuiu com 3,6% de toda a geração de energia elétrica global, equivalente a, aproximadamente, 1 terawatt-hora (Maka; Alabid, 2022). As projeções indicam um crescimento significativo, estimando que a capacidade instalada atinja 8.500 gigawatts até 2050 (Gielen *et al.*, 2019). Essa ascendente tendência global na energia solar fotovoltaica também se reflete no contexto brasileiro, em que o país conta com 28,9 megawatts de potência instalada, representando expressivos 13,1% da matriz energética nacional (ABSOLAR, 2023).

A energia solar, mediante as tecnologias contemporâneas de conversão de energia, surge como uma fonte relativamente disseminada para a produção de eletricidade, demandando extensas áreas para a captação da radiação, uma vez que os empreendimentos de grande porte de sistemas de energia solar podem abranger vastas extensões de terra, variando desde centenas até milhares de acres, dependendo da sua capacidade (Katkar *et al.*, 2021).

À medida que a utilização da energia solar se expande nas terras agrícolas do país, uma

série de elementos influenciam as escolhas de localização. Essas vão desde as considerações sobre a compensação entre a geração de energia e a produção agrícola até a busca pela diversificação de fontes de renda (Moore *et al.*, 2022).

Conforme destacado por Malaquias, Silva, Junior, Neto e Albertin (2023), agricultores brasileiros estão buscando a implementação de sistemas fotovoltaicos devido aos benefícios que oferecem, tais como a redução nos custos de produção de alimentos e a utilização de áreas não produtivas para a geração de energia, entre outros aspectos. Os autores ressaltam que a expansão desses sistemas entre os agricultores pode ser promovida pela disseminação eficaz de informações sobre as suas vantagens.

Entretanto, Marrou, Wéry, Dufour e Dupraz (2013) destacam que a utilização de terras agrícolas para a geração de energia suscita preocupações em relação à segurança alimentar. De acordo com o UNICEF (2021), cerca de 2,3 bilhões de pessoas enfrentaram insegurança alimentar moderada ou grave e 924 milhões de pessoas experimentaram falta de alimentos em 2021.

O Brasil desempenha um papel crucial na produção global de alimentos, sendo, atualmente, o maior produtor mundial de soja, com uma colheita de 156 milhões de toneladas na safra 2022/23, representando 42,2% da safra mundial (USDA, 2023). No setor de carnes, o país produziu 10,35 milhões de toneladas de carne bovina, exportando 2,89 milhões de toneladas (USDA, 2023), consolidando a sua posição como um dos principais exportadores globais de grãos e carnes. Assim, o potencial conflito entre o uso de terras produtivas para a geração de energia e a produção de alimentos no Brasil pode acarretar consequências globais significativas em relação à segurança alimentar.

Esta pesquisa realizou uma revisão bibliométrica da literatura, com o foco em identificar alternativas que possam conciliar eficientemente dois usos da terra frequentemente em conflito. O estudo se dedica a investigar o potencial *trade-off* entre a produção de alimentos e a geração de energia por sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas no Brasil. Além disso, busca-se abordar as implicações sociais e políticas inerentes a essa complexa problemática, com o intuito de fornecer informações valiosas para enfrentar esse desafio multifacetado.

3.2 Referencial Teórico

Em 2022, a capacidade global acumulada de energia solar fotovoltaica atingiu a marca de 1,2 terawatts (TW), registrando um aumento significativo de 240 gigawatts (GW) em 2021 (IRENA, 2023). A China lidera a lista global de potência instalada para geração de energia

solar, alcançando 392 GW, enquanto o Brasil se alçou para a oitava posição mundial, com 28,9 GW de potência instalada (IRENA, 2023).

À medida que a implementação de sistemas fotovoltaicos se expande globalmente, a questão dos conflitos de uso da terra entre a produção de alimentos e a geração de energia se torna proeminente (Katkar *et al.*, 2021). A localização estratégica desses empreendimentos requer condições geográficas favoráveis, incluindo incidência solar, topografia adequada e insolação abundante.

Pesquisadores como Sargentis *et al.* (2021) apontam que as terras agrícolas são particularmente adequadas para a implantação de sistemas fotovoltaicos, devido à sua topografia relativamente plana, insolação abundante e condições climáticas moderadas. No entanto, as mesmas áreas são frequentemente alvo de investidores em parques solares de grande escala, sendo estimado que um parque solar de 1 MW requer, aproximadamente, 2,6 hectares de área de desenvolvimento, como observado em um estudo realizado na Planície da Tessália, Grécia.

A necessidade de expandir a capacidade energética está diretamente ligada ao aumento populacional, mas é crucial considerar a demanda internacional por alimentos. O UNICEF (2021) destaca que 670 milhões de pessoas ainda enfrentarão a fome até 2030 e a situação é agravada pelos impactos da guerra na Ucrânia, que interrompe as cadeias de suprimentos internacionais.

No cenário brasileiro, a insegurança alimentar atingiu 70,3 milhões de pessoas em 2022, conforme dados da FAO (2023). Para o Brasil, um dos principais players no mercado internacional de alimentos, o impacto da implantação de sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas é uma consideração crucial. O país é o maior exportador mundial de soja, representando 52% do total exportado na safra 2021-2022 e desempenha um papel significativo na produção de milho, carne bovina e outros produtos agropecuários (USDA, 2023).

Diante desse contexto, torna-se essencial avaliar os impactos potenciais da implementação de sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas no Brasil. Soluções como os sistemas agrivoltaicos, apresentados por Dupraz *et al.* (2011), que conciliam a produção agrícola com a geração de energia no mesmo espaço, podem representar uma abordagem promissora.

No entanto, é importante reconhecer que a adoção de sistemas agrivoltaicos não é isenta de desafios. Algumas culturas cultivadas à sombra dos módulos fotovoltaicos podem apresentar redução na produção em comparação com cultivos em campo aberto e o sombreamento pode influenciar na qualidade dos alimentos (Weselek *et al.*, 2019).

A resistência de alguns agricultores à prática de agrivoltaicos (Moore *et al.*, 2022) destaca a complexidade do debate. Medidas governamentais e administrativas são sugeridas por Katkar *et al.* (2021) como estratégias para mitigar impactos negativos, como evitar concentração local de fazendas solares.

Portanto, a busca pela sustentabilidade exige uma gestão cuidadosa dos *trade-offs*. Comprometer-se com a eficiência energética não deve prejudicar a segurança alimentar e decisões informadas devem ser tomadas, considerando os conflitos entre objetivos divergentes, representados pelos *trade-offs* (Morrison-Saunders; Pope, 2013).

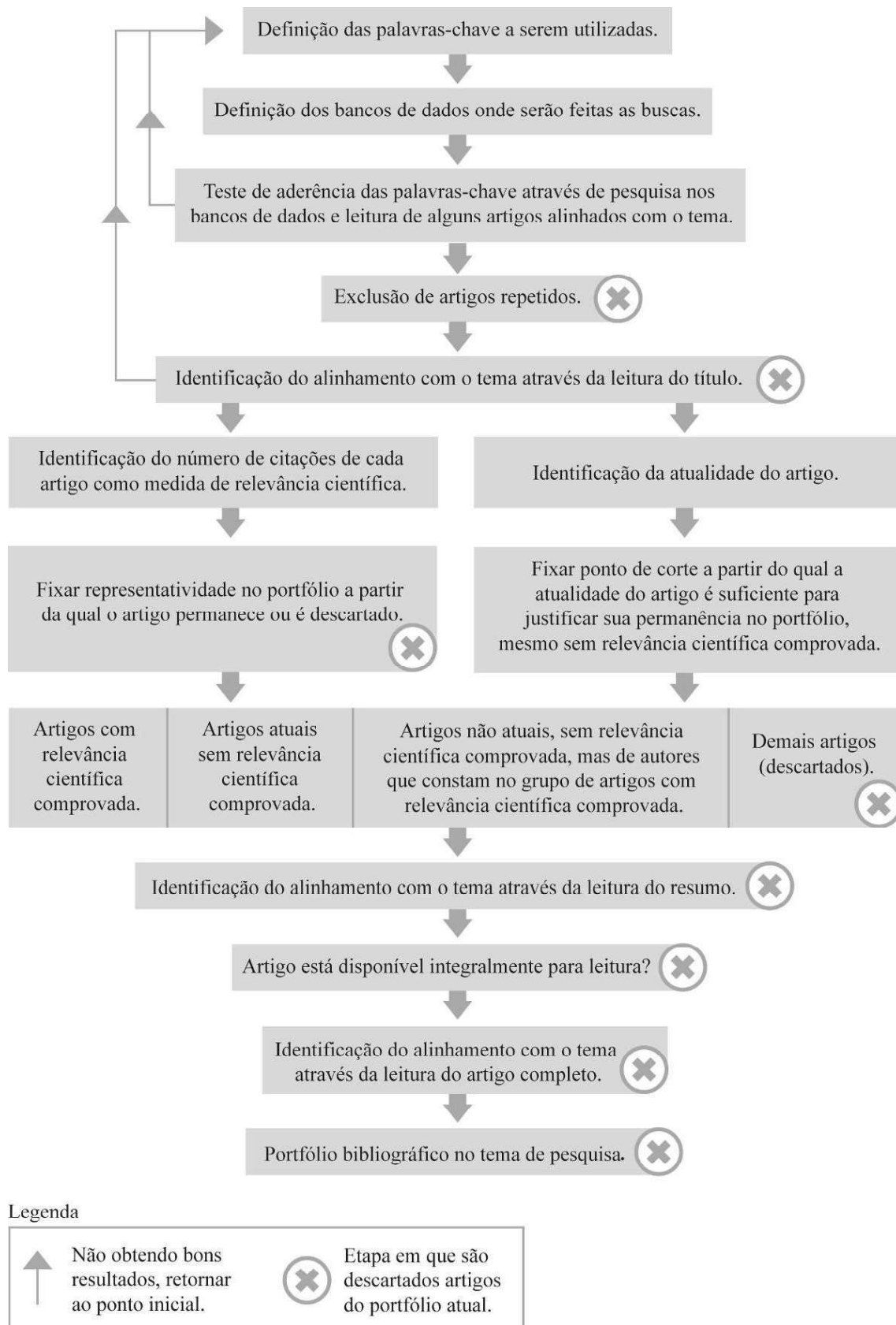
3.3 Procedimentos Metodológicos

Este estudo pode ser classificado como descritivo, pois, de acordo com a definição de Vergara (2006), ele apresenta características específicas de um fenômeno, ou seja, descreve os principais aspectos das publicações científicas sobre o potencial impacto na produção de alimentos, considerando o desafio da expansão das usinas fotovoltaicas em terras agrícolas. Quanto à abordagem metodológica, utilizando as categorias propostas por Richardson e Social (2008), o estudo é caracterizado como qualitativo.

A abordagem qualitativa foi escolhida para fundamentar a coleta de dados necessários à construção de um Portfólio Bibliográfico. Com o objetivo de explorar as questões apresentadas na pesquisa, foi conduzida uma revisão bibliométrica da literatura. Conforme a definição de Cook, Mulrow e Haynes (1997), uma revisão sistemática propõe um processo científico replicável e transparente, permitindo estabelecer uma base que contribui para o avanço do conhecimento em um campo específico e o desenvolvimento de teorias.

Estudos acadêmicos em distintas áreas têm empregado o método Proknow-C, para criação de um portfólio bibliográfico com os artigos mais relevantes do tema da pesquisa, portanto, para que o objetivo deste trabalho pudesse ser alcançado, adotou-se a técnica de revisão sistemática de literatura, utilizando o instrumento de intervenção Knowledge Development Process - Construtivist (ProcKnow-C), proposto por Ensslin *et al.* (2010), para guiar o processo de busca e seleção dos artigos analisados neste capítulo.

Figura 1 - Metodologia de construção do conhecimento Proknow-C

Fonte: Ensslin *et al.* (2010)

No presente estudo são utilizadas as fases apresentadas a seguir.

3.3.1 Seleção do Portfólio Bibliográfico

Após a definição do tema da pesquisa, foram determinadas as palavras-chave necessárias para a busca de artigos científicos relevantes. Na sequência, verificou-se a adequação das palavras-chave ao tema da pesquisa e se conduziu a busca de artigos na base de dados selecionada, resultando na construção do Portfólio Bibliográfico.

Para formatar o PB, seguiram-se três etapas. Primeiramente, eliminaram-se os artigos duplicados. Em seguida, analisaram-se os títulos dos artigos para descartar aqueles que não se alinhavam ao tema. Na terceira etapa, foi avaliada relevância científica dos artigos, com base no número de citações de cada artigo. Foi estabelecido um ponto de corte de 80%, calculando, assim, a representatividade de cada artigo no PB. Os artigos classificados como reconhecidos cientificamente passam por uma análise do resumo e aqueles alinhados com o tema permanecem no PB. Nessa fase, cria-se uma lista de autores desses artigos, formando o banco de autores. Para artigos cuja relevância ainda não está confirmada, considera-se o ano de publicação.

Artigos publicados nos últimos três anos são submetidos a uma nova análise de resumo. Nos artigos mais antigos, verifica-se se algum dos autores faz parte do banco de autores formado pelos artigos com relevância científica já confirmada. Em caso afirmativo, realiza-se a leitura do resumo; caso contrário, descarta-se o artigo. A análise do resumo determina se o artigo está alinhado com o tema da pesquisa, o que determina a sua permanência ou descarte. Artigos que não estão disponíveis integralmente para consulta são descartados.

Por fim, realiza-se a leitura completa dos artigos para confirmar o alinhamento com o tema de pesquisa. Artigos considerados alinhados permanecem na lista do pesquisador e compõem o Portfólio Bibliográfico.

3.3.2 Análise bibliométrica do PB

A análise do PB tem por objetivo evidenciar informações sobre o portfólio bibliográfico obtido pela análise e pela quantificação das suas características (Ensslin *et al.*, 2010). As principais análises são: periódicos nos quais os artigos estão publicados; verificar autores de destaque; análise das palavras-chave e as cocitações.

A pesquisa da literatura foi conduzida utilizando a base de dados Web of Science, garantindo a inclusão de estudos de alta qualidade revisados por pares nos nossos resultados (Denyer; Tranfield, 2009). Foi direcionada uma busca abrangente por artigos revisados por pares em língua inglesa, com o propósito de abranger os conhecimentos mais recentes disponíveis, em particular no contexto da implantação de sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas. Essa pesquisa foi realizada no mês de junho de 2023, sem restrição de período, o que nos possibilitou abranger artigos publicados até junho de 2023. Observa-se que foi estabelecido um período específico para as palavras-chave “*agriculture and solar energy*” e “*photovoltaic energy and food production*”, devido à grande quantidade de artigos relacionados à aplicação da energia solar na agricultura.

Tabela 1 - Resumo da Pesquisa do banco de dados

Palavras-chave	Filtros	Quantidade
<i>agriculture and solar energy</i>	2019-2023	3760
<i>photovoltaic energy and food production</i>	2019-2023	320
<i>agriculture and photovoltaics</i>	Sem delimitação de período	445
<i>food production and photovoltaics</i>	Sem delimitação de período	104
<i>fertile soil and photovoltaics</i>	Sem delimitação de período	1
<i>solar energy versus agriculture</i>	Sem delimitação de período	75
<i>photovoltaics versus agriculture</i>	Sem delimitação de período	9
<i>photovoltaic energy and productive land</i>	Sem delimitação de período	24
<i>photovoltaic energy versus productive land</i>	Sem delimitação de período	1
<i>solar energy versus productive land</i>	Sem delimitação de período	2

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do *Web of Science* (2023)

Foi utilizada a ferramenta VOSviewer, software disponível para criar e explorar mapas bibliométricos baseados em redes (Boyack *et al.*, 2018). A escolha do *software* para análises bibliométricas se justifica por: I) possuir uma interface gráfica intuitiva; II) compatibilidade com a base de dados Web of Science e III) ser *freeware*, livre de custos adicionais.

Na pesquisa, utilizando o conjunto de palavras-chave exibido na Tabela 1, todas as informações provenientes da base de dados do Web of Science, incluindo título, resumo, autores, ano de publicação, local de publicação, citações, país e palavras-chave foram exportadas para planilhas do Microsoft Excel. Os resultados foram consolidados em um único conjunto (n=4.741) e as duplicatas (n=455) foram identificadas e, posteriormente, removidas do banco de dados consolidado.

No passo seguinte, que se refere à leitura dos títulos dos artigos com o objetivo de verificar a adequabilidade do artigo ao tema de pesquisa, uma grande parte dos artigos

foi descartada e permaneceram no processo 460 artigos, que foram considerados alinhados com o tema de pesquisa. Nessa etapa, foram considerados os artigos que tratam sobre o impacto da implantação de sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas, analisando, pelo menos, os impactos sociais, ambientais e econômicos. No total, 3.826 artigos foram excluídos pelos seguintes motivos: I) o conteúdo não estava alinhado com o foco desta pesquisa; II) o acesso restrito aos artigos impossibilitou a sua inclusão na análise e III) os artigos foram considerados excessivamente técnicos, muitos dos quais se concentravam em pesquisas relacionadas à implementação de sistemas fotovoltaicos em contextos como irrigação, secagem de grãos, estufas e agrovoltáico, sem abordar adequadamente o impacto dessa implementação nas terras agrícolas.

Após a análise do banco seguindo o método Proknow-C, foram selecionados 74 artigos alinhados ao tema que fazem parte do portfólio bibliográfico.

Tabela 2 - Portfólio Bibliográfico do tema de pesquisa

#	Título	Autores	Citações	Ano
1	Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes	Dupraz, C; Marrou, H; Talbot, G; Dufour, L; Nogier, A; Ferard, Y	263	2011
2	Agri-voltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands	Barron-Gafford, GA; Pavao-Zuckerman, MA; Minor, RL; Sutter, LF; Barnett-Moreno, I; Blackett, DT; Thompson, M; Dimond, K; Gerlak, AK; Nabhan, GP; Macknick, JE	167	2019
3	Renewable energy and food supply: Will there be enough land?	Nonhebel, S	138	2005
4	Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review	Weselek, A; Ehmann, A; Zikeli, S; Lewandowski, I; Schindele, S; Hogy, P	126	2019
5	Photovoltaic agriculture - New opportunity for photovoltaic applications in China	Xue, JL	95	2017
6	Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications	Schindele, S; Trommsdorff, M; Schlaak, A; Obergfell, T; Bopp, G; Reise, C; Braun, C; Weselek, A; Bauerle, A; Hogy, P; Goetzberger, A; Weber, E	90	2020
7	Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops	Valle, B; Simonneau, T; Sourd, F; Pechier, P; Hamard, P; Frisson, T; Ryckewaert, M; Christophe, A	86	2017

8	Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands	Adeh, EH; Good, SP; Calaf, M; Higgins, CW	80	2019
9	Agrivoltaic potential on grape farms in India	Malu, PR; Sharma, US; Pearce, JM	74	2017
10	Photovoltaics in agriculture: A case study on decision making of farmers	Brudermann, T; Reinsberger, K; Orthofer, A; Kislinger, M; Posch, A	72	2013
11	Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany	Trommsdorff, M; Kang, J; Reise, C; Schindele, S; Bopp, G; Ehmman, A; Weselek, A; Hogy, P; Oberfell, T	61	2021
12	Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics	Pascaris, AS; Schelly, C; Burnham, L; Pearce, JM	43	2021
13	Land-Sparing Opportunities for Solar Energy Development in Agricultural Landscapes: A Case Study of the Great Central Valley, CA, United States	Hoffacker, MK; Allen, MF; Hernandez, RR	42	2017
14	Interplay between the potential of photovoltaic systems and agricultural land use	Dias, L; Gouveia, JP; Lourenco, P; Seixas, J	38	2019
15	Trade-off between photovoltaic systems installation and agricultural practices on arable lands: An environmental and socio-economic impact analysis for Italy	Sacchelli, S; Garegnani, G; Geri, F; Grilli, G; Paletto, A; Zambelli, P; Ciolli, M; Vettorato, D	38	2016
16	Key factors affecting the adoption willingness, behavior, and willingness-behavior consistency of farmers regarding photovoltaic agriculture in China	Li, B; Ding, JQ; Wang, JQ; Zhang, B; Zhang, LX	36	2021
17	A review of research on agrivoltaic systems	Al Mamun, MA; Dargusch, P; Wadley, D; Zulkarnain, NA; Aziz, AA	30	2022
18	Optimal combination of bioenergy and solar photovoltaic for renewable energy production on abandoned cropland	Leirpoll, ME; Naess, JS; Cavalett, O; Dorber, M; Hu, XP; Cherubini, F	29	2021
19	A First Investigation of Agriculture Sector Perspectives on the Opportunities and Barriers for Agrivoltaics	Pascaris, AS; Schelly, C; Pearce, JM	28	2020
20	Determination of the optimal location for constructing solar photovoltaic farms based on multi-criteria decision system and Dempster-Shafer theory	Mokarram, M; Mokarram, MJ; Khosravi, MR; Saber, A; Rahideh, A	27	2020

21	Conceptual Design and Rationale for a New Agrivoltaics Concept: Pasture-Raised Rabbits and Solar Farming	Lytle, W; Meyer, TK; Tanikella, NG; Burnham, L; Engel, J; Schelly, C; Pearce, JM	22	2021
22	Agrivoltaics Align with Green New Deal Goals While Supporting Investment in the US' Rural Economy	Proctor, KW; Murthy, GS; Higgins, CW	21	2021
23	Application of Photovoltaic Systems for Agriculture: A Study on the Relationship between Power Generation and Farming for the Improvement of Photovoltaic Applications in Agriculture	Cho, J; Park, SM; Park, AR; Lee, OC; Nam, G; Ra, IH	20	2020
24	An Efficient Structure of an Agrophotovoltaic System in a Temperate Climate Region	Kim, S; Kim, S; Yoon, CY	15	2021
25	Detection of Fast Landscape Changes: The Case of Solar Modules on Agricultural Land	Marcheggiani, E; Gulinck, H; Galli, A	15	2013
26	Research on Coupling Coordination Development for Photovoltaic Agriculture System in China	Chen, J; Liu, YP; Wang, LJ	15	2019
27	Agricultural Land or Photovoltaic Parks? The Water-Energy-Food Nexus and Land Development Perspectives in the Thessaly Plain, Greece	Sargentis, GF; Siamparina, P; Sakki, GK; Efstratiadis, A; Chiotinis, M; Koutsoyiannis, D	9	2021
28	Designing solar farms for synergistic commercial and conservation outcomes	Nordberg, EJ; Caley, MJ; Schwarzkopf, L	9	2021
29	An analytical framework to estimate the economics and adoption potential of dual land-use systems: The case of agrivoltaics	Feuerbacher, A; Laub, M; Hogy, P; Lippert, C; Pataczek, L; Schindele, S; Wieck, C; Zikeli, S	8	2021
30	Is it a good time to develop commercial photovoltaic systems on farmland? An American-style option with crop price risk	Kim, B; Kim, C; Han, S; Bae, J; Jung, J	8	2020
31	Strategic land use analysis for solar energy development in New York State	Katkar, VV; Sward, JA; Worsley, A; Zhang, KM	7	2021
32	Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food, environment, economy, and society	Kumpanalaisatit, M; Setthapun, W; Sintuya, H; Pattiya, A; Jansri, SN	6	2022

33	Design of agrivoltaic system to optimize land use for clean energy-food production: a socio-economic and environmental assessment	Giri, NC; Mohanty, RC	5	2022
34	Global sensitivity based prioritizing the parametric uncertainties in economic analysis when co-locating photovoltaic with agriculture and aquaculture in China	Jing, R; He, Y; He, JJ; Liu, Y; Yang, SB	5	2022
35	The role of soils in provision of energy	Smith, J; Farmer, J; Smith, P; Nayak, D	5	2021
36	A Spatially Highly Resolved Ground Mounted and Rooftop Potential Analysis for Photovoltaics in Austria	Mikovits, C; Schuppenlehner, T; Scherhauser, P; Schmidt, J; Schmalzl, L; Dworzak, V; Hampl, N; Sposato, RG	4	2021
37	Agricultural Land: Crop Production or Photovoltaic Power Plants	Havrysh, V; Kalinichenko, A; Szafranek, E; Hruban, V	4	2022
38	Combined land use of solar infrastructure and agriculture for socioeconomic and environmental co-benefits in the tropics	Choi, CS; Ravi, S; Siregar, IZ; Dwiyanti, FG; Macknick, J; Elchinger, M; Davatzes, NC	4	2021
39	Comparison of Yield and Yield Components of Several Crops Grown under Agro-Photovoltaic System in Korea	Jo, H; Asekova, S; Bayat, MA; Ali, L; Song, JT; Ha, YS; Hong, DH; Lee, JD	4	2022
40	Economic Implications of Agricultural Land Conversion to Solar Power Production	Farja, Y; Maciejczak, M	4	2021
41	Environmental and economic performance assessment of integrated conventional solar photovoltaic and agrophotovoltaic systems	Junedi, MM; Ludin, NA; Kathleen, PR; Hamid, NH; Hasila, J; Affandi, NAA	4	2022
42	Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals	Walston, LJ; Barley, T; Bhandari, I; Campbell, B; McCall, J; Hartmann, HM; Dolezal, AG	4	2022
43	Smart Shift from Photovoltaic to Agrivoltaic System for Land-Use Footprint	Giri, NC; Mohanty, RC; Mishra, SP	4	2021
44	Study on Performance and Economic Efficiency of Solar Power on Agricultural Land: A case study in Central Region, Vietnam	Huyen, CTT; Phap, VM; Nga, NT	4	2021

45	Agrivoltaics: The Environmental Impacts of Combining Food Crop Cultivation and Solar Energy Generation	Wagner, M; Lask, J; Kiesel, A; Lewandowski, I; Weselek, A; Hogy, P; Trommsdorff, M; Schnaiker, MA; Bauerle, A	3	2023
46	Sustainable land use with agrivoltaics: photovoltaics diffusion in harmony with food production. Scenario analysis on the agricultural land demand by photovoltaics in Germany until 2050	Schindele, S	3	2021
47	Agrivoltaic in Chile - Integrative solution to use efficiently land for food and energy production and generating potential synergy effects shown by a pilot plant in Metropolitan region	Gese, P; Martinez-Conde, FM; Ramirez-Sagner, G; Dinter, F	2	2019
48	Ground-Mounted Photovoltaic and Crop Cultivation: A Comparative Analysis	Sacchelli, S; Havrysh, V; Kalinichenko, A; Suszanowicz, D	2	2022
49	Solar power promotion plans, energy market liberalization, and farmland prices-Empirical evidence from Taiwan	Lee, B; Chang, HH; Wang, SY	2	2021
50	A multi-objective assessment for the water-energy-food nexus for rural distributed energy systems	Rodriguez-Gutierrez, JE; Castillo-Molar, A; Fuentes-Cortes, LF	1	2022
51	A new predictive model for the design and evaluation of bifacial photovoltaic plants under the influence of vegetation soils	Rodriguez-Pastor, DA; Ildefonso-Sanchez, AF; Soltero, VM; Peralta, ME; Chacartegui, R	1	2023
52	Agrivoltaic, a Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production in Perpetual Mutation: A Comprehensive Review	Sarr, A; Soro, YM; Tossa, AK; Diop, L	1	2023
53	Agrovoltatics Farming Design and Simulation	John, RS; Mahto, RV	1	2021
54	An analysis of the social and private return to land use change from agriculture to renewable energy production in Ireland	Geoghegan, C; O'Donoghue, C	1	2023
55	Can we have clean energy and grow our crops too? Solar siting on agricultural land in the United States	Moore, S; Graff, H; Ouellet, C; Leslie, S; Olweean, D	1	2022

56	Circularity and landscape experience of agrivoltaics: A systematic review of literature and built systems	Sirnik, I; Sluijsmans, J; Oudes, D; Stremke, S	1	2023
57	Criteria for Identifying More Favourable Areas for Photovoltaic Installations Case of East Spain	Guaita-Pradas, I; Marques-Perez, I; Segura, B; Gallego, A	1	2018
58	Crop Cultivation Underneath Agro-Photovoltaic Systems and Its Effects on Crop Growth, Yield, and Photosynthetic Efficiency	Lee, HJ; Park, HH; Kim, YO; Kuk, YI	1	2022
59	Estimating the economics and adoption potential of agrivoltaics in Germany using a farm-level bottom-up approach	Feuerbacher, A; Herrmann, T; Neuenfeldt, S; Laub, M; Gocht, A	1	2022
60	How to manage land use conflict between ecosystem and sustainable energy for low carbon transition?: Net present value analysis for ecosystem service and energy supply	Kim, J; Park, E; Song, CL; Hong, MA; Jo, HW; Lee, WK	1	2022
61	Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape	Lovering, JR; Swain, M; Blomqvist, L; Hernandez, R	1	2022
62	Social acceptance of dual land use approaches: Stakeholders' perceptions of the drivers and barriers confronting agrivoltaics diffusion	Torma, G; Aschemann-Witzel, J	1	2023
63	The Agrivoltaic Potential of Canada	Jamil, U; Bonnington, A; Pearce, JM	1	2023
64	A Cost-Benefit Analysis for Utility-Scale Agrivoltaic Implementation in Italy	Di Francia, G; Cupo, P	0	2023
65	Advancement in Agriculture Approaches with Agrivoltaics Natural Cooling in Large Scale Solar PV Farms	Othman, NF; Ya'acob, ME; Lu, L; Jamaluddin, AH; Su, ASM; Hizam, H; Shamsudin, R; Jaafar, JN	0	2023
66	Analyzing the land and labour productivity of farms producing renewable energy: the Italian case study	Basso, A; Zolin, MB	0	2023
67	Does agrivoltaism reconcile energy and agriculture? Lessons from a French case study	Carrausse, R; de Sartre, XA	0	2023
68	Ductile, model-based feasibility assessment for non-irrigated agrivoltaic systems	Curioni, M; Galli, N; Rulli, MC; Leva, S; Manzolini, G	0	2022

69	Estimation Model of Agrivoltaic Systems Maximizing for Both Photovoltaic Electricity Generation and Agricultural Production	Yajima, D; Toyoda, T; Kirimura, M; Araki, K; Ota, Y; Nishioka, K	0	2023
70	HOW AGRIVOLTAICS CAN BE USED AS A CROP PROTECTION SYSTEM	Willockx, B; Kladas, A; Lavaert, C; Uytterhaegen, B; Cappelle, J	0	2022
71	How to reconcile renewable energy and agricultural production in a drying world	Schweiger, AH; Pataczek, L	0	2023
72	Planning for Future Solar Farm Development in North Carolina: A Geographic Food-Energy-Water Approach	Curtis, S; Etheridge, R; Malali, P; Peralta, AL; Filho, F	0	2020
73	Solar array placement, electricity generation, and cropland displacement across California's Central Valley	Stid, JT; Shukla, S; Anctil, A; Kendall, AD; Rapp, J; Hyndman, DW	0	2022
74	The land use impact of renewable energy sprawl in South Africa	Gaeatlholve, VT; Langerman, KE	0	2022

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do *Web of Science* (2023)

3.4 Resultados da pesquisa

No estudo foi possível constatar que as principais nações que lideram a geração de energia por sistemas fotovoltaicos, conforme apontado por Moore *et al.* (2022) e Nonhebel (2005), geralmente, carecem de legislações específicas voltadas para a utilização de áreas agrícolas na implementação de sistemas fotovoltaicos.

As restrições legais para a construção de empreendimentos frequentemente se concentram em aspectos como a proximidade de cursos d'água e córregos, áreas sob domínio de estradas e rodovias, assim como a proximidade de áreas urbanas.

No âmbito brasileiro, nos leilões de geração de energia elétrica realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), entre 2012 e 2022, não foram estabelecidas restrições específicas relacionadas à utilização de terras agrícolas para a geração de energia e a legislação sobre o tema se mostra, em grande medida, limitada.

Diversos fatores podem contribuir para *trade-offs* no uso de terras agrícolas, incluindo expansão urbana, desmatamento, políticas governamentais e a implementação de energias renováveis, conforme destacado por Magalhães, Danilevicz e Palazzo (2019). Nesse contexto, a busca por lucro imediato, muitas vezes, leva os agricultores a tomarem decisões que visam maximizar seus ganhos financeiros em curto prazo. Contudo, gerenciar esses *trade-offs* de

maneira sustentável se torna um desafio crucial, visando conciliar a segurança alimentar com a conservação ambiental.

Os pesquisadores Dupraz *et al.* (2011) e Moore *et al.* (2022) apontam para a adoção dos sistemas agrivoltaicos como uma alternativa para mitigar esse conflito. Essa abordagem, que combina a produção de alimentos e a geração de energia simultaneamente, apresenta potencial para aumentar a renda dos agricultores. No entanto, alguns pesquisadores, como Weselekk *et al.* (2019), destacam que nem todas as culturas são adequadas para esse modelo, sendo essencial considerar cuidadosamente as características específicas de cada local e cultura. Essa estratégia oferece uma oportunidade valiosa para alinhar os interesses econômicos dos agricultores, com a necessidade de promover práticas sustentáveis que conciliem produção de alimentos e energia de maneira harmoniosa.

Ao analisar o portfólio bibliométrico, observou-se um crescente interesse da comunidade acadêmica em pesquisas relacionadas à implantação de usinas fotovoltaicas em terras agrícolas, com a publicação de 69 artigos entre 2017 e junho de 2023.

A Tabela 3 indica que as publicações em periódicos constituíram a principal via de divulgação dos resultados da pesquisa. As revistas acadêmicas com maior número de publicações foram *Renewable & Sustainable Energy Reviews e Sustainability, Agronomy-Basel, Energies, Renewable Energy* (n=4), *Journal of Cleaner Production* (n=3), *Agriculture - Basel, Applied Energy, Energy Policy, Energy Research & Social Science, Land Use Police, Scientific Reports, Sustainable Energy Technologies and Assessments* (n=2). Os dez periódicos mais prolíficos representaram 51% dos artigos analisados.

Por fim, os resultados mostram que o tema do presente estudo é adequado para a publicação em uma variedade de revistas especializadas (n=22), que focam, principalmente, em questões de sustentabilidade, meio ambiente e energia.

Tabela 3 - Número de publicações por revista

Fonte	Artigos
<i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i>	9
<i>Sustainability</i>	6
<i>Agronomy-Basel</i>	4
<i>Energies</i>	4
<i>Renewable Energy</i>	4
<i>Journal of Cleaner Production</i>	3
<i>Agriculture-Basel</i>	2
<i>Applied Energy</i>	2
<i>Energy Policy</i>	2

<i>Energy Research & Social Science</i>	2
<i>Land Use Policy</i>	2
<i>Scientific Reports</i>	2
<i>Sustainable Energy Technologies and Assessments</i>	2
<i>12th International Conference on Simulation and Modelling in the Food</i>	1
<i>2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference</i>	1
<i>2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)</i>	1
<i>2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical</i>	1
<i>Agricultural Systems</i>	1
<i>Agronomy for Sustainable Development</i>	1
<i>Ambient Science</i>	1
<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>	1
<i>Computational Science and its Applications - ICCSA 2013, pt iv</i>	1
<i>Energy Economics</i>	1
<i>Energy Sustainability and Society</i>	1
<i>Environmental Science & Technology</i>	1
<i>Frontiers in Environmental Science</i>	1
<i>Frontiers in Sustainable Food Systems</i>	1
<i>Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society</i>	1
<i>International Journal of Renewable Energy Research</i>	1
<i>ISPRS International Journal of Geo-Information</i>	1
<i>Journal of Productivity Analysis</i>	1
<i>Journal of Rural Studies</i>	1
<i>Nature Sustainability</i>	1
<i>Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences</i>	1
<i>Plants People Planet</i>	1
<i>Plos One</i>	1
<i>Proceedings of the Ises Solar World Conference 2019 and the IEA SHC</i>	1
<i>Processes</i>	1
<i>Science of the Total Environment</i>	1
<i>Solar Energy</i>	1
<i>South African Geographical Journal</i>	1
<i>Southeastern Geographer</i>	1
<i>Sustainable Production and Consumption</i>	1

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do *Web of Science* (2023)

Os Países Europeus e os Estados Unidos da América têm estado na vanguarda da publicação acadêmica em relação sistemas fotovoltaicos. Entre todos os artigos revisados, 44% tiveram primeiros autores que trabalham em uma instituição europeia. A Ásia se encontra com 23% de coautores, impulsionados pelo interesse da Coreia do Sul e China em energia limpa, principalmente, geração de energia a partir de sistemas fotovoltaicos. Em seguida, aparecem as Américas, com 22% de coautores.

Segundo Franco e Groesser (2021), os países em desenvolvimento apresentam

desvantagens em comparação com os casos europeu e chinês. Embora estejam sendo adotadas políticas de implantação de sistemas fotovoltaicos nesses países, há uma falta de investimentos governamentais para pesquisas acadêmicas.

Tabela 4 - Distribuição temporal da localização geográfica por autoria

Países	Coautoria	País	Coautoria	País	Coautoria
USA	19	Países Baixos	2	Irlanda	1
Alemanha	9	Espanha	2	Israel	1
Itália	6	Ucrânia	2	Japão	1
Coreia do Sul	6	Bangladesh	1	México	1
China	4	Benin	1	Noruega	1
Austrália	3	Burquina Fasso	1	Omã	1
Finlândia	3	Canadá	1	Portugal	1
França	3	Chile	1	Escócia	1
Índia	3	Dinamarca	1	Senegal	1
Polônia	3	Inglaterra	1	África do Sul	1
Áustria	2	Grécia	1	Taiwan	1
Bélgica	2	Indonésia	1	Tailândia	1
Malásia	2	Irã	1	Vietnã	1

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do *Web of Science* (2023)

A Tabela 5 destaca os autores com maior quantidade de artigos publicados do portfólio bibliográfico selecionado e se evidencia que os dez primeiros autores possuem reconhecimento acadêmico e são citados em diversas pesquisas. Em relação ao reconhecimento dos autores, observou-se o total de 192 autores distintos nos artigos do portfólio.

Tabela 5 - Principais autores do portfólio

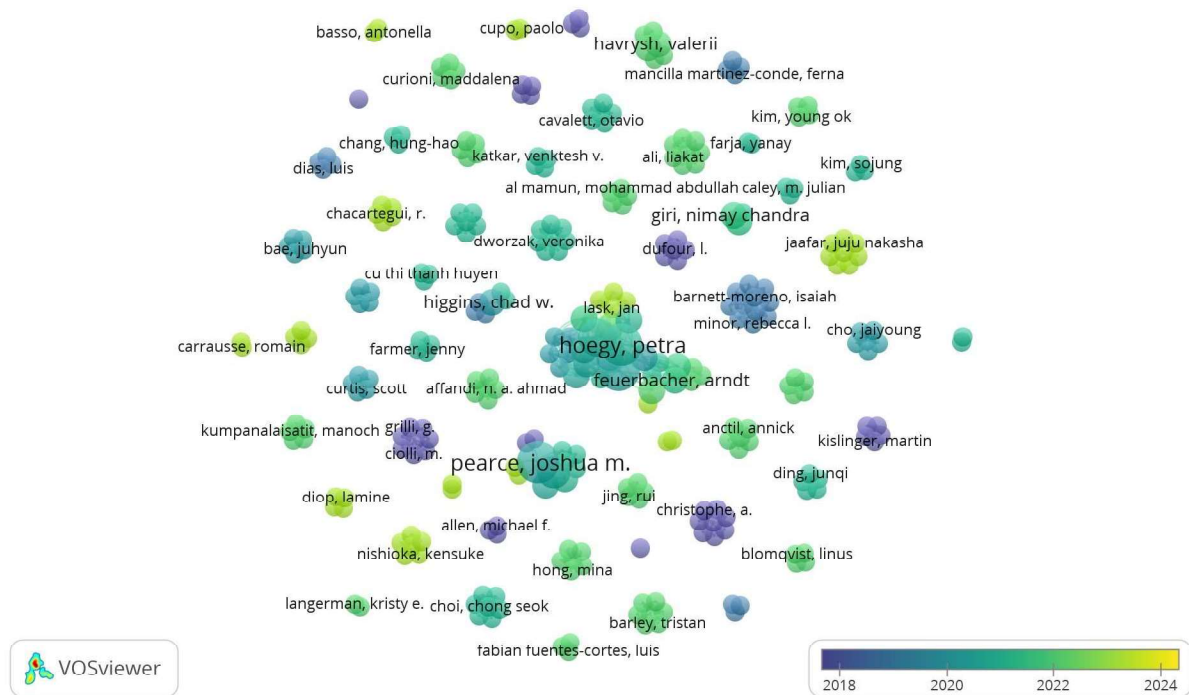
Autor	Documentos	Citações
Hoegy, P	5	289
Pearce, Jm	5	168
Schindele, S	5	289
Weselek, A	4	281
Schelly, C	3	93
Trommsdorff, M	3	154
Bauerle, A	2	93
Bopp, G	2	151
Burnham, I	2	65
Ehmann, A	2	188

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do *Web of Science* (2023)

É importante ressaltar que não existem pesquisadores ou grupos de pesquisadores de

maior destaque (Figura 2). O mapeamento da rede de relacionamento de autores e coautoria demonstra pequenos grupos de pesquisas publicando conjuntamente. Para realizar tal análise, foi utilizado o *software open-source* VOSviewer.

Figura 2 - Relacionamento autores no portfólio



Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do *Web of Science* (2023)

A Tabela 6 demonstra os dez trabalhos mais citados pelos autores dentro do portfólio selecionado.

Tabela 6 - Trabalhos mais citados no portfólio

Título	Abordagem	Autores	Citações recebidas pelo portfólio selecionado
<i>The potential of agrivoltaic systems</i>	O presente estudo relata a competição entre produção de alimentos e geração de energia. Os autores propõem a utilização do sistema agrovoltaico, desenvolvendo na mesma área energia solar quanto a agricultura convencional. Um modelo de simulação acoplado desenvolvido para produção de PV (PVSyst) e produção agrícola (modelo de cultivo Simulateur multIdisciplinaire les Cultures Standard - STICS), para avaliar o potencial técnico de escalar sistemas agrovoltaicos. Os resultados demonstraram aumento de 30% no valor econômico de fazendas, no entanto, tal sistema se associa melhor com produção de culturas tolerantes à sombra.	Dinesh e Pearce (2016)	37
<i>Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes</i>	O artigo propõe o debate das melhores estratégias para converter a radiação solar em energia e alimentos. Os autores sugerem a combinação de módulos solares e culturas alimentares na mesma unidade de terra e nomeia tal ação de Agrivoltaico. Com a aplicação de tal sistema para a produção de trigo, houve uma redução de 19% no rendimento do trigo, em detrimento da redução de 57% na disponibilidade de luz. Os autores propõem que estudos futuros avaliem os métodos com outras culturas.	Dupraz; Marrou; Talbot; Dufour <i>et al.</i> (2011)	35

- Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review*
- O presente estudo relata os impactos do sombreamento provocado pelos sistemas solares em lavouras, apontando o impacto na redução da produção (12% e 20%). Conforme a cultura plantada, o arroz apresentou redução de 20% na produção em comparação em campo aberto. Os autores trazem fatores que evidenciam o sombreamento influencia na qualidade dos alimentos, exemplos: milho apresentou maior teor de proteína e gordura. O teor de ácido oleico do milho, colza, soja e girassol diminuiu com a redução da intensidade da luz, enquanto o teor de ácidos graxos poliinsaturados, como o ácido linoleico e linolênico, aumentaram. Contudo, os autores concluem que o sistema agrivoltaico se apresenta com uma solução para países populosos e de interesse da indústria.
- Weselek; Ehmann; Zikeli; Lewandowski *et al.* (2019)
- 23
- Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production*
- Neste estudo, foi projetada uma plataforma (GECROS) para executar simulações destinadas a otimizar sistemas agrivoltaicos no Norte da Itália. Os dados de uma simulação de longo período foram usados para avaliar a produtividade da terra sob Agrovoltaico e compará-la com os atuais sistemas de energia renovável baseados em terra: conclui-se que os sistemas agrivoltaicos são muito eficazes em maximizar a produtividade da terra, especialmente se forem comparados para cenários reais de energia renovável em que painéis fotovoltaicos “montados no solo” e monoculturas de milho para produção de biogás são suportados
- Amaducci; Yin e Colauzzi (2018)
- 22
- Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands*
- O artigo apresenta que a nova colocação de agricultura e matrizes fotovoltaicas pode ter efeitos sinérgicos que apoiem a produção de serviços ecossistêmicos, como produção agrícola, regulação do clima local, conservação de água e produção de energia renovável. Existem prováveis barreiras para uma adoção mais ampla, que incluem desafios associados a algumas formas de cultivo e colheita mecanizados e os custos adicionais associados à elevação de painéis fotovoltaicos para permitir a produção de alimentos no sub-bosque
- Barron-Gafford; Pavao-Zuckerman; Minor; Sutter *et al.* (2019)
- 22

<i>Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?</i>	O presente estudo aborda a aplicação dos sistemas agrivoltaicos em campos abertos com determinadas culturas e apresenta adaptações nas práticas de cultivo das culturas (pepino, alface e trigo).	Marrou; Guilioni; Dufour; Dupraz e Wery (2013)	22
<i>Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels</i>	O artigo trouxe a avaliação do efeito na produtividade da cultura da alface em sistemas agrivoltaicos, demonstrando que algumas plantas como a alface tem a capacidade de adaptar a essas condições e compensar a redução da disponibilidade de luz. Outras culturas também estão sendo investigadas pelos autores (pepino, feijão francês e trigo duro).	Marrou; Wéry; Dufour e Dupraz (2013)	22
<i>Agrivoltaic potential on grape farms in India</i>	Os autores relatam que o valor econômico na nas fazendas de uva da Índia aumentaram mais de 15 vezes em comparação ao cultivo convencional. Eles simularam que tal prática, sendo implementada em todo o país, poderá gerar mais de 16.000 GWh de eletricidade, podendo atender 15 milhões de pessoas.	Malu; Sharma e Pearce (2017)	19
<i>Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop</i>	Os resultados desta pesquisa mostraram que o sistema agrivoltaico sobre palafitas pode mitigar o <i>trade-off</i> entre produção agrícola e geração de energia limpa mesmo quando aplicado ao milho, uma cultura típica intolerante à sombra. Os resultados desta pesquisa devem encorajar mais agricultores convencionais, produtores de energia limpa e formuladores de políticas a considerar a adoção de sistemas fotovoltaicos montados em palafitas, principalmente em áreas em que os recursos da terra são relativamente escassos.	Sekiyama e Nagashima (2019)	19

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos do *Web of Science* (2023)

Os trabalhos mais citados no portfólio bibliométrico apresentam diversos fatores que podem contribuir para a análise da produção de alimentos e a geração de energia solar por sistemas agrivoltaicos, buscando evitar conflitos nas terras agrícolas e o desabastecimento de alimentos em prol da geração de energia. Além disso, um ponto importante discutido entre os artigos foi a redução na produção de alimentos de determinadas culturas e o impacto nas suas respectivas qualidades. Isso ressalta a necessidade de realizar mais estudos para analisar os benefícios ambientais, econômicos e sociais dessa prática, como destacado pelos pesquisadores Weselek *et al.* (2019).

Para a análise textual das palavras-chave extraídas nos artigos do portfólio, foram

As palavras “*land use*”, “*agrivoltaics*” e “*renewable energy*” são genéricas e são utilizadas em outras áreas de pesquisa, sendo relevantes e aplicáveis ao tema o impacto da implantação de sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas.

A implementação de fontes de energia renováveis, como a energia solar fotovoltaica, demanda áreas para captar a radiação solar recebida e as terras agrícolas têm sido utilizadas para viabilizar esses empreendimentos. Essa ação requer uma compreensão aprofundada das interações entre agricultores, governos, comunidades e empresas de energia para interpretar as opiniões das partes interessadas sobre a localização de usinas fotovoltaicas em terras agrícolas.

Devido à importância das decisões relacionadas à localização e ao uso da terra para facilitar a instalação de energia solar fotovoltaica, observa-se um aumento nas pesquisas nas áreas de localização ideal e impactos do uso da terra em fazendas solares. Esses estudos, geralmente, são realizados em regiões em que o desenvolvimento de sistemas solares já ocorre, com uma abrangência geográfica limitada (Katkar *et al.*, 2021).

Segundo Moore *et al.* (2022), a literatura de energia e ciências sociais destaca que os debates não devem se concentrar apenas na viabilidade técnica da terra em suportar a energia renovável, mas também em se ela deve ser convertida em geração de energia. Bessette e Mills (2021) ilustram que a implantação de sistemas fotovoltaicos em terras agrícolas ocorre devido à necessidade de diversificação de renda dos agricultores e a oposição a essa prática geralmente ocorre em locais com belezas naturais vinculadas ao turismo ou à preservação da natureza.

Autores como Barron-Gafford *et al.* (2019) e Marrou *et al.* (2013) destacam a importância do sistema agrivoltaico na minimização do impacto na produção de alimentos e geração de energia. Apesar da identificação de uma redução na produção de algumas culturas em até 20% (Weselek *et al.*, 2019), essa abordagem é economicamente e tecnicamente viável para determinadas culturas, como alface, pepino e trigo. No entanto, são necessários estudos sobre como os sistemas agrivoltaicos impactam as economias agrícolas locais, considerando os efeitos sobre os trabalhadores rurais e pequenos produtores, exigindo uma transição cuidadosa no mercado.

3.5 Considerações Finais

Este capítulo abordou o dilema decorrente do emprego de terras agrícolas para a instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil, enfatizando o compromisso entre a produção de alimentos e a geração de energia. A revisão bibliométrica teve como principal objetivo avaliar a existência de políticas públicas, regulamentações ou normas voltadas para projetos de energia

fotovoltaica em terras agricultáveis no mundo. Os resultados evidenciaram uma lacuna expressiva, indicando a ausência de diretrizes específicas para a regulação de usinas fotovoltaicas em áreas destinadas à produção de alimentos, uma possível causa do dilema identificado.

Frente a essa lacuna, verifica-se a necessidade de estudos futuros para a realização de diálogos entre governo, produtores rurais, sociedade civil e empresários do setor fotovoltaico, com o objetivo de formular políticas públicas voltadas para a integração sustentável dessas tecnologias em terras agrícolas. Adicionalmente, uma área que requer investimentos e estudo é o melhoramento genéticos de culturas como soja e milho, buscando ampliar a viabilidade e eficácia do sistema agrivoltaico.

Além disso, uma área de estudo futura importante pode ser direcionada para terras improdutivas, como o nordeste do Brasil ou a região norte de Minas Gerais, com o propósito de compreender a ausência de investimentos nessas localidades.

Nesse contexto, é importante direcionar esforços na busca por soluções eficazes que harmonizem de maneira equilibrada a produção de alimentos e a expansão da energia fotovoltaica no contexto agrícola brasileiro.

CAPÍTULO 4: RESÍDUOS DA CADEIA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL: POTENCIAL PARA A ECONOMIA CIRCULAR

Resumo

Este capítulo aborda os impactos na economia circular dos resíduos da cadeia da energia fotovoltaica no Brasil e analisa as políticas aplicadas no mundo. Foram projetadas a quantidade de resíduos fotovoltaicos no Brasil de 2034 a 2065, com base na análise do crescimento da energia fotovoltaica até 2040. Os resultados indicam que o Brasil pode alcançar 192 GW de capacidade instalada em sistemas fotovoltaicos até 2040, exigindo o tratamento de 12.9 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos. Destaca-se a necessidade de um sistema eficiente para monitorar, coletar e armazenar esses resíduos, propondo a adoção de práticas de economia circular na indústria, especialmente diante do crescimento da energia fotovoltaica. Essas contribuições visam abordar as consequências não intencionais associadas a essa forma de energia renovável, fornecendo informações relevantes para a discussão sobre o tratamento de resíduos fotovoltaicos no contexto brasileiro. Adicionalmente às análises e projeções mencionadas, um produto tecnológico foi desenvolvido para realizar projeções dos resíduos fotovoltaicos futuros, fornecendo ferramentas essenciais para a gestão e o monitoramento contínuos desses sistemas. Essa inovação oferece uma abordagem prática e eficaz para lidar com o crescente desafio dos resíduos fotovoltaicos, facilitando a tomada de decisões e a implementação de políticas adequadas para mitigar o seu impacto ambiental.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica; economia circular; resíduos fotovoltaicos; sustentabilidade.

WASTE FROM THE PHOTOVOLTAIC ENERGY CHAIN IN BRAZIL: POTENTIAL FOR CIRCULAR ECONOMY

Abstract

The study addresses the impacts on the circular economy of waste from the photovoltaic energy chain in Brazil and analyzes the policies applied around the world. The amount of photovoltaic waste in Brazil was projected from 2034 to 2065, based on the analysis of the growth of photovoltaic energy until 2040. The results indicate that Brazil can reach 192 GW of installed capacity in photovoltaic systems by 2040, requiring the treatment of 12.9 million tons of photovoltaic waste. The need for an efficient system to monitor, collect and store this waste stands out, proposing the adoption of circular economy practices in the industry, especially given the growth of photovoltaic energy. These contributions aim to address the unintended consequences associated with this form of renewable energy, providing relevant information for the discussion on the treatment of photovoltaic waste in the Brazilian context. In addition to the aforementioned analyzes and projections, a technological product was developed to carry out projections of future photovoltaic waste, providing essential tools for the continuous management and monitoring of these systems. This innovation offers a practical and effective approach to dealing with the growing challenge of photovoltaic waste, facilitating decision-making and the implementation of appropriate policies to mitigate its environmental impact.

Keywords: photovoltaic solar energy; circular economy; photovoltaic waste; sustainability.

4.1 Introdução

A indústria fotovoltaica mundial produziu em 2021 cerca de 1 TWh, o que corresponde a 3,6% de toda a geração de energia elétrica no planeta (Maka; Alabid, 2022) e demonstra crescimento de 26,5% a.a entre os anos 2012 e 2021 (Bezerra, 2022). De acordo com a International Renewable Energy Agency (IRENA, 2016), a capacidade global poderá chegar a 2.840 GW em 2030, enquanto em 2050 poderá alcançar 8.500 GW.

Essa tendência global em direção à energia solar fotovoltaica também se manifesta no Brasil. Após a publicação da Resolução Normativa n.º 482, de 17 de abril de 2012, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), o país testemunhou um crescimento notável nesse setor. Em maio de 2023, o Brasil já havia alcançado uma capacidade instalada de 28,9 MW em energia solar fotovoltaica, o que representa uma impressionante porcentagem (13,1%) da matriz energética nacional (ABSOLAR, 2023).

Esse aumento resultará em uma consequência indesejada: a geração de resíduos provenientes de sistemas fotovoltaicos, principalmente devido à obsolescência e/ou falhas nas instalações. De acordo com Franco e Groesser (2021), estima-se que entre 2030 e 2050, aproximadamente 60 a 78 milhões de toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos serão destinados a aterros em todo o mundo.

A preocupação com a destinação e o aproveitamento desses resíduos faz parte da realidade política internacional. Um exemplo disso é que a União Europeia (UE) determina aos Estados-Membros que enviem relatórios com a projeção de resíduos fotovoltaicos. Num contexto recente, foram aprovadas as Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE, 2012), um plano de ação para Economia Circular (European Commission, 2020) e o Ato de Matérias-Primas Críticas (European Commission, 2023). Em conjunto, elas direcionam práticas de economia circular para resíduos, além de reaproveitamento de matérias-primas críticas provenientes dos sistemas fotovoltaicos.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos e a aprovação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES, 2022) indicam caminhos para a gestão de resíduos. O Plano estabelece diretrizes e metas para melhorar a gestão de resíduos sólidos em 20 anos, no entanto, não traz diretrizes específicas para resíduos fotovoltaicos. O plano é incipiente em entender o resíduo como recurso e ainda carece de aperfeiçoamento para fomentar uma economia circular de resíduos fotovoltaicos (Cezarino *et al.*, 2019; Oliveira, Galvão Junior, 2016).

Países em desenvolvimento enfrentam gargalos para o avanço da economia circular, que incluem a ausência de planos de longo prazo que reflitam sobre o impacto futuro de resíduos

(Cezarino *et al.*, 2019). Com foco em munir gestores públicos e privados à respeito do potencial aproveitamento de resíduos da indústria fotovoltaica no contexto brasileiro, este estudo projeta a implantação de energia fotovoltaica até o ano de 2040 e estima a quantidade de resíduos fotovoltaicos previstos para serem gerados no Brasil entre 2034 e 2065.

As principais contribuições do trabalho são destinadas à economia circular e à necessidade de gerenciamento dos resíduos dos sistemas fotovoltaicos. Os resultados são discutidos com base nas principais políticas públicas internacionais sobre gerenciamento dos resíduos de sistemas fotovoltaicos. As projeções permitem implicações práticas e teóricas sobre como promover a redução, a reutilização e a reciclagem desses materiais, bem como os desafios nacionais perante o crescimento da indústria.

4.2 Referencial Teórico

O uso de energias renováveis teve um acréscimo de 3.372 GW na capacidade global, demonstrando um crescimento de 9,6% em relação a 2021. A energia solar fotovoltaica registrou um aumento significativo na sua capacidade, alcançando um acréscimo de 191.450 MW (IRENA, 2022). A China se encontra na liderança mundial com maior potência instalada de geração de energia solar (Ribeiro Filho *et al.*, 2022), com 392 GW, sendo 150 GW adicionados em 2021 e previsto adições anuais médias de 210 GW durante 2022-2030 (IRENA, 2022). O Brasil passou a ocupar a oitava colocação no ranking mundial com maiores potências instaladas de fonte solar fotovoltaica, possuindo em junho de 2023, 28,9 GW de potência instalada. As projeções realizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2016, considerava que o país teria 25GW em potência instalada da fonte solar em 2030. Em uma revisão das projeções, estima-se que o país possuirá, em 2031, 45,27 GW em capacidade instalada da fonte solar (EPE, 2021).

Um importante marco da energia solar fotovoltaica no Brasil foi a promulgação da Resolução Normativa n.º 482/2012 da ANEEL e junto da sua atualização, Resolução Normativa n.º 687/2015, impulsionou a energia fotovoltaica no Brasil, permitindo sistemas conectados à rede elétrica, o que incentivou empresas e cidadãos a produzirem energia para atender as suas necessidades por sistemas fotovoltaicos. Em busca de melhorias na Resolução n.º 482 e de criar linhas de crédito do BNDES, o governo brasileiro lançou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), pelo Decreto ministerial n.º 538, de 2015.

Pode-se identificar a evolução da geração distribuída no Brasil após a instituição da Resolução n.º 482/2012, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Crescimento da Geração Distribuída - série histórica - 2012 a 2022

Ano	GD	Municípios
2012	23	20
2013	67	49
2014	342	165
2015	1.687	506
2016	8.267	1.239
2017	21.883	2.067
2018	57.682	3.294
2019	182.075	4.635
2020	406.093	5.237
2021	835.752	5.457
2022	1.632.238	5.521

Fonte: Elaborado pelos autores com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023)

Devido ao aumento anual das instalações fotovoltaicas em todo o mundo e levando em consideração que a vida útil média de um módulo solar é de, aproximadamente, 25 anos, é inevitável que ocorra um crescimento significativo na quantidade de resíduos fotovoltaicos atingindo o final da sua vida útil. Conforme indicado por Franco e Groesser, como citado em IRENA (2016), entre os anos de 2030 e 2050, estima-se que serão geradas entre 60 e 78 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos.

Em consonância com os princípios estabelecidos pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), os fabricantes têm a responsabilidade de acompanhar seus produtos ao longo de todo o ciclo de vida, assumindo obrigações tanto ambientais quanto econômicas.

Segundo Sica *et al.* (2018), o setor fotovoltaico necessita de uma abordagem de liderança em relação à economia circular, pois uma vez que a capacidade fotovoltaica instalada global se expande, conseqüentemente, o número de módulos fotovoltaicos desativados também se elevarão.

As abordagens exigem mudanças em todas as cadeias de valor, desde a produção até novas formas de transformar resíduos em recursos. Ao mesmo tempo, contribui-se para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ao propor medidas para a utilização sustentável dos recursos naturais e a reciclagem de resíduos, favorecendo inovação e retornos financeiros empresariais desejáveis, bem como maiores benefícios econômicos (Gil-Lamata;

Latorre-Martínez, 2022).

De acordo com Konzen e Pereira (2020), uma economia circular se baseia no princípio dos 3Rs: reduzir, reutilizar e reciclar, sendo aplicável à cadeia de produção dos módulos fotovoltaicos, uma vez que esse mercado possui crescimento exponencial, escassez de matérias-primas, mas com a necessidade de redução dos valores pagos na tecnologia, portanto, a substituição de matérias-primas para a reutilização dos principais materiais se torna atrativa e viável para a indústria fotovoltaica.

Os pesquisadores Mathur *et al.* (2020) demonstram nos seus estudos a importância do gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos, uma vez que a ausência dessa infraestrutura poderá trazer consequências para o meio ambiente. Contudo, esses resíduos podem ser vistos pela indústria como uma fonte potencial de materiais valiosos. De acordo com o relatório anual da PV Cycle (2016), o módulo fotovoltaico de silício é composto por 78% de vidro, 10% de alumínio, 7% de plásticos e 5% são metais e semicondutores. No entanto, Duflou *et al.* (2018) evidenciam que apenas parte dos materiais do módulo fotovoltaico pode ser reciclado, a saber: vidros, alumínio, cobre e aço.

Segundo a Comissão Europeia (2018), a tecnologia do painel fotovoltaico C-Si depende da disponibilidade de metais valiosos, incluindo Si (Silício). Em 2019, a tecnologia do painel fotovoltaico C-Si representava 95% da produção total de tecnologia fotovoltaica. As estimativas de demanda para Si na Europa, para a implantação de módulos fotovoltaicos, crescerão de 42.854 t, em 2020, para 234.962t, em 2030 (Contreras-Lisperguer *et al.*, 2021). Devido à dominância da produção dos painéis baseados em Si, espera-se que contribua para a implantação da economia circular na indústria fotovoltaica (Duflou et al., 2018).

Países como Itália, Austrália e Coreia do Sul, que ocupam as primeiras colocações com maiores potências instaladas de fonte solar, não possuem legislações específicas para tratar o gerenciamento de fim da vida útil dos painéis solares fotovoltaicos, somente legislação geral de resíduos (Majewski *et al.*, 2023). A UE, reconhecendo o possível impacto ambiental que os resíduos fotovoltaicos podem causar, criou diretrizes para os Estados-Membros da UE.

Nessas diretrizes, a responsabilidade para o descarte e a reciclagem dos módulos fotovoltaicos são dos fabricantes, no entanto, os Estados-Membros devem estimar e enviar relatório do quantitativo de resíduos fotovoltaicos à Comissão Europeia (Kim; Park, 2018). Além disso, determina-se aos fabricantes que os equipamentos sejam etiquetados para informar aos usuários de que os produtos devem ser reciclados no final do ciclo de vida. Segundo Ritzen et al. (2016), todos os Estados-Membros da UE incorporaram a Diretiva WEEE nas legislações nacionais, inserindo regulamentos específicos de cada Estado-Membro.

Quadro 1 - Classificação dos WEEE - Anexo I da Diretiva Europeia (2012/19/EU)

Categorias de WEEE	Exemplos
Eletrodomésticos de grande porte	Máquinas de lavar roupa; frigoríficos; congeladores; fornos elétricos, micro-ondas; aparelhos de ar-condicionado
Eletrodomésticos de pequeno porte	Fritadeiras; facas elétricas; máquinas de café; aparelhos de limpeza.
Equipamentos de informática e telecomunicações	Minicomputadores; notebooks; impressoras; máquinas de escrever elétrica; calculadoras de bolso
Equipamentos de consumo e painéis fotovoltaicos	Aparelhos de rádio; câmeras de vídeo; painéis fotovoltaicos
Equipamentos de iluminação	Lâmpadas fluorescentes; aparelhos de iluminação para lâmpadas fluorescentes
Ferramentas elétricas e eletrônicas	Máquinas de costura; serras; equipamentos elétricos para jardinagem
Brinquedos e equipamentos de desporto e lazer	Consoles de jogos de vídeo portáteis; jogos de vídeo; equipamento desportivo com componentes elétricos
Aparelhos Médicos	Equipamentos de radioterapia; equipamentos de cardiologia; ventiladores pulmonares
Instrumentos de monitoramento e controle	Detetores de fumo; termóstatos; reguladores de aquecimento
Distribuidores automáticos	Todos os aparelhos que forneçam automaticamente todo o tipo de produtos

Fonte: Elaborado pelos autores, adaptado de CE (2012)

Quadro 2 - Classificação dos WEEE – Anexo III da Diretiva Europeia (2012/19/EU)

Categorias de WEEE	Exemplos
Equipamentos de regulação da temperatura	Frigoríficos; congeladores; equipamentos de distribuição automática de produtos frios; equipamentos de ar-condicionado
Ecrãs, monitores e equipamentos com tela planam superior a 100 cm ²	Aparelhos de televisão; molduras fotográficas LCD; monitores, computadores portáteis/laptop
Lâmpadas	Lâmpadas fluorescentes compactas; lâmpadas fluorescentes; lâmpadas de descarga de alta intensidade, incluindo lâmpadas de sódio sob pressão e lâmpadas de haletos metálicos

Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa superior a 50 cm)	Equipamento para reproduzir sons ou imagens; equipamento musical (excluindo tubos de órgãos instalados em igrejas); aparelhos utilizados no tricô e tecelagem
Equipamentos de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm)	Ferros de engomar; torradeiras; facas elétricas; cafeteiras elétricas; relógios; máquinas de barbear elétricas; balanças; aparelhos para cortar o cabelo e outros aparelhos para o cuidado do corpo
Equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm).	Telemóveis, GPS, calculadoras de bolso, routers, computadores pessoais, impressoras, telefones

Fonte: Elaborado pelos autores, adaptado de CE (2012)

A Comissão Europeia, pela Diretiva WEEE, estabelece metas anuais de coleta e reciclagem de resíduos, descritos no Quadro 3.

Quadro 3 - Metas Anuais da Diretiva Europeia

Período	Coleta	Reciclagem	Recuperação
Primeira Diretiva - 2002	4 kg/habitante	65%	75%
Diretiva revisada - 2012 a 2016	4 kg/habitante	65%	75%
Diretiva revisada - 2016 a 2018	45%	70%	80%
Diretiva revisada - a partir de 2018	65%	80%	85%

Fonte: IRENA (2016)

No Brasil, o gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos não conta com uma regulamentação específica, sendo orientado pelas diretrizes estabelecidas na Política Nacional de Resíduos Sólidos, que os categoriza como parte da classe de resíduos eletroeletrônicos. Conforme enfatizado por Konzen e Pereira (2020), a Política Nacional de Resíduos Sólidos de 2010 define como destinação final ambientalmente adequada para resíduos sólidos as práticas de reutilização, reciclagem e compostagem, enquanto a disposição final ambientalmente adequada se refere à disposição ordenada de rejeitos em aterros que atendam às normas específicas.

Além disso, o documento legislativo aborda conceitos fundamentais, como ciclo de vida, logística reversa, responsabilidade compartilhada, desenvolvimento sustentável e princípios de prevenção e precaução, destacando a sua relevância na gestão ambientalmente responsável dos resíduos no país (Brasil, 2010).

A reutilização de painéis solares é abordada na Austrália, embora com um mercado pequeno, acredita-se que haverá uma escalada e desenvolvimento da economia circular para o setor de energia solar. Segundo Majewski *et al.* (2023), uma certificação para os módulos solares seria necessária com o propósito de garantir que atendam os requisitos de segurança e desempenho. A certificação deve possibilitar o rastreamento dos módulos solares e estabelecer diretrizes para a legislação de fim de vida.

Na Coreia do Sul, os resíduos fotovoltaicos são classificados como resíduos industriais, no entanto, a geração de resíduos fotovoltaicos não está sendo monitorada pelo governo e não possuem estimativas e cronogramas de módulos solares no fim do ciclo de vida (Kim; Park, 2018). A discussão no país é recente, sendo estabelecido em 2016 que os descartadores de resíduos industriais tratem os resíduos adequadamente e reduzam os resíduos construindo instalações de redução de resíduos. O governo sul-coreano, em 2017, construiu uma instalação para reciclar os resíduos fotovoltaicos na província de Chungcheong do Norte.

Segundo Gautam *et al.* (2021), a Índia não possui regulamentos específicos para o descarte de resíduos fotovoltaicos, sendo utilizadas diretrizes do MNRE, que afirmam que os fabricantes devem garantir que os resíduos fotovoltaicos sejam descartados, conforme as regras do “*E-waste (Management and Handling) Rules*”. No entanto, os autores apontam que a Índia, em 2019, poderia lidar com apenas 22% do total de lixo eletrônico gerado no país.

Portanto, nota-se a relevância de analisar os impactos na economia circular dos resíduos fotovoltaicos, uma vez que já está sendo tratado em diversos países, mas que no Brasil ainda é insipiente em relação ao tema, não havendo legislação própria e fiscalização para gerenciar a cadeia circular da indústria fotovoltaica.

4.3 Procedimentos Metodológicos

Este estudo tem como objetivo estimar a quantidade de resíduos fotovoltaicos previstos para serem gerados no Brasil entre 2034 e 2065. Para isso, adotou-se o método quantitativo, organizado em três etapas principais: (1) Cálculo da Capacidade Instalada Atual; (2) Projeção da Capacidade Instalada e (3) Estimativa de número de resíduos fotovoltaicos previstos. Os tópicos seguintes detalham cada uma das etapas.

4.3.1 Cálculo da Capacidade Instalada Atual

Para o cálculo da capacidade instalada, foi elaborado um banco de dados com informações divulgadas pela ANEEL, que dispunha de dados dos sistemas fotovoltaicos implantados por órgãos públicos, entre 2009 e 2022, ou seja, durante a promulgação da Resolução n.º 482/2012, que possibilitou a conexão à rede das concessionárias de energia de sistemas de geração fotovoltaica. Os filtros da pesquisa para a coleta das informações no sítio eletrônico da ANEEL (2023) estão detalhados na Figura 1.

Figura 1 - Filtros da pesquisa ANEEL

Filtros	Pesquisa
Tipo de Geração	UFV
Classe de Consumo	Todos
Modalidade de Geração	Todos
Fonte de Geração	Radiação Solar
Grupo de Tensão	Todos
Estados	Todos

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos da ANEEL (2023)

Os dados coletados permitiram a construção do banco de dados, em que as linhas correspondem aos sistemas fotovoltaicos homologados e as colunas apresentam a data da homologação do sistema fotovoltaico, o município, o estado, o titular do empreendimento e a potência instalada. O banco de dados resultante continha registros de 1.661.371 empreendimentos fotovoltaicos implantados no país entre os anos de 2009 e 2022.

4.3.2 Projeção da Capacidade Instalada

As estimativas da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no Brasil foram baseadas nos estudos de Zhang *et al.* (2022). Primeiro, o banco de dados foi organizado em função dos 26 estados brasileiros. A equação 1 descreve de forma vetorial o conjunto original de dados. Cada estado brasileiro contém uma própria série $X^{(0)}$, em que cada $x^{(0)}(i)$ corresponde à potência de geração no ano $(2010 - i)$, $i \in \{1, 2, \dots, 14\}$.

Equação 1

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$$

Na sequência, os dados foram ajustados com uma operação de buffer. A operação de buffer lida com a incerteza dos dados de projeção gerando um buffer na linha de referência, ocasionando uma medida de discrepância entre as duas linhas (Santos *et al.*, 2015). A Equação 2 ajusta os dados com base na estimativa do incentivo de adoção desse método de geração, influenciado por políticas públicas (dado o crescimento notável observado nos dados de todos os estados brasileiros). O conjunto de dados ajustado resultante é, então, empregado para as estimativas subsequentes.

Equação 2

$$x^{(0)}(t) = \left(\frac{1}{n-t+1} \right) \sum_{i=t}^{14} x^{(0)}(i), \quad t \in \{1, 2, \dots, 14\}$$

A Equação 3 representa uma operação de acumulação de valores, um passo crucial para a subsequente estimativa de valores aproximados à média. Esses valores acumulados serão então utilizados no processo de regressão de mínimos quadrados.

Equação 3

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k \in \{1, 2, \dots, 14\}$$

Por fim, a Equação 4 define a geração de uma sequência de valores aproximados à média em relação aos valores acumulados em cada $x^{(1)}(t)$.

Equação 4

$$z^{(1)}(t) = \frac{1}{2} [x^{(1)}(t) + x^{(1)}(t-1)], \quad t \in \{2, 3, \dots, 14\}$$

Com base nos valores de $X^{(0)}$ e $Z^{(1)}$, é possível estabelecer um sistema de equações da forma $x^{(0)}(t) + aZ^{(1)}(t) = b$, em que os valores de a e b são obtidos pela estimativa de parâmetros usando o método de mínimos quadrados. Definindo A , B e Y_n conforme descrito na equação 5, a equação matricial apresentada na equação 6 é então resolvida para obter os parâmetros de regressão a e b para cada conjunto de dados, ou seja, para o conjunto de dados de cada estado.

Equação 5

$$A = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad Y_n = \begin{pmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(14) \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(14) & 1 \end{pmatrix}$$

Equação 6

$$A = (B^T \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot Y_n$$

Ao possuir os parâmetros a e b para cada estado, torna-se viável estimar a potência de geração instalada para o ano t , em que $t \geq 2023$, de acordo com a Equação 7.

Equação 7

$$\hat{x}^{(0)}(t) = (1 - e^a) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{[-a(t-2022)]}$$

Tabela 2 - Valores de a e b

Estado	a	b
Acre	0.21	26.30
Alagoas	0.25	110.88
Amapá	0.20	11.81
Amazonas	0.23	58.01
Bahia	0.24	475.53
Ceará	0.21	299.20
Distrito Federal	0.20	120.54
Espírito Santo	0.25	237.01
Goiás	0.21	443.24
Maranhão	0.22	227.49
Mato Grosso do Sul	0.21	365.16
Mato Grosso	0.19	495.41
Minas Gerais	0.17	1123.59
Pará	0.25	328.06
Paraíba	0.18	123.32
Paraná	0.21	1003.84

Pernambuco	0.23	322.71
Piauí	0.20	164.70
Rio de Janeiro	0.21	419.6
Rio Grande do Norte	0.22	221.78
Rio Grande do Sul	0.21	1110.04
Rondônia	0.20	100.45
Roraima	0.08	4.25
Santa Catarina	0.25	865.02
São Paulo	0.23	1467.28
Sergipe	0.22	59.80
Tocantins	0.21	121.12
Total	0.21	10266.30

Fonte: Elaborado pelos autores com dados extraídos da ANEEL (2023)

4.3.3 Projeção do número de módulos para o período

Para estimar a quantidade de módulos solar fotovoltaico, aplica-se a Equação 8 nos resultados obtidos a partir da projeção da capacidade instalada. Este estudo adota as especificações de um módulo típico c-Si PV, que foi utilizado no Brasil com capacidade = 335 Wp, peso = 22,5 kg, área de 1,98 m² e ciclo de vida útil de 25 anos (Data sheet Poly 345W Half-CELL Module JAP72S03 325-345/SC).

Equação 8

$$N = Pot(an) / Pot(mod)$$

Em que N = número de módulos fotovoltaicos; $Pot(an)$ = Potência anual apurada (Wp) e $Pot(mod)$ = Potência do módulo (Wp).

Com essa equação, foi possível estimar a quantidade de módulos fotovoltaicos. Para a análise da quantidade de resíduos fotovoltaicos instalados no Brasil, aplica-se a Equação 9.

Equação 9: Quantidade de resíduos

$$R = N * P$$

Em que R = Resíduos fotovoltaicos (Kg); N = número de módulos fotovoltaicos e P = peso do módulo fotovoltaico (Kg).

Os resultados obtidos são apresentados no tópico a seguir e são discutidos com uso de gráficos e estatística descritiva.

4.4 Resultados da pesquisa

O avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil alcançou um marco significativo com a promulgação da Resolução Normativa nº 482/2012 pela ANEEL, seguida pela atualização da Resolução Normativa nº 687/2015.

Como resultado desse impulso regulatório, o Brasil conquistou a oitava posição no ranking mundial de potências instaladas de energia solar fotovoltaica, atingindo, em junho de 2023, uma capacidade instalada de 28,9 GW (IRENA, 2023). Inicialmente, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) previa que o Brasil atingiria 25 GW em potência solar até 2030. Em uma revisão posterior, a EPE elevou essa expectativa para 45,27 GW até 2031.

No entanto, o presente estudo apresenta uma previsão mais otimista, indicando que em 2040 o país alcançará a marca de 192 GW. Esses números ressaltam não apenas o crescimento expressivo, mas também a posição de destaque do Brasil no cenário global da energia solar fotovoltaica. Em comparação, projeta-se que a China atinja a impressionante marca de 599,5 GW até o mesmo ano (Zhang *et al.*, 2022).

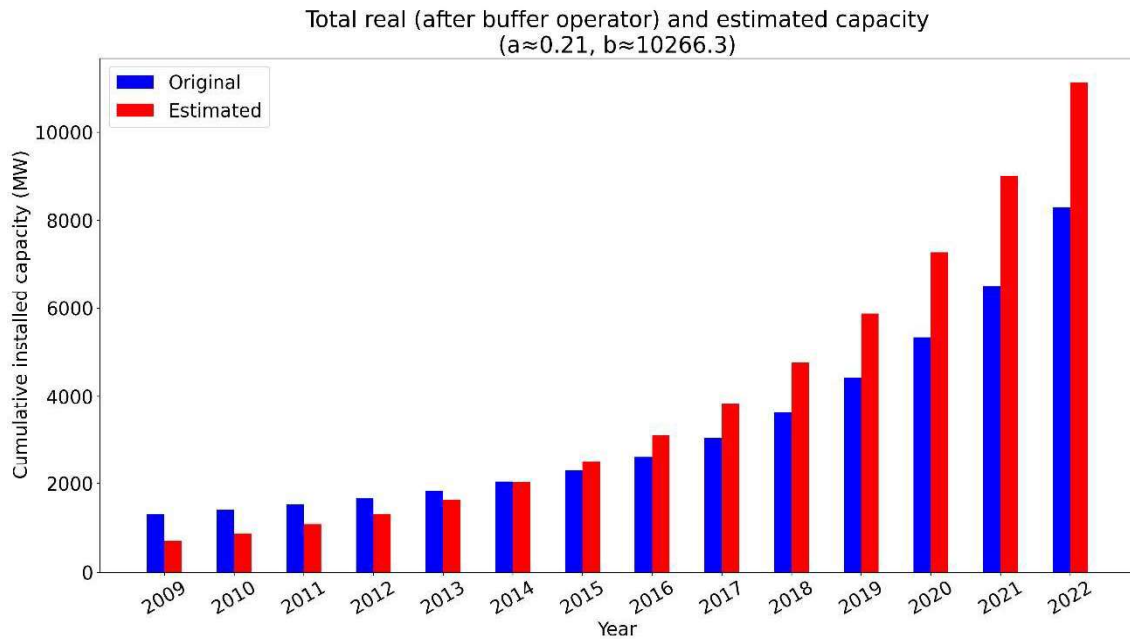
Tabela 3 - Potência instalada entre 2009 e 2022 e módulos em operação no Brasil

Ano	Potência (KW)	Quant. Módulos
2009	8,90	26,56716418
2010	12,00	35,82089552
2011	11,08	33,07462687
2012	647,80	1933,731343
2013	1.335,57	3986,776119
2014	2.713,50	8100
2015	14.120,30	42150,14925
2016	63.143,16	188487,0448
2017	156.714,80	467805,3731
2018	444.427,30	1326648,657
2019	1.632.441,20	4872958,806
2020	2.992.493,90	8932817,612
2021	4.728.138,31	14113845,7
2022	8.290.201,15	24746869,1
Total	18.326.408,97	54.705.698,42

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

De 2009 a 2022, a potência saltou de 8,9 KW para 8.290.201,15KW e os dados obtidos pela Aneel apontam que 98% da potência instalada ocorreu entre 2018 e 2022 (Gráfico 1). O gráfico a seguir mostra o resultado ajustado com a operação de buffer.

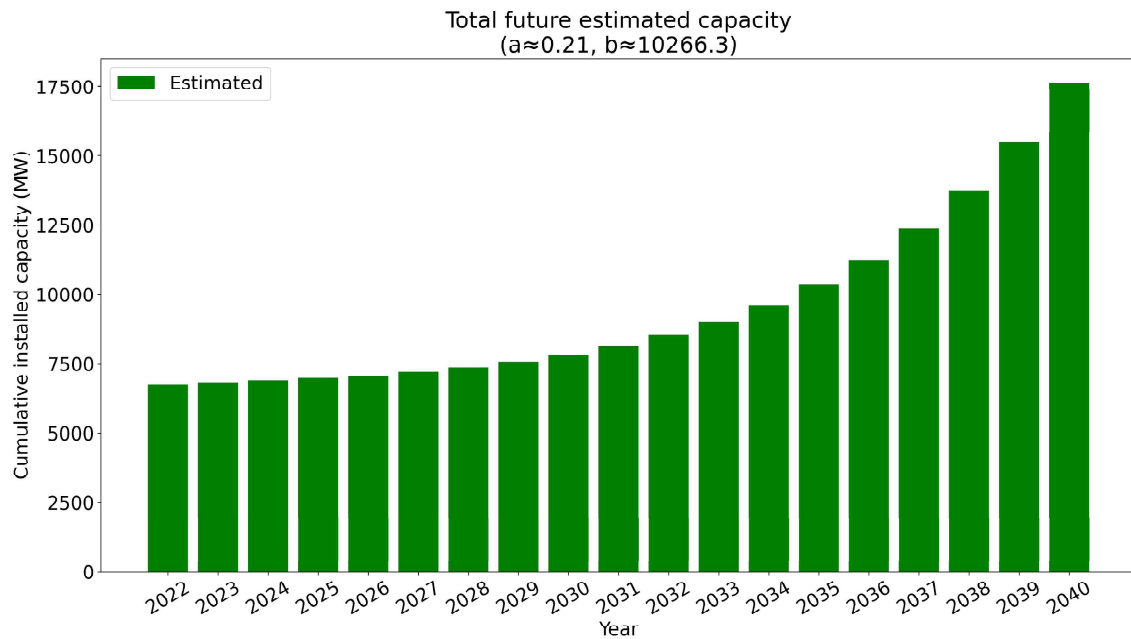
Gráfico 1 - Potência instalada entre 2009 e 2022.



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

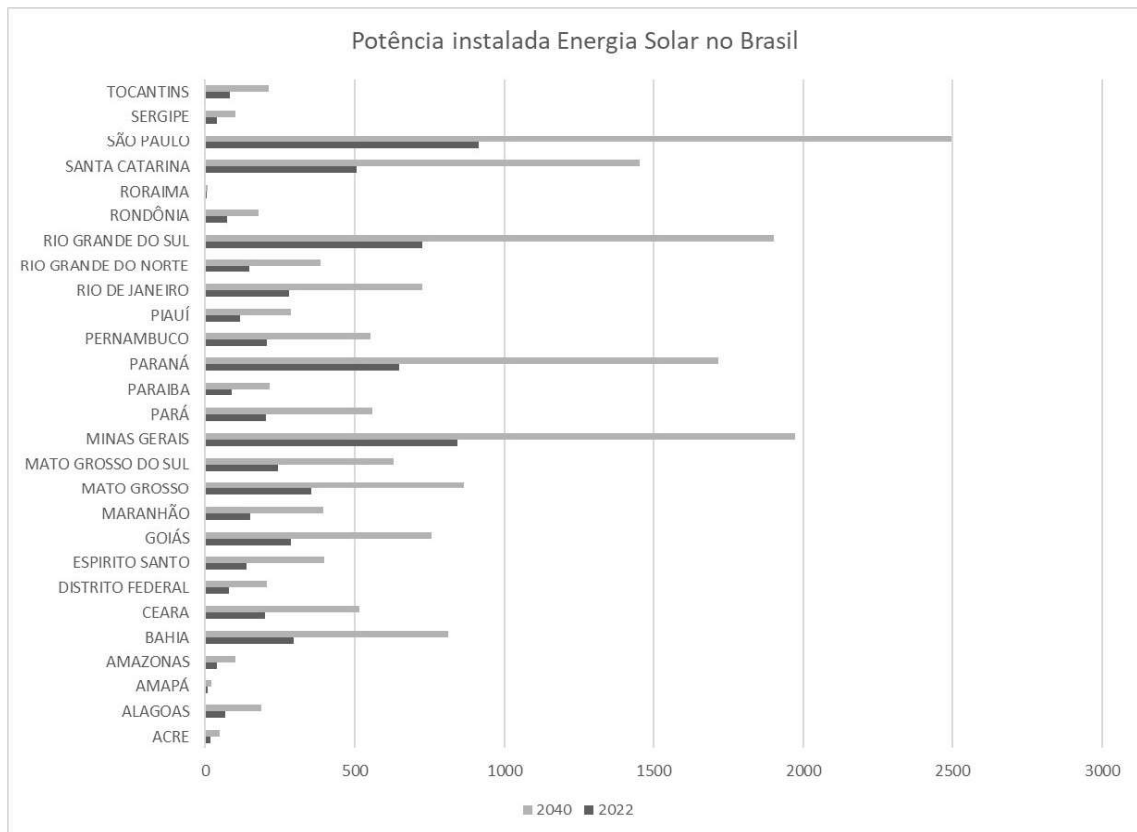
A análise da base de dados gerada demonstra uma forte taxa de crescimento do setor fotovoltaico no Brasil. Ademais, indica-se que os módulos estão em início de vida útil, com 98% deles com até quatro anos de uso. A partir das estimativas atuais e taxas de crescimento, a potência instalada no Brasil até 2040 é descrita no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Projeção de potência dos sistemas fotovoltaicos no Brasil 2022-2040



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

Gráfico 3 - Potência de Energia solar instalada no Brasil (2022 e 2040)



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

Com base no Gráfico 2, espera-se que em 2040 a potência instalada atinja 192 GW, com um aumento de, aproximadamente, 63% no período. O Gráfico 3 compara a capacidade instalada em 2022 e a estimativa para 2040 por estado. Os principais estados estão no centro-sul do Brasil, com destaque para São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Para estimar o impacto dos resíduos das instalações fotovoltaicas, foi calculado o quanto a potência atual instalada em junho de 2023 no Brasil traria de impacto até 2065. A estimativa para até 2065 levou em consideração a vida útil média dos módulos de até 25 anos (Tabela 4).

Tabela 4 - Projeção resíduos solares fotovoltaicos no Brasil

Término Vida Útil	Quant. Módulos (UN)	Peso (Toneladas)
2034	27	598
2035	36	806
2036	33	744
2037	1.934	43.509
2038	3.987	89.702
2039	8.100	182.250
2040	42.150	948.378
2041	188.487	4.240.959
2042	467.805	10.525.621
2043	1.326.649	29.849.595
2044	4.872.959	109.641.573
2045	8.932.818	200.988.396
2046	14.113.846	317.561.528
2047	24.746.869	556.804.555
2048	20.315.761	457.104.627
2049	20.526.209	461.839.701
2050	20.786.687	467.700.448
2051	21.109.075	474.954.179
2052	21.508.090	483.932.015
2053	22.001.940	495.043.657
2054	22.613.164	508.796.194
2055	23.369.672	525.817.612
2056	24.305.970	546.884.328
2057	25.464.836	572.958.806
2058	26.899.164	605.231.194
2059	28.674.388	645.173.731
2060	30.871.582	694.610.597
2061	33.590.985	755.797.164
2062	36.956.776	831.527.463

2063	41.122.567	925.257.761
2064	46.278.507	1.041.266.418
2065	52.659.940	1.184.848.657

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

A Tabela 4 apresenta a projeção de resíduos até 2065. Somados, os dados apontam que o país terá até 2065 que lidar com 12,9 milhões de toneladas de resíduos oriundos dos módulos solares. Os dados também apontam a distribuição geográfica destes resíduos no país (Figura 2).

Figura 2 – Distribuição Geográfica dos resíduos solares fotovoltaicos nos estados brasileiros em 2065



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa (2023)

A Figura 2 mostra que os resíduos fotovoltaicos gerados no país estarão concentrados no Centro-Sul brasileiro. Essa tendência é influenciada pelas condições climáticas presentes, caracterizadas por uma incidência solar notavelmente elevada ao longo do ano. Além disso, a densidade populacional significativa nessas áreas, aliada à concentração de atividades industriais e comerciais, aumenta a demanda por uma oferta crescente de energia, estimulando,

assim, a ampla adoção de tecnologias sustentáveis, como os sistemas fotovoltaicos.

Tal contexto reforça a importância de adotar um posicionamento estratégico robusto em relação aos resíduos sólidos decorrentes desses sistemas. O desenvolvimento de uma abordagem estratégica se torna fundamental para antecipar e enfrentar os desafios associados à gestão desses resíduos. É imprescindível considerar não apenas a eficiência na coleta e destinação final, mas também a implementação de práticas sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos. Ao adotar medidas estratégicas, os estados da região podem não apenas mitigar os impactos ambientais, mas também explorar oportunidades de inovação, promovendo a economia circular e fomentando a criação de empregos no setor de gestão de resíduos.

4.5 Discussão

Conforme Santos *et al.* (2022), o aumento dos resíduos fotovoltaicos proporciona um novo desafio ambiental com a necessidade de surgimento de novas indústrias para a reciclagem e o reaproveitamento dos módulos solares. No Brasil, deve-se instituir uma gestão eficiente, adotando uma política que exija que os produtores de módulos fotovoltaicos assumam responsabilidades ambiental e econômicas.

A energia solar fotovoltaica é divulgada como uma tecnologia sustentável que impulsiona a geração de energia limpa. No entanto, o crescimento significativo dessa fonte de energia traz consigo uma consequência indesejada: o aumento na quantidade de resíduos gerados por instalações de painéis solares fotovoltaicos danificados ou envelhecidos. Os dados estimados neste estudo, apontam que o Brasil terá que desenvolver estratégias para lidar com 12,9 milhões de toneladas de resíduos até 2065. No Brasil, o descarte e o aproveitamento desses resíduos como recursos ainda são incertos.

Segundo Kim e Park (2018), a UE, visualizando o impacto ambiental dos resíduos solares fotovoltaicos, direcionou a responsabilidade do produtor para o descarte e reciclagem adequada dos módulos fotovoltaicos, aplicando o modelo *Business-to-Business* (B2B).

A legislação da WEEE, da UE, solicita que os seus Estados-Membros estimem e enviem sua geração de resíduos de módulos fotovoltaicos, tendo a Alemanha como o primeiro Estado-Membro da UE a regulamentar os resíduos fotovoltaicos em 2015 e, conforme relatório anual da PV Cycle 2016, no somatório dos resíduos fotovoltaicos dos países membros, mais da metade de recuperação de materiais vem de resíduos fotovoltaicos alemães.

Outro ponto de destaque da legislação europeia é que o produtor ou importador deve declarar que possui os recursos disponíveis para financiar a reciclagem e gestão ambiental correta dos resíduos gerados pelo produto no final da sua vida útil (Majewski *et al.*, 2023). Esse modelo de gestão busca garantir que órgãos públicos de controle tenham um conhecimento do tratamento dos resíduos fotovoltaicos.

Segundo Kim e Park (2018), a reciclagem de resíduos solares fotovoltaicos ainda é cara, sendo a viabilidade econômica uma barreira significativa. Ao apontar que os resíduos fotovoltaicos no Brasil estarão concentrados nos estados do centro-sul do país, os resultados deste estudo podem contribuir para que estados e municípios dessas regiões se antecipem e desenvolvam estratégias para aproveitamento de resíduos. Em especial, isso ocorre porque países em desenvolvimento como o Brasil enfrentam barreiras adicionais do ponto de vista político, econômico e social para o avanço da economia circular (Cezarino *et al.*, 2019).

Uma opção seria incentivar a reciclagem. Iniciativas como no Japão, em que o consumidor paga uma taxa de reciclagem para produtos em final de vida ou no sistema sueco, em que o país realiza a coleta gratuita dos resíduos (Majewski *et al.*, 2023; Sasaki, 2004), precisam ser avaliadas ao seu respectivo contexto nacional.

Segundo Monier *et al.* (2014), a utilização de taxas de reciclagem pode disponibilizar fundos para apoiar a coleta e a reciclagem dos painéis. Apesar de ser questionável a criação de taxas para sistemas de energia limpa, Dias *et al.* (2018) apresentam que estudos anteriores demonstram ser necessário taxas para garantir a coleta e reciclagem ao longo do tempo.

É importante delinear que as principais nações geradoras de energia por sistemas fotovoltaicos, não possuem legislações que tratam do gerenciamento do fim da vida útil dos painéis solares fotovoltaicos (Majewski *et al.*, 2021), como é o caso do Brasil. A legislação europeia está vigente desde 2012 e embora não se aplique ao Brasil, pode ser considerada como um padrão a ser adotado.

Atualmente, no Brasil, a gestão dos resíduos solares fotovoltaicos, abrangendo seu manuseio, descarte e reciclagem, está sujeita à regulamentação estabelecida pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Essa legislação estabelece diretrizes e normas para o tratamento e o descarte responsável de resíduos sólidos em geral.

Em um passo adicional em direção à gestão mais eficaz dos resíduos sólidos, o governo brasileiro promulgou o PLANARES, pelo Decreto n.º 11.043, de 13 de abril de 2022, que estabeleceu diretrizes e metas para as próximas duas décadas, a fim de aprimorar a gestão dos resíduos sólidos em todo o país.

Apesar dos avanços na legislação brasileira relacionados à economia circular, é importante reconhecer que algumas cadeias de produção ainda enfrentam desafios significativos no que diz respeito à coleta e reciclagem de resíduos. Como destacado por Forti *et al.* (2020), em 2019, o Brasil se posicionou como o quinto maior produtor mundial de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE). No entanto, é preocupante observar que apenas 3% das 2 milhões de toneladas de REEE produzidas foram efetivamente recicladas (Gagliardi *et al.*, 2023).

Os resultados apresentados ressaltam a importância de uma perspectiva de cooperação entre a comunidade empresarial, entidades governamentais e sociedade civil para acolher a sustentabilidade como uma prioridade dos negócios, adotando estratégias que gerem valor conjunto e promovam mudanças sistêmicas rumo aos objetivos da economia circular.

4.6 Considerações Finais

É imprescindível que o Brasil estabeleça políticas e regulamentações específicas para a gestão integral da cadeia de valor da indústria fotovoltaica. Isso se deve à crescente importância e impacto da energia fotovoltaica no contexto brasileiro, bem como à necessidade de lidar com os complexos fluxos de resíduos gerados nas instalações passadas, produção atual e futura. Essa situação destaca a urgência de investir em pesquisas contínuas nesse campo, a fim de evitar que esse problema seja adiado para um futuro próximo.

A implementação da Diretiva WEEE pela União Europeia apresenta medidas e ações destinadas a promover uma economia circular em todas as etapas da cadeia de valor. Países em desenvolvimento, como o Brasil, podem usar essas iniciativas como referência e adotar regulamentações apropriadas para alcançar esse objetivo.

O descarte inadequado de resíduos fotovoltaicos em aterros sanitários, lixões ou no meio ambiente pode resultar em sérios impactos ambientais, comprometendo os benefícios da geração de energia por sistemas fotovoltaicos. Portanto, é essencial que o Brasil adote medidas concretas. Estima-se que entre os anos de 2034 e 2065, será necessário tratar 12 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos, com especial atenção aos módulos fotovoltaicos. Contudo, outros componentes, como inversores e baterias, requerem pesquisas adicionais para avaliação mais aprofundada dos seus impactos. Essa projeção destaca a urgência de ações efetivas para garantir a gestão adequada desses resíduos e mitigar qualquer impacto prejudicial ao meio ambiente.

Assim, torna-se evidente a importância de avaliar os impactos na economia circular dos resíduos fotovoltaicos, especialmente considerando que já está sendo abordado nos países líderes em geração de energia por sistemas fotovoltaicos. No entanto, no contexto brasileiro, a atenção a esse tema ainda é incipiente, carecendo de legislação específica e de fiscalização adequada para gerir eficazmente a cadeia circular da indústria fotovoltaica.

CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

A discussão de geração de energia limpa e país em desenvolvimento é um tema amplo, que impacta diversos setores e atividades. Esta pesquisa se limitou a estudar as políticas públicas e as suas contribuições para a redução dos gases de efeito estufa, bem como o possível impacto ambiental, não havendo preocupação com ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos e o conflito do uso da terra entre geração de energia e produção de alimentos.

No entanto, torna-se necessária a realização de ampla pesquisa para identificar novos impactos e oportunidades, mas de forma geral, o presente estudo analisou o crescimento da energia solar na matriz energética brasileira, como fonte de energia limpa para substituir os combustíveis fósseis, destacando a necessidade de regulamentações específicas, fiscalização no ciclo de vida dos resíduos fotovoltaicos e gerenciamento de autorizações de empreendimentos em terras agrícolas.

Essa abordagem integrada não apenas enriquece o debate sobre a sustentabilidade da energia fotovoltaica no Brasil, mas também aponta para direções cruciais para o seu crescimento sustentável. Além disso, a metodologia desenvolvida pode servir como um modelo replicável para estudos similares envolvendo outras fontes de energias renováveis, ampliando o escopo de análise e disponibilizando conhecimentos valiosos para políticas públicas e práticas industriais em nível global. Estudos conduzidos em regiões específicas podem fornecer dados mais significativos, considerando as particularidades locais e socioeconômicas do país.

Para a academia, esses estudos fornecem uma base sólida para pesquisas adicionais que explorem mais profundamente as implicações sociais, econômicas e ambientais da energia solar na sociedade brasileira. Investigar os impactos e oportunidades emergentes da crescente adoção da energia solar pode contribuir para a formulação de políticas e práticas mais eficazes e sustentáveis, promovendo, assim, um desenvolvimento mais equitativo e consciente do meio ambiente.

O rápido crescimento da indústria fotovoltaica no Brasil demanda uma revisão cuidadosa das suas operações. Diante da ausência de iniciativas governamentais, torna-se essencial que o setor fotovoltaico promova um diálogo construtivo com a sociedade civil e os governos para desenvolver regulamentações que não comprometam o avanço dessa tecnologia.

A negligência em abordar as questões levantadas nesta dissertação pode resultar, em longo prazo, na contribuição da indústria fotovoltaica para a poluição e a desaceleração do crescimento econômico e social do país. Portanto, é essencial agir de maneira proativa para

garantir que o crescimento dessa indústria ocorra de forma sustentável e benéfica para a nação.

Como sugestão para futuras pesquisas, recomenda-se a realização de uma revisão bibliométrica mais abrangente, incorporando outras bases de dados relevantes além da Web of Science utilizada neste estudo. Ademais, sugere-se a aplicação da metodologia deste estudo em regiões específicas do país, buscando identificar particularidades que possam ser exploradas e compartilhadas em âmbito nacional.

Além disso, é válido considerar a ampliação do escopo da pesquisa para incluir outros cenários, como a análise do impacto do crescimento dos sistemas fotovoltaicos na necessidade de expansão das redes de transmissão e distribuição no Brasil, bem como a investigação da contribuição desses sistemas na geração de combustíveis, como o hidrogênio verde. Essas abordagens adicionais podem enriquecer ainda mais o entendimento sobre os desdobramentos da energia fotovoltaica no contexto brasileiro.

Adicionalmente, o estudo propôs a implementação de um produto tecnológico que permitisse o cálculo da quantidade de dióxido de carbono evitado pelos sistemas fotovoltaicos, além de realizar projeções dos resíduos fotovoltaicos futuros, fornecendo ferramentas essenciais para a gestão e o monitoramento contínuos desses sistemas.

O produto tecnológico desempenhou um papel fundamental no estudo ao possibilitar calcular a quantidade de dióxido de carbono evitado pelos sistemas fotovoltaicos, bem como projetar os resíduos fotovoltaicos futuros. Essa tecnologia permitiu uma avaliação abrangente e detalhada dos impactos ambientais associados à energia solar, aspecto essencial para compreender plenamente as implicações sociais, econômicas e ambientais da adoção desses sistemas.

Ao oferecer uma maneira precisa de quantificar os benefícios ambientais dos sistemas fotovoltaicos, o produto tecnológico contribui diretamente para a validação e fortalecimento dos resultados do estudo. Além disso, ao projetar os resíduos fotovoltaicos futuros, essa ferramenta fornece informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias de gestão e mitigação, garantindo sustentabilidade e eficácia contínuas dos sistemas fotovoltaicos.

Por fim, presume-se que os impactos e as oportunidades dos sistemas fotovoltaicos nos países em desenvolvimento vão além da proposta desta dissertação e parece ser prudente que as práticas adotadas nos principais países com geração de energia solar, como Alemanha, China, EUA e Itália sejam analisadas e executadas, a fim de promover regulamentações modernas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Brasil 4º país que mais cresceu em 2021**. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solarfotovoltaica-brasil-e-o-4o-pais-que-mais-cresceu-em-2021/>. Acesso em: 21 abr. 2022.
- ABSOLAR. **Infográfico**. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em 30 de maio de 2023.
- ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no Mundo**. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 21 abr. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relação de empreendimentos de Geração Distribuída**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 04 out. 2023.
- AGENDA 2030. **ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs> . Acesso em: 05 set. 2022.
- ALMEIDA, Valdiney Ferreira de *et al.* Agenda ambiental da administração pública: A3P como instrumento de Educação Ambiental no Instituto Federal do Amazonas. **Revista Brasileira De Educação Ambiental (RevBEA)**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 452-473, abr. 2022.
- AMADUCCI, Stefano; YIN, Xinyou; COLAUZZI, Michele. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. **Applied energy**, Elsevier v. 220, p. 545-561, jun. 2018.
- AQUILA, Giancarlo *et al.* An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 70, p. 1090-1098, apr. 2017.
- BARRON-GAFFORD, Greg A. *et al.* Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 9, p. 848-855, sept. 2019.
- BEZERRA, Francisco Diniz. **Agropecuária: micro e Minigeração Distribuída e suas Perspectivas com a Lei 14.300/2022**. Fortaleza: BNB, 2022. n. 234. (Caderno Setorial Etene)
- BIANCO, E. *et al.* **Renewable Energy Market Analysis**. Southeast Europe, 2019.
- BOYACK, Kevin W. *et al.* Characterizing in-text citations in scientific articles: A large-scale analysis. **Journal of Informetrics**, v. 12, n. 1, p. 59-73, fev. 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa n. 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa n.º 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição PRODIST. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 de novembro de 2015. Seção 1. p. 124-133.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração

distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 abr. 2012. Seção 1, p. 44-48.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 02 de Agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 11 out. 2022.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. **Agenda Ambiental da Administração Pública (A3P)**. 2019. Disponível em: <http://a3p.mma.gov.br/eixos-tematicos>. Acesso em: 11 out. 2022.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. **Agenda Ambiental da Administração Pública**. 2022. Disponível em <http://a3p.mma.gov.br/instituicoes-parceiras/>. Acesso em: 11 out. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília: MME/EPE, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares**. Brasília, DF: MMA, 2022. Disponível em <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/> Acesso em: 06 jan. 2022.

BRASIL. **Paris Agreement Nationally Determined Contribution (NDC)**. 2022. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20FINAL%20-%20PDF.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2022.

BROSE, Markus Erwin. Entre o carvão e a transição energética: oscilações na política de desenvolvimento do Rio Grande do Sul. **Desenvolvimento em Questão**, v. 20, n. 58, p. e10592-e10592, mai. 2022.

BUIATTI, Gustavo Malagoli *et al.* Metodologia para estimativa de redução de emissões de CO2 aplicada a sistemas de microgeração fotovoltaica. *In: Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 2016. p. 1-8

CEZARINO, Luciana Oranges et al. Diving into emerging economies bottleneck: Industry 4.0 and implications for circular economy. **Management Decision**, v. 59, n. 8, p. 1841-1862, aug. 2021.

CHRIST, Gabriela Daiana; PIFFER, Moacir. Rumo à sustentabilidade: uma análise da implementação dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável em Instituições de Ensino Superior. *In: Encontro da ANPAD*, 46., 2022, Maringá. **Anais...** Maringá: Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração, 2021. Disponível em <http://www.anpad.org.br>. Acesso em: 04 jan. 2023.

CICHOSKI, Pamela; CORONA, Hieda Maria Pagliosa; MELLO, Nilvania Aparecida de. Desenvolvimento sustentável e agenda 2030: reflexões sobre a relação sociedade e natureza. **Terr@ Plural**, v. 16, p. 1-23, set. 2022.

CONTRERAS-LISPERGUER, Rubén *et al.* A set of principles for applying Circular Economy to the PV industry: Modeling a closed-loop material cycle system for crystalline photovoltaic panels. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 28, p. 164-179,

oct. 2021.

COOK, Deborah J.; MULROW, Cynthia D.; HAYNES, R. Brian. Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions. **Annals of internal medicine**, v. 126, n. 5, p. 376-380, mar. 1997.

CORRÊA, L.; CÁRIO, S. A. F. As políticas públicas em energia eólica e solar fotovoltaica no Brasil: uma análise baseada na teoria de políticas mission-oriented. *In*: VI Encontro Nacional de Economia Industrial - ENEI, vol. 9, n.1, p. 1379-1396, mai. 2022.

COUNCIL, China Electricity. **Annual development report of China's power industry**. Beijing: CEC, 2011.

CQNUMC. **Acordo de Paris** - Status de Ratificação, Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Clima, 2016. Disponível em: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification> Acesso em: 05 sept. 2022.

DE MAGALHÃES, Ruane Fernandes; DANILEVICZ, Ângela de Moura Ferreira; PALAZZO, Joseph. Managing trade-offs in complex scenarios: A decision-making tool for sustainability projects. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 212, p. 447-460, mar. 2019.

DENYER, David; TRANFIELD, David. **Producing a systematic review**. In D. A. Buchanan & A. Bryman (Eds.), *The Sage handbook of organizational research methods*, p. 671-689, mar. 2009.

DIAS, Pablo; BERNARDES, Andréa Moura; HUDA, Nazmul. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management: An analysis on the Australian e-waste recycling scheme. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 197, p. 750-764, oct. 2018.

DINESH, Harshavardhan; PEARCE, Joshua M. The potential of agrivoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 54, p. 299-308, feb. 2016.

DUARTE, Tiago Ribeiro. O painel brasileiro de mudanças climáticas na interface entre ciência e políticas públicas: identidades, geopolítica e concepções epistemológicas. **Sociologias**, v. 21, p. 76-101, agost. 2019.

DUFLOU, Joost R. *et al.* Demanufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery. **CIRP Annals**, Elsevier, v. 67, n. 1, p. 29-32, jan. 2018.

DUPRAZ, Christian *et al.* Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. **Renewable energy**, Elsevier, v. 36, n. 10, p. 2725-2732, oct. 2011.

DUTRA, Cayo César. A sustentabilidade na administração pública e as “compras compartilhadas”: o compartilhamento das compras públicas como prática sustentável nas Instituições Públicas Federais de Ensino Superior no Estado de Roraima. Itaim Bibi, São Paulo: **Editora Dialética**, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório final**: Balanço Energético

Nacional-BEN. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 05 set. 2022.

ENERGY, Solar Photovoltaic. **Technology Roadmap**. Paris: Technical Report, IEA, 2014. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-energy-storage>. Acesso em: 29 dez. 2022.

ENSSLIN, Leonardo et al. ProKnow-C, knowledge development process-constructivist. **Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI**, Brasil, v. 10, n. 4, p. 2015, abr. 2010.

EUROPEAN COMMISSION. **Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report**. 2023. Disponível em: https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/studycritical-raw-materials-eu-2023-final-report_en. Acesso em: 02 dez. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU, a foresight study, European Commission Joint Research Centre**. 2020. Disponível em: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf. Acesso em: 02 dez. 2023.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023 - Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum**. Roma: FAO, 2023.

FORTI, Vanessa *et al.* **The global e-waste monitor 2020**. Geneva: United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020. v. 120

FRANCO, Maria A.; GROESSER, Stefan N. A systematic literature review of the solar photovoltaic value chain for a circular economy. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9615, aug. 2021.

FREIRE, Julliana L. M. *et al.* Avaliação das previsões numéricas de curto prazo da irradiância solar para região de Ilha Solteira-SP. *In*: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, 2022. p. 1-8.

GAGLIARDI, Sara Francino *et al.* Logística Reversa: uma análise dos indicadores de sustentabilidade das organizações de recicladores de Uberlândia-MG. **Revista ADMPG**, [S. l.], v. 13, n. 1, 2023. DOI: 10.5212/Admpg.v.13.21164.004. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/admpg/article/view/21164>. Acesso em: 25 mar. 2024.

GASPARIN, Fernanda Bach. A Influência de Políticas Públicas para o Progresso da Geração Solar Fotovoltaica e Diversificação da Matriz Energética Brasileira. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 1, p. 77-81, jun. 2022.

GAUTAM, Ayush; SHANKAR, Ravi; VRAT, Prem. End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: a step towards a circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 26, p. 65-77, apr. 2021.

GEHRKE, Poleana; GORETTI, Ana Alice Timm; AVILA, Lucas Veiga. Impactos da matriz

energética no desenvolvimento sustentável do Brasil. **Revista de Administração da UFSM**, v. 14, p. 1032-1049, mar. 2021.

GIELEN, Dolf *et al.* **Global energy transformation: a roadmap to 2050**. Emirados Árabes Unidos. Irena, 2019.

GIL-LAMATA, Mercedes; LATORRE-MARTÍNEZ, María Pilar. The circular economy and sustainability: a systematic literature review. **Cuad. gest. (Bilbao)**, n. ART-2022-128134, jan. 2022.

GOLDEMBERG, José; VILLANUEVA, Luz Dondero. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Edusp, 2003. v. 3

GONZÁLEZ CELIS, Rosario. **Matriz energética mundial y el cambio climático: Estado actual**. Orientador: Raúl Ávila Forero. 24 f. 2020. Tese (Doutorado em Gestión Sostenible de Energía) - Gestión Sostenible de la Energía, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Maestría en Ingeniería, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Bogotá, 2022.

GUTIERREZ, M. B. G. P. S. Uma Avaliação comparativa da sustentabilidade do setor de energia brasileiro com os países da OCDE. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2022.

HART, Jim; POMPONI, Francesco. A circular economy: where will it take us?. **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 127-141, mar. 2021.

HEFFRON, R. *et al.* Justice in solar energy development. Justice in solar energy development. **Solar Energy**, Elsevier, v. 218, p. 68-75, 2. apr. 021.

IEA. **Global Energy Review 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>. Acesso em: 06 jun. 2022.

IEA. **Global Energy Review 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>. Acesso em: 06 jun. 2022.

IEA. **Global Energy Review 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 04 jan. 2023.

IRENA, I.-P. **End-of-life management: Solar photovoltaic panels**. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016.

IRENA, R. E. S. **International renewable energy agency**. Abu Dhabi: Renewable Energy Target Setting, 2021.

IRENA. **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023. Disponível em: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_v_1_2023.pdf?rev=b1d4be858ad549a9a750921d0f2b5d53. Acesso em: 01 jul. 2023

KATKAR, Venkatesh V. *et al.* Strategic land use analysis for solar energy development in New York State. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 173, p. 861-875, aug. 2021.

KIM, Hana; PARK, Hun. PV waste management at the crossroads of circular economy and energy transition: the case of South Korea. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 3565, sept. 2018.

KONZEN, Bárbara Anne Dalla Vechia; PEREIRA, Andrea Franco. Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o cenário de fim de vida do sistema. *In*: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, 2020.

LIRA, Marcos Antônio Tavares *et al.* Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 389-397, abril. 2019.

LIU, Laibao *et al.* Potential contributions of wind and solar power to China's carbon neutrality. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 180, p. 106155, may. 2022.

LO, Kevin. Can authoritarian regimes achieve just energy transition? Evidence from China's solar photovoltaic poverty alleviation initiative. **Energy Research & Social Science**, Elsevier, v. 82, p. 102315, dec. 2021.

MAJEWSKI, Peter *et al.* Product stewardship considerations for solar photovoltaic panels. **AIMS Energy**, v. 11, n. 1, p. 140-155, febr. 2023.

MAJEWSKI, Peter *et al.* Recycling of solar PV panels-product stewardship and regulatory approaches. **Energy Policy**, v. 149, p. 112062, febr. 2021.

MAKA, Ali OM; ALABID, Jamal M. Solar energy technology and its roles in sustainable development. **Clean Energy**, v. 6, n. 3, p. 476-483, jun. 2022.

MALAQUIAS, Rodrigo Fernandes *et al.* The Adoption of Solar Photovoltaic Systems in Rural Areas of Brazil. **Estudios Rurales**, v. 13, n. 27, mar. 2023.

MALU, Prannay R.; SHARMA, Utkarsh S.; PEARCE, Joshua M. Agrivoltaic potential on grape farms in India. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Elsevier, v. 23, p. 104-110, p. 104-110, oct. 2017.

MARINOSKI, Deivis Luis; SALAMONI, Isabel Tourinho; RÜTHER, Ricardo. Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC. *In*: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, 2004, São Paulo.

MARROU, Hélène *et al.* Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 177, p. 117-132, aug. 2013.

MARROU, Hélène *et al.* Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. **European Journal of Agronomy**, Elsevier, v. 44, p. 54-66, jan. 2013.

MASUTTI, Mariela Camargo; TABARELLI, Giceli; SANTOS, Ísis Portolan dos. Potencial de implantação de um sistema fotovoltaico gerador de energia em coberturas de estacionamentos. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 4, n. 2, p. 15-23, jan. 2016.

MATHUR, N.; SINGH, S.; SUTHERLAND, J. W. Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis. **Resources, Conservation and Recycling**,

Elsevier, v. 155, p. 104649, apr. 2020.

MHUNDWA, Russel; SIMON, Michael; YONGOUA, Joel Nana. The electrical energy impact of small-scale onsite generation: A case study of a 75 kWp grid-tied PV system. **Journal of Energy in Southern Africa**, v. 31, n. 4, p. 1-15, nov. 2020.

MONIER, Véronique *et al.* **Development of Guidance on Extended Producer Responsibility EPR**. 2014.

MOORE, Sharlissa et al. Can we have clean energy and grow our crops too? Solar siting on agricultural land in the United States. **Energy Research & Social Science**, Elsevier, v. 91, p. 102731, sept. 2022.

MORRISON-SAUNDERS, Angus; POPE, Jenny. Conceptualising and managing trade-offs in sustainability assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, Elsevier, v. 38, p. 54-63, jan. 2013.

NAHMÍAS, Pablo da Silva; FERREIRA, Luciana Rodrigues. Sustentabilidade e o consumo de energia elétrica: um estudo de caso do Banco da Amazônia S/A: Sustainability and electric energy consumption: a case study from Banco da Amazônia S/A. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**, v. 20, n. 39, p. 119-132, abr. 2022.

NONHEBEL, Sanderine. Renewable energy and food supply: will there be enough land?. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 191-201, apr. 2005.

NREL. **Net Metering. National Renewable Energy Laboratory**. 2021. Disponível em: <https://www.nrel.gov/state-local-tribal/basics-net-metering.html> . Acesso em: 06 jun. 2022.

OLIVEIRA, Thais Brito de; GALVÃO JUNIOR, Alceu de Castro. Planejamento municipal na gestão dos resíduos sólidos urbanos e na organização da coleta seletiva. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 55-64, abr. 2016.

ONU BR; NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **A Agenda 2030**. 2015. Disponível em <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030>. Acesso em: 21 abr. 2022.

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: Inpe, 2017. v. 1

PEREIRA, Reuler Cardoso. **Políticas públicas para expansão da energia solar fotovoltaica**: um estudo dos principais programas de incentivo da tecnologia no Brasil. Orientador: Dr. Sérgio Batista Silva. 2019. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia De Goiás, Itumbiara-GO, 2019.

RATURÍ, Atul K. **REN21, 2019: Asia and the Pacific Renewable Energy Status Report**, 2019.

RIBEIRO FILHO, Luiz Alberto de Souza; PEREIRA, Vitor Lima; VELÁZQUEZ, Sílvia Maria Stortini González. Simulador De Energia Solar Para Implementação De Sistemas Fotovoltaicos No Contexto Urbano. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 22, n. 1, p. 82-104, fev. 2022.

RICHARDSON, Roberto Jarry *et al.* **Pesquisa social: métodos e técnicas.** São Paulo: Atlas, 1985.

RITZEN, Michiel *et al.* IEA-PVPS Task 15. *In: Proceedings of the 48th IEA PVPS Executive Committee Meeting.* Vienna, Austria, 2016. p. 15-16.

SANQUETTA, Carlos Roberto *et al.* Emissões de dióxido de carbono associadas ao consumo de energia elétrica no Paraná no período 2010-2014. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 1-6, abr. 2017.

SANTOS, Afonso de Paula dos *et al.* Controle de qualidade posicional em dados espaciais utilizando feições lineares. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, p. 233-250, abr. 2015.

SANTOS, Mario Roberto dos; BRITO, José Luiz Romero de; SHIBAO, Fabio Ytoshi. Economia circular e a energia solar fotovoltaica. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 19, n. 1, p. 293-311, jan/mar 2022.

SARGENTIS, G.-Fivos *et al.* Agricultural land or photovoltaic parks? The water–energy–food nexus and land development perspectives in the thessaly plain, Greece. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 8935, aug. 2021.

SASAKI, Kohei. **Examining the waste from electrical and electronic equipment Management Systems in Japan and Sweden.** Lund, Sweden: Lund University Master's Programme in Environmental Science, 2004.

SCHOSSLER, Karina *et al.* **Licitações Sustentáveis:** demonstrativo de conformidades de acordo com o guia nacional de licitações sustentáveis (Gnls) de editais das principais Universidades Federais da Região do Triângulo Mineiro. Atena Editora Copyright, 2021.

SCOLARI, Bruno Sabino *et al.* Mapping and characterization of the grid-connected photovoltaic systems in the city of Curitiba: preliminary results. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 61, mar. 2018.

SEKIYAMA, Takashi; NAGASHIMA, Akira. Solar sharing for both food and clean energy production: Performance of agrivoltaic systems for corn, a typical shade-intolerant crop. **Environments**, v. 6, n. 6, p. 65, jun. 2019.

SICA, Daniela *et al.* Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 2934-2945, feb. 2018.

SILVA, Anderson Solimões da; YOUNG, Carlos Eduardo Frickmann. Compras públicas (IN) sustentáveis da secretaria municipal de meio ambiente e sustentabilidade de Manaus. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 5, p. 34887-34908, mai. 2022.

SILVA, Raissa Pereira Araújo e. **O Brasil e o regime internacional de mudanças climáticas:** Contribuições Nacionalmente Determinadas e o Acordo de Paris (COP 21). Orientador: Prof. Thiago Gehre. 2019. 25 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Relações Internacionais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

UNICEF. **The state of food security and nutrition in the world 2021.** Rome, Italy. 2021.

USDA. **United States Department of Agriculture**. Oilseeds: World Markets and Trade, 2023. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0623.pdf> . Acesso em: 23 jun. 2023.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2006. v. 34. p. 38

WASTE FROM ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT (WEEE). **Diretiva WEEE 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02012L0019-20180704>. Acesso em: 21 abr. 2022.

WESELEK, Axel *et al.* Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 39, p. 1-20, jun. 2019.

ZHANG, Libo *et al.* Projection of waste photovoltaic modules in China considering multiple scenarios. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 33, p. 412-424, sept. 2022.