

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Pedro Parron Vargas

Energia Solar Fotovoltaica: Análise de sua expansão no Brasil

Florianópolis

2023

Pedro Parron Vargas

Energia Solar Fotovoltaica: Análise de sua expansão no Brasil

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Renato Lucas Pacheco.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vargas, Pedro Parron

Energia Solar Fotovoltaica : Análise de sua expansão no
Brasil / Pedro Parron Vargas ; orientador, Renato Lucas
Pacheco, 2023.

51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Energia solar fotovoltaica.
3. Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil. 4.
Energia Solar. 5. Matriz energética brasileira. I.
Pacheco, Renato Lucas. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Pedro Parron Vargas

Energia Solar Fotovoltaica: Análise de sua expansão no Brasil

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 28 de abril de 2023.



Documento assinado digitalmente

Miguel Moreto

Data: 06/05/2023 20:19:33-0300

CPF: ***.850.100-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Miguel Moreto, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Renato Lucas Pacheco

Data: 06/05/2023 10:33:56-0300

CPF: ***.751.489-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Roberto de Souza Salgado

Data: 08/05/2023 08:15:32-0300

CPF: ***.850.742-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Roberto de Souza Salgado, Dr.

Avaliador(a)

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Roberto Francisco Coelho

Data: 09/05/2023 09:55:43-0300

CPF: ***.034.249-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Roberto Francisco Coelho, Dr.

Avaliador(a)

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha namorada, à minha família e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha namorada, Christiane Vieira Nascimento, por todo amor, apoio, confiança e parceria ao longo do curso e pelas diversas contribuições ao desafio que foi a realização desse trabalho. Obrigado por estar sempre presente nos momentos difíceis dentro e fora da faculdade.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Renato Lucas Pacheco, por toda paciência e confiança depositadas em mim e por estar sempre disponível apesar das inúmeras funções atreladas ao seu cargo como chefe do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Sou grato à minha família por toda a confiança e suporte depositados ao longo do curso, sobretudo meu pai, Miguel Hostilio Silveira Vargas, que teve enorme contribuição para que eu desejasse me tornar engenheiro eletricista.

Gratidão à família da minha namorada, sobretudo meus sogros, pela confiança e contribuição pessoal e profissional depositadas na minha carreira de engenheiro eletricista.

Agradeço a todos os amigos da graduação que compartilharam dos desafios que enfrentamos ao longo dos cinco anos de curso, especialmente o Pedro Henrique Cardoso Costa, que me acompanhou desde a primeira aula.

Agradeço a banca que me avaliou e por sua contribuição para aprimorar este trabalho até sua versão final.

Também quero agradecer à UFSC e aos mestres que tive ao longo do curso que contribuíram para a escolha da carreira que seguirei.

“Eu colocaria meu dinheiro no sol e na energia solar. Que fonte de energia! Espero que não tenhamos que esperar até que o petróleo e o carvão acabem para fazer isso.”

Thomas Edison

RESUMO

Atualmente, vivencia-se uma forte expansão do uso da energia solar fotovoltaica no Brasil, sendo cada vez mais comum na modalidade de geração distribuída, comumente presente em residências e comércios, ou na modalidade de geração centralizada, em grandes usinas fotovoltaicas. O presente trabalho de conclusão de curso possui como objetivo analisar a expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil. Ao longo do trabalho, são expostos dados, percepções, barreiras e soluções relacionadas tanto ao histórico de expansão da energia solar fotovoltaica nos últimos anos, quanto à expectativa de expansão nos próximos. A metodologia adotada baseia-se em pesquisas bibliográficas que envolvem a expansão da energia solar fotovoltaica no país, buscando produções relevantes envolvendo essa expansão. O trabalho é estruturado em cinco capítulos, sendo dois capítulos iniciais, introduzindo o tema e fornecendo conceitos fundamentais envolvendo energia solar fotovoltaica, dois capítulos intermediários, o primeiro evidenciando dados e percepções sobre essa expansão e, o segundo, exibindo barreiras enfrentadas e algumas soluções para elas. Um último capítulo conclui o trabalho. Ao final do trabalho, percebe-se que a expansão da energia solar fotovoltaica na década de 2010 foi extremamente acentuada e precisou vencer diversas problemáticas para que o setor fotovoltaico, recém formado, alcançasse o amadurecimento e a força atuais. A expectativa atual é que o setor, indiscutivelmente, possui uma ampla margem de crescimento até o fim da década de 2020, trilha que já se iniciou com uma rápida escalada na potência instalada e com uma estruturação firme, tanto governamental, por parte da ANEEL e outros órgãos, quanto por parte da iniciativa privada, com seus integradores e distribuidores de equipamentos.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil. Energia Solar. Matriz energética brasileira.

ABSTRACT

Currently, there is a strong expansion in the use of photovoltaic solar energy in Brazil, being increasingly common in the form of distributed generation, commonly present in homes and businesses, or in the form of centralized generation, in large photovoltaic plants. This final work aims to analyze the expansion of photovoltaic solar energy in Brazil. Throughout the work, data, perceptions, barriers and solutions related to both the history of expansion of photovoltaic solar energy in recent years and the expectation of expansion in the coming years are exposed. The methodology adopted is based on bibliographic research involving the expansion of photovoltaic energy in the country, seeking relevant productions involving this expansion. The work is structured in five chapters, with two initial chapters introducing the theme and providing fundamental concepts involving photovoltaic solar energy, two intermediate chapters, the first showing data and perceptions about this expansion and the second showing barriers faced and some solutions for them. A last chapter concludes the work. At the end of the work, it is clear that the expansion of photovoltaic solar energy in the 2010s was extremely pronounced and had to overcome several problems for the newly formed photovoltaic sector to reach the maturity and current strength. The current expectation is that the sector undoubtedly has a large margin of growth until the end of the 2020s, a path that has already started with a rapid increase in installed power and with a firm structuring by the government, by ANEEL and other bodies, and by the part of the private sector with its equipment integrators and distributors.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Expansion of photovoltaic solar energy in Brazil. Solar energy. Brazilian energy matrix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeira parte do Infográfico ABSOLAR de janeiro de 2023	16
Figura 2 - Segunda parte do Infográfico ABSOLAR de janeiro de 2023	23
Figura 3 - Estrutura padrão de um módulo fotovoltaico monofacial	26
Figura 4 - Módulo bifacial e suas diferenças na cobertura posterior	26
Figura 5 - Diferentes modelos de sistemas fotovoltaicos conforme a topologia de inversor	28
Figura 6 - Sistema off grid e on grid	29
Figura 7 - Número de instalações por estados da região SE e fonte de energia utilizada para GD	33
Figura 8 - Potência instalada, em kW, por estados da região SE e fonte de energia utilizada para GD	33
Figura 9 - Projeção de GW instalados de energia fotovoltaica e toneladas de módulos descartados	40
Figura 10 - Menu de Geração Elétrica do Painel de Consolidação do PDE 2031	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR: Norma Brasileira aprovada pela ABNT.

ABSOLAR: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica.

ACL: Ambiente de Livre Contratação.

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica.

BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

CA: Corrente Alternada.

CC: Corrente Contínua.

CEG: Código de identificação do Empreendimento de Geração de energia elétrica.

CGH: Central de Geração Hidrelétrica.

EPE: Empresa de Pesquisa Energética.

ESFV: Energia Solar Fotovoltaica.

GD: Geração Distribuída.

IEA-PVPS: *International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme*.

INEE: Instituto Nacional de Eficiência Energética.

IRENA: Agência Internacional para Energias Renováveis.

MLPE: *Module Level Power Electronics*.

MME: Ministério de Minas e Energia.

MMGD: Micro e Minigeração Distribuída.

MPPT: *Maximum Power Point Tracker* (do português, SPPM).

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico.

PDE 2031: Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (2022 a 2031).

POPS: *Power Optimizer for Photovoltaic Systems*.

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

RAPEEL: Relatório de Acompanhamento de Empreendimentos de Geração de Energia Elétrica.

REEE: Resíduos de Equipamento Elétrico e Eletrônico

REN: Resolução Normativa ANEEL.

SE: Região Sudeste.

SIN: Sistema Interligado Nacional.

SPPM: Seguimento de Ponto de Máxima Potência (do inglês, MPPT).

STC: *Standard Test Conditions*.

TCC: Trabalho de Conclusão de Curso.

UTE: Usina Termelétrica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA	13
1.2	PROBLEMATIZAÇÃO	13
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	OBJETIVOS	17
1.4.1	Geral	17
1.4.2	Específicos	17
1.5	METODOLOGIA	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTOS DA ENERGIA FOTOVOLTAICA	21
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	21
2.2	ENERGIA SOLAR	24
2.3	EFEITO FOTOVOLTAICO	24
2.4	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	25
2.5	CÉLULAS E MÓDULOS	25
2.6	INVERSORES FOTOVOLTAICOS	27
2.7	MODELOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	27
3	EXPANSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL	31
3.1	DADOS NACIONAIS DA EXPANSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA	31
3.2	DADOS REGIONAIS DA EXPANSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA	32
3.3	DADOS INTERNACIONAIS DA EXPANSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA	33
4	BARREIRAS E SOLUÇÕES PARA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL	37

4.1	BARREIRAS FINANCEIRAS PARA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL	37
4.2	BARREIRAS FUNCIONAIS PARA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL	38
4.3	SOLUÇÕES PARA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL	40
4.4	PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA E ENERGIA FOTOVOLTAICA	41
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Energia Solar Fotovoltaica: Análise de sua expansão no Brasil.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

A Energia Fotovoltaica é aquela gerada a partir do efeito fotovoltaico, que consiste na transformação de energia eletromagnética em elétrica por meio da tensão elétrica gerada em uma célula formada por semicondutores. Se houver um circuito fechado entre dois eletrodos, surgirá uma corrente elétrica (PURIFICAÇÃO; RAMOS; KNISS, 2020). No capítulo 2, em seções específicas para cada um, os conceitos de energia solar fotovoltaica, efeito fotovoltaico e célula fotovoltaica serão melhor explorados.

Atualmente, vivencia-se uma forte expansão de usinas fotovoltaicas no Brasil (ABSOLAR, 2023), sendo cada vez mais fácil encontrar tais estruturas em residências ou empresas, sejam elas de microgeração distribuída, menores, ou minigeração distribuída, maiores. A princípio, a geração de energia elétrica de forma distribuída - sendo a geração de energia fotovoltaica a principal fonte nessa modalidade - pode resolver alguns problemas, diversificando a matriz energética brasileira, fortemente dependente de usinas hidrelétricas e termelétricas, por exemplo, e criar outros devido a características inerentes a esse tipo de energia. Desde a REN 482/2012 (ANEEL) e, mais recentemente, o Marco Geral da Geração Distribuída, a Lei 14.300/2022 (BRASIL, 2022), a relevância de se discutir sobre geração distribuída, e, mais especificamente, sobre a geração de energia fotovoltaica, se mostra cada vez mais evidente.

Além disso, a partir de panoramas sobre a energia solar fotovoltaica (como os da figura 1, 2 e 10), percebe-se como tem crescido constantemente a demanda por projetos fotovoltaicos, o que o leva a questionar quais seriam os impactos desse crescimento exorbitante da geração de energia de forma distribuída nas redes elétricas, desde uma influência mais localizada - de uma rua, por exemplo, se tornando um ponto de majoritária geração de energia em certos momentos e de

majoritária absorção de energia em outros - até uma influência mais generalizada - passar a visualizar uma cidade como, além de um ponto de carga na rede, um ponto de geração de energia em certos momentos do dia.

Isso leva a pensar a rede de uma forma não tão tradicional (em que se tem geradores, principalmente, em uma ponta da malha das linhas de transmissão e cargas em outra ponta), mas sim de uma forma transitória, em que, além das cargas (unidades consumidoras), há geradores de maior e menor porte em diversos pontos da rede. Essa problemática é tão relevante que levou a uma importante mudança da tarifação de energia imposta pela Lei 14.300/2022, com a cobrança do custo de transmissão (popularmente chamado de “Fio B”), que busca trazer uma tarifação adicional pela absorção de energia da rede que as unidades consumidoras praticam em horários em que seus consumos são maiores que sua geração de energia (normalmente nas horas finais do dia e à noite).

Perante o exposto, foram formuladas questões como: Qual o motivo da expansão da energia fotovoltaica no país? O Sistema Interligado Nacional (SIN) possui previsão para dessa expansão? Quais as consequências na Rede com essa escalada de injeção de energia descentralizada?

Todas essas indagações levam a um questionamento final: Qual a perspectiva da expansão da energia fotovoltaica no Brasil?

1.3 JUSTIFICATIVA

Entende-se que, com a evolução da relação do brasileiro com a modalidade de geração de energia de forma distribuída, seja qual for sua modalidade, nos últimos dez anos (sobretudo, desde a REN 482/2012), é de extrema importância que seja debatido como a ampla utilização dessa modalidade de geração energética influencia a rede elétrica localmente (em cada rua, cidade, estado) e no todo, ou seja, o Sistema Interligado Nacional (SIN)

Conforme comentado anteriormente, dados como os das figuras 1, 2 e 10 mostram o ritmo agressivo que o número de sistemas fotovoltaicos tem aumentado - com mais de 10 MW instalados ao longo de 2022 e totalizando 24 MW, 11,20% da

matriz energética brasileira, conforme explicitado na figura 1 (ABSOLAR, 2023) -, o que leva a questionar não apenas o porquê desse aumento desenfreado, mas, também, quais as consequências dele.

Com o passar do tempo, quanto mais o autor fazia projetos e tinha acesso a devolutivas das distribuidoras de energia e órgãos governamentais, com dados mostrando o aumento do número de unidades consumidoras com sistemas fotovoltaicos, foi percebido que pouco se comentava sobre esse crescimento da energia fotovoltaica no Brasil em artigos, notícias ou matérias técnicas. Isso o fez perceber a relevância de discutir sobre geração distribuída, geração de energia fotovoltaica e, principalmente, seus crescimentos no país na última década.

Dessa forma, o presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) busca estudar sobre os tópicos citados anteriormente, especificamente, o crescimento da energia fotovoltaica no país e as consequências disso.

Figura 1 - Primeira parte do Infográfico ABSOLAR de janeiro de 2023.



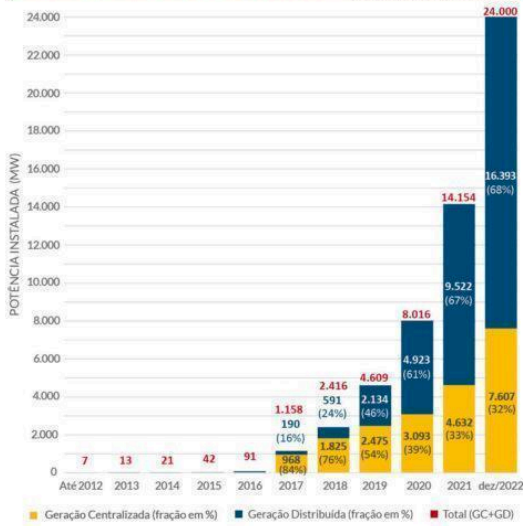
Benefícios da Fonte Solar Fotovoltaica ao Brasil

Fonte: ABSOLAR, 2023.



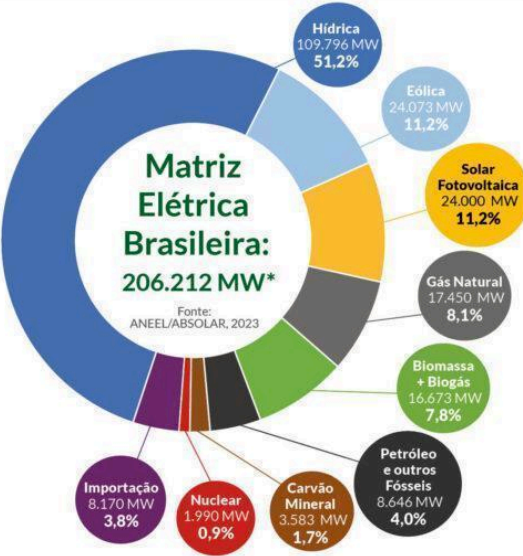
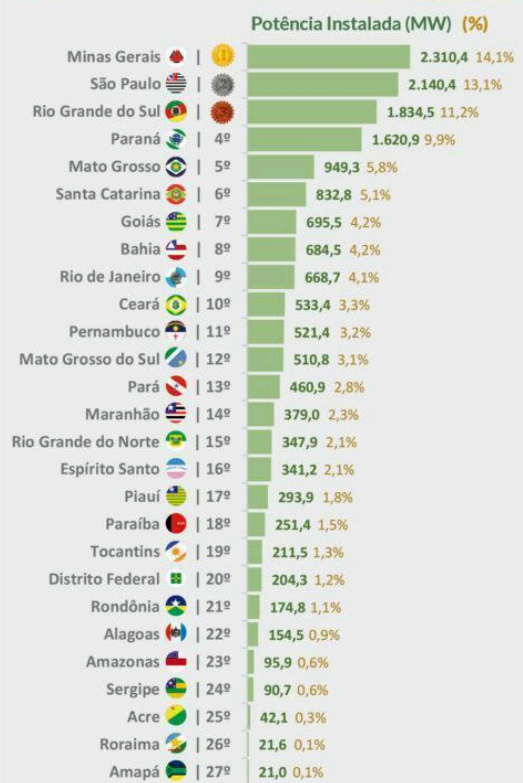
Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.



Geração Distribuída Ranking Estadual

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.



*A potência total da matriz não inclui a importação e segue critério aplicado pelo MME, que adiciona, nos valores de capacidade instalada, as quantidades de mini e microgeração distribuída associadas a cada tipo de fonte.

Ranking Municipal

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.



Fonte: ABSOLAR, 2023.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

- Realizar uma investigação sobre como tem sido a expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Verificar a expansão da energia fotovoltaica no Brasil.
- Explorar quais as consequências do crescimento da energia fotovoltaica.
- Analisar barreiras para a utilização da energia fotovoltaica no país.
- Identificar soluções para as problemáticas envolvendo a energia fotovoltaica no país.
- Estudar como está organizada a expansão dessa energia de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (PDE 2031).

1.5 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa, com revisão de materiais encontrados no Google Acadêmico, em livros, periódicos e grandes sites (Portal Solar, ABSOLAR e outros) que abordam acerca da energia fotovoltaica, com o objetivo de investigar qual a perspectiva da expansão da energia fotovoltaica no Brasil.

Por conta de a expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil se tratar de um fenômeno que apenas começou por volta de 2012 (significativamente, após a REN 482/2012) e aumentou sua relevância acadêmico-científica proporcionalmente ao seu acontecimento, a seleção de textos foi feita de maneira mais qualitativa, buscando artigos sobre diferentes pontos relacionados ao tema a partir de sua relevância e coerência com o objetivo proposto para o trabalho, do que quantitativa - que seria realizar uma seleção de inúmeros textos para cada ponto específico discutido, o que seria difícil, pois foram encontradas poucas produções acerca do tema.

Ainda assim, a seleção de produções resultou em torno de 25 referências bibliográficas, dentre leis, resoluções normativas, livros, artigos científicos, periódicos e matérias de portais relevantes ao tema, sempre buscando utilizar informações atualizadas com a constante mudança do setor fotovoltaico e retificar com fontes mais atuais situações que já tenham se alterado com o passar dos anos.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro dividido em seis seções: introduzindo o trabalho, a problematização que o faz surgir, a justificativa de sua relevância, seu objetivo geral e seus cinco objetivos específicos - os dois primeiros mais discutidos no capítulo 3 e os três últimos no capítulo 4 -, a metodologia aplicada e essa apresentação de como está estruturado o trabalho.

O segundo capítulo traz conceitos fundamentais para o entendimento do princípio de funcionamento de sistemas fotovoltaicos e conceitos intimamente relacionados com a energia solar fotovoltaica, sendo dividido em sete seções: geração distribuída, que possui forte relação com essa forma de energia; energia solar, que abrange a energia solar térmica e fotovoltaica; efeito fotovoltaico, que é o princípio básico de geração de energia dessa fonte energética; energia solar fotovoltaica, que é o objeto principal do trabalho; células e módulos, que são os entes geradores da energia elétrica a partir do efeito fotovoltaico; inversores fotovoltaicos, inversores de energia montados especificamente para uso com módulos fotovoltaicos; e modelos de sistemas fotovoltaicos, descrevendo algumas categorizações desses sistemas de energia.

O terceiro capítulo descreve objetivamente como ocorreu a expansão da geração de energia solar fotovoltaica, trazendo dados dessa expansão no Brasil, algumas conexões com a expansão vista no mundo, percepções de diversos autores acerca do aumento contínuo de sistemas fotovoltaicos no país e vantagens dessa fonte de geração energética.

O quarto capítulo faz um complemento ao terceiro, ao trazer barreiras que a energia solar fotovoltaica enfrentou desde que começou a ser amplamente utilizada, elencando soluções e contornos que foram aplicados, problemas que ainda são

realidade e medidas que são ou precisam ser tomadas e previsões de desafios que surgirão e resoluções que poderão ser utilizadas. Ao final do capítulo, ainda é exposto o último Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) lançado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o PDE 2031 (EPE, 2022), para discussão sobre o futuro da energia fotovoltaica no país e sua contínua expansão.

Por fim, o quinto capítulo conclui o trabalho fechando um panorama sobre o tema discutido, comentando pontos relevantes observados ao longo da realização do trabalho e lembrando discussões relevantes feitas nos capítulos anteriores, sobretudo nos capítulos 3 e 4.

2. FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Neste capítulo serão descritos conceitos importantes para compreensão da geração distribuída, energia solar, energia fotovoltaica e efeito fotovoltaico (especificando e diferenciando cada um), de quais são e como funcionam os componentes intrínsecos de sistemas fotovoltaicos e alguns modelos de sistemas fotovoltaicos.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O termo geração distribuída não possui uma única definição consentida entre todos os autores e, portanto, será utilizada a definição dada pelo INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética):

Geração Distribuída (GD) é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia. As tecnologias de GD têm evoluído para incluir potências cada vez menores (INEE, 201-?).

Segundo Zilles *et al.* (2012), o termo geração distribuída parte da concepção geral de que em sistemas elétricos existirão grandes unidades de geração de energia em locais mais distantes (geração centralizada) e polos de consumo dessa energia distribuídos ao longo da rede, alcançados por linhas de transmissão e distribuição complexas.

A geração distribuída, de acordo com o INEE, (201-?) inclui co-geradores, geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo, geradores de emergência, geradores para operação no horário de ponta, módulos fotovoltaicos, Centrais Geradoras Hidrelétricas - CGHs.

Segundo a resolução normativa 482/2012 (ANEEL) e posteriores alterações das resoluções 687/2015 (ANEEL) e 786/2017 (ANEEL), a geração distribuída é dividida em microgeração distribuída e minigeração distribuída, ambas devendo utilizar cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica: a microgeração distribuída possui potência instalada de até 75 kW e a minigeração distribuída possui potência instalada entre 75 kW e 5 MW.

Essa instalação da geração próxima às cargas possui grande relevância ao diminuir perdas no transporte de energia, reduzir a necessidade de linhas de transmissão e, especificamente no caso de sistemas fotovoltaicos, ser incorporada à estrutura das edificações - não demandando novas terras e resultando em menor impacto ambiental (MIRANDA, 2013).

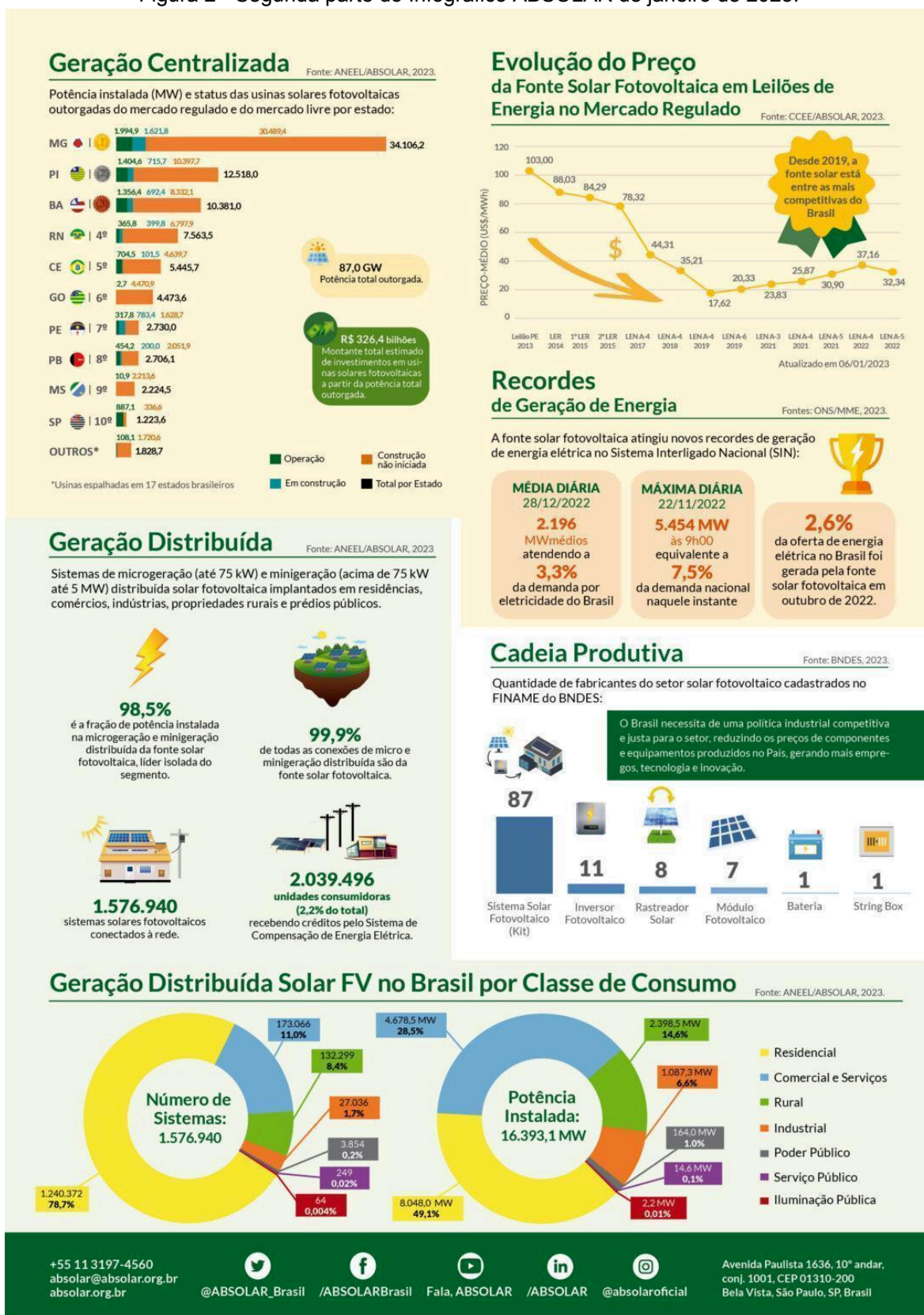
Segundo panorama da ABSOLAR de janeiro de 2023, inserido na figura 1 e na figura 2 (ABSOLAR, 2023), 98,50% da potência instalada na micro e minigeração distribuída é de fonte solar fotovoltaica, que cresceu nos últimos anos, de 190 MW em 2017 a 16,39 GW em 2022 (geração centralizada possui mais 7,61 GW em 2022, somando 24,00 GW no total) - crescimento de aproximadamente 86 vezes em cinco anos.

Com isso, 11,20% da matriz energética brasileira (206,21 GW) é de fonte fotovoltaica e 68% (16,39 GW) dessa parcela é na forma de geração distribuída (ABSOLAR, 2023). Essa relação mostra como a geração distribuída têm crescido no país, com relação direta ao aumento da geração de energia fotovoltaica.

Vale lembrar que, conforme Purificação; Ramos; Kniess (2020) afirmam, no Brasil, a regulamentação da micro e minigeração distribuída aconteceu apenas com a publicação da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012).

Outras resoluções normativas regulamentadas pela ANEEL, que dissertam sobre geração distribuída e/ou complementam suas instalações, são: a REN 687/2015 (ANEEL), que revisa a REN 482/2012 (ANEEL); a REN 414/2010 (ANEEL), posteriormente substituída pela REN 1000/2022 (ANEEL), que estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; e a REN 956/2021 (ANEEL), sobre o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), que substituiu as REN 395/2009 (ANEEL), REN 424/2010 (ANEEL) e 432/2011 (ANEEL).

Figura 2 - Segunda parte do Infográfico ABSOLAR de janeiro de 2023.



Fonte: ABSOLAR, 2023.

2.2 ENERGIA SOLAR

Frequentemente denominado apenas como “energia solar”, o aproveitamento da energia emitida pelo Sol consiste na conversão dela em energia térmica ou, por meio do efeito fotovoltaico, diretamente em energia elétrica (PEREIRA *et al.*, 2017).

De acordo com Pereira *et al.* (2017), as aplicações térmicas da energia solar para temperaturas abaixo de 100 °C são diversas (secagem, controle térmico de ambientes, processos que usam água aquecida e outros), sendo o aquecimento de água para uso doméstico o mais difundido atualmente. Para temperaturas mais elevadas, existem aplicações em processos industriais que demandam vapor, refrigeração, fornos, geração heliotérmica - termoelétrica a partir da energia solar, podendo ser com uso de coletores solares de concentração linear ou bidimensional -, entre outras (PEREIRA *et al.*, 2017).

Já o potencial fotovoltaico da energia solar, segundo Pereira *et al.* (2017), elevadíssimo no país e - por sua natureza, distribuída - com possibilidade em diminuir picos de demanda nos sistemas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), tem sua utilização cada vez mais favorável à medida que o custo de instalação desse sistema diminui. Pode ser instalada de forma centralizada (grandes “fazendas solares”) ou distribuída (urbana e integrada nas edificações). Essa forma de geração de energia será detalhada nas próximas seções.

2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO

Segundo Ayrão (2018), apesar de o efeito fotovoltaico ter sido observado pela primeira vez por Edmund Bequerel em 1839, foi apenas em 1954, no Bell Laboratories, que Calvin Fuller desenvolveu o processo de dopagem do silício e, posteriormente, na mesma empresa, Gerald Pearson aprimorou. A partir desse ano, a tecnologia evoluiu continuamente:

A primeira célula solar foi formalmente apresentada na reunião anual da National Academy of Sciences, em Washington, e anunciada numa conferência de imprensa no dia 25 de Abril de 1954. No ano seguinte, a célula de silício foi aplicada pela primeira vez como fonte de alimentação de uma rede telefônica em Americus, na Geórgia (AYRÃO, 2018).

Sendo assim, o fenômeno físico “efeito fotovoltaico” consiste na conversão da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica, sendo um atributo físico intrínseco ao material utilizado em equipamentos de conversão fotovoltaica (ZILLES *et al.*, 2012). A descrição desse fenômeno só foi possível a partir da teoria da mecânica quântica e do conceito de fóton:

Esta afirma que qualquer tipo de radiação eletromagnética possui partículas, denominadas de fótons, que carregam certa quantidade (“pacotes”) de energia (E_f). A energia em um fóton é dada por uma equação familiar, $E_f = h \cdot c/\lambda$, onde h é a constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s), c é a velocidade da luz ($c = 2,998 \times 10^8$ m/s) e λ é o comprimento de onda do fóton em metros (ZILLES *et al.*, 2012).

2.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Conforme já foi dito anteriormente, a energia solar fotovoltaica compõe grande parcela das instalações de geração de energia conectadas ao SIN nos últimos anos, sendo um aumento de 9,85 GW em 2022, totalizando 24 GW no total de potência instalada, 11,20% da matriz energética brasileira (ABSOLAR, 2023).

O potencial “fotovoltaico” da energia solar, citado anteriormente, tem como base de geração de energia elétrica os denominados “geradores fotovoltaicos” que, de acordo com Zilles *et al.* (2012), são dispositivos que utilizam o efeito fotovoltaico para converter energia solar em energia elétrica, tendo a célula fotovoltaica como unidade básica para sua formação.

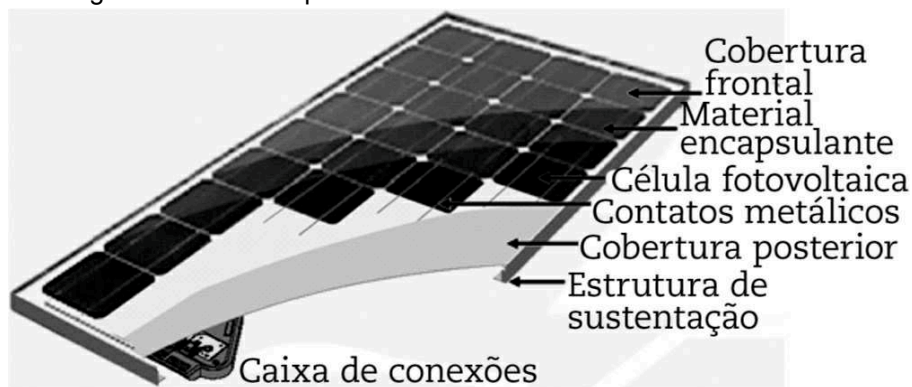
2.5 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A célula fotovoltaica, feita de materiais semicondutores, segundo Zilles *et al.* (2012), é um componente do módulo fotovoltaico, construído para aproveitar o efeito fotovoltaico para a produção de energia elétrica:

Na prática, as células fotovoltaicas são agrupadas em associações série e paralelo para produzir corrente e tensão adequadas às aplicações elétricas a que se destinam. Uma vez tendo a configuração desejada (número de células conectadas em série e/ou paralelo), o conjunto é encapsulado para constituir um módulo fotovoltaico (ZILLES *et al.*, 2012).

Sendo assim, Zilles *et al.* (2012) ainda descrevem que o módulo, além de compor o grupo de células, também possui funções de proteção contra o meio externo (elétrica, mecânica ou contra intempéries). Ele, além das células, possui tiras metálicas para conexões elétricas, um material encapsulante diretamente sobre as células, duas coberturas - frontal e posterior -, uma caixa de conexões (para conexão com o sistema) e uma estrutura metálica para sustentação (ZILLES *et al.*, 2012).

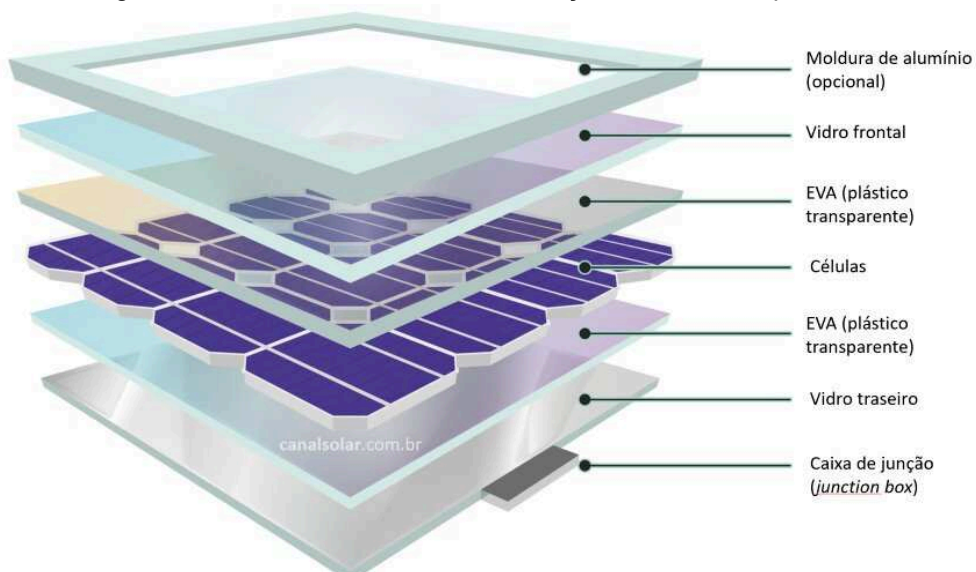
Figura 3 - Estrutura padrão de um módulo fotovoltaico monofacial.



Fonte: ZILLES *et al.*, 2012.

Quanto à cobertura posterior, nos últimos anos tem se modernizado a tecnologia de módulos bifaciais que, segundo o Canal Solar (2022), possuem, além da parte frontal, a parte posterior de sua estrutura também com cobertura exposta e com proteção de vidro ao invés de simples cobertura metalizada e proteção opaca, conforme indicado na figura 4.

Figura 4 - Módulo bifacial e suas diferenças na cobertura posterior.



Fonte: Canal Solar, 2022.

2.6 INVERSORES FOTOVOLTAICOS

Segundo Ayrão (2018), os equipamentos denominados inversores fotovoltaicos são aqueles que convertem para corrente alternada (CA) - com parâmetros de tensão e frequência alinhados com a rede da distribuidora de eletricidade - a energia elétrica gerada em corrente contínua (CC) nos módulos fotovoltaicos.

Além dessa função principal, o inversor também possui a função de maximizar a geração de energia, mantendo valores de corrente e tensão ótimos. É importante perceber que, apesar de haver outras topologias, a função de Seguimento de Ponto de Máxima Potência (SPPM ou MPPT, do inglês, terminologia de mais comum utilização) é a predominante atualmente para a maximização da geração energética dos módulos (AYRÃO, 2018).

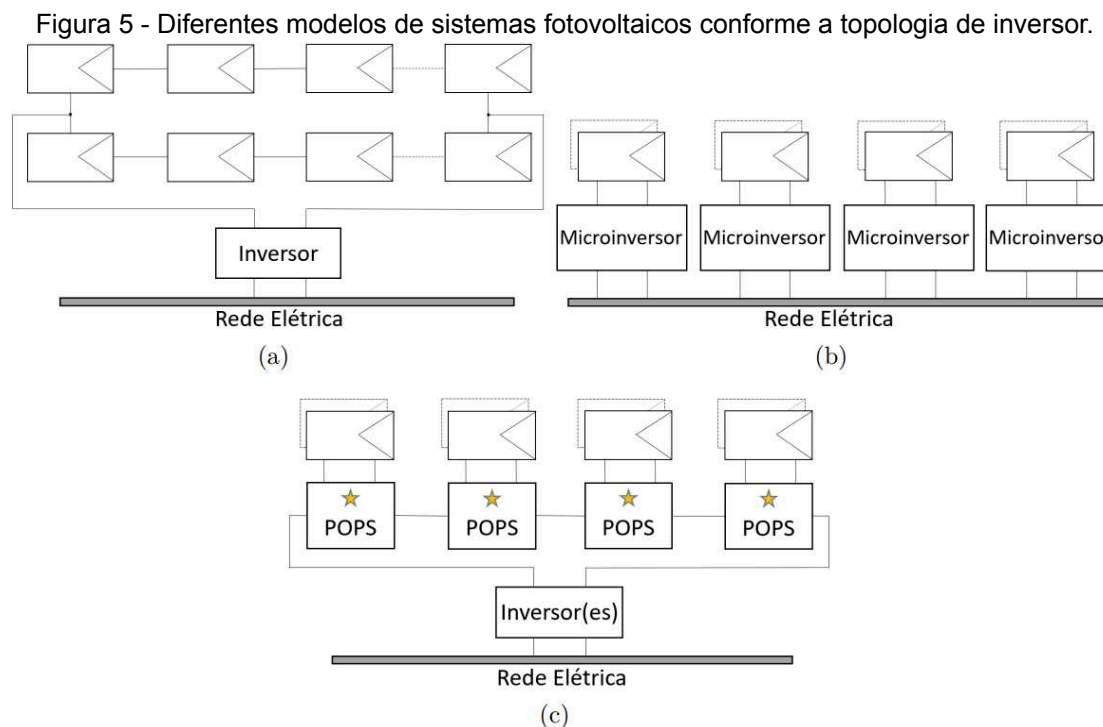
Dessa forma, de acordo com Ayrão (2018), justamente nessa função, existe a diferenciação entre dois modelos de inversor: inversores de *string* e inversores com tecnologia de eletrônica de potência a nível de módulo, MLPE (*Module Level Power Electronics*) - nessa segundo topologia o autor cita os otimizadores de potência (usados com inversores) e os microinversores, que possuem um MPPT para cada módulo e, por conta disso, permite maior eficiência (algo aprofundado na seção seguinte).

Portanto, cada modelo possui suas características: os tradicionais inversores de *string*, amplamente difundidos e geralmente de menor custo, são formados com grandes arranjos de módulos conectados nas poucas entradas do inversor (proporcionalmente), enquanto os microinversores mantêm a função de conversão CC-CA e possuem um MPPT para cada módulo (ou par). Já os otimizadores de potência são apenas conversores CC-CC fornecendo um MPPT para cada módulo (ou par), atuando junto de um inversor de *string* (AYRÃO, 2018).

2.7 MODELOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Nesta seção, será explicado a utilização em conjunto dos conceitos básicos e equipamentos envolvidos em sistemas fotovoltaicos vistos nas seções anteriores, apresentando modelos possíveis de instalações fotovoltaicas. Na figura 5, de Souza Silva *et al.* (2020) expõem três formas de conexão com os equipamentos citados na

seção 2.6, mostrando como são conectados os módulos aos denominados inversores centrais com seu arranjo de módulos (a), microinversores com uma entrada para cada módulo (b) e inversores centrais com otimizadores de potência (c), com sigla POPS (*Power Optimizer for Photovoltaic Systems*).



Fonte: DE SOUZA SILVA *et al.*, 2022.

Além dos inversores centrais e microinversores, ainda existem os inversores de uma *string* - que, diferente dos inversores centrais, não conectam um arranjo, mas apenas uma string - e os inversores *multi string* (que suportam diversas *strings*).

Quanto a esses três modelos apresentados, de acordo com Ayrão (2018), para os inversores de *string* cada série é limitada pelo módulo de pior geração (todos os módulos conectados assumirão o parâmetro de tensão daquele que teve sua geração limitada, por conta do sombreamento, por exemplo), se deve possuir módulos com mesmas características elétricas (o que pode dificultar futuras reposições) e com mesma inclinação em um mesmo arranjo; para microinversores, esses dois problemas inexistem, pois cada módulo terá um MPPT individual; e para otimizadores de potência, os dois problemas são resolvidos com a manutenção do uso do inversor de *string*.

Segundo Ayrão (2018), outra diferenciação possível quanto a modelos de sistemas fotovoltaicos diz respeito à conexão ou não à rede da distribuidora de energia: sistemas isolados (*off grid*) são desconectados da rede, conectados (*on*

grid) são sistemas conectados à rede e sistemas híbridos são conectados à rede, mas possuem armazenamento de energia.

Tanto em sistemas *off grid*, quanto em sistemas híbridos, são utilizados bancos de baterias do lado CC para armazenamento de energia e em sistemas *off grid* devem ser utilizados controladores de carga, com a função de maximizar a geração energética (casos em que os inversores não fazem parte do sistema) (AYRÃO, 2018). A figura 6, retirada do site Laboratório de Garagem (2017), mostra como é feita a conexão de sistemas tradicionais *off grid* e *on grid*.

Figura 6 - Sistema *off grid* e *on grid*.



Fonte: Laboratório de Garagem, 2017.

Portanto, chegando ao fim do capítulo de fundamentos dos sistemas fotovoltaicos, foram explicados em sete seções conceitos primordiais para o entendimento não apenas de o que é a energia solar fotovoltaica e como funciona um sistema fotovoltaico, mas que também servem de base para entender como surge e acontece a expansão dessa energia no Brasil.

No próximo capítulo será descrito como tem sido a expansão da energia fotovoltaica no Brasil e algumas consequências dessa inserção em massa na última década. Mais à frente, no capítulo 4, serão vistos mais minuciosamente problemas encontrados ao longo dessa expansão e algumas soluções propostas.

3. EXPANSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Como já foi explicado na seção 2.1, geração distribuída é a geração de energia realizada próxima dos pontos de consumo, ou até mesmo neles, e, dentro dessa modalidade, está inserida a geração de energia fotovoltaica (INEE, 2012). Neste capítulo serão expostos dados e constatações de diversas fontes para se entender melhor a expansão dessa forma de geração de energia.

3.1 DADOS NACIONAIS DA EXPANSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Em 1983, segundo Miranda (2013), a capacidade de energia solar fotovoltaica instalada era de apenas 15 MWp¹ e, em 1995 e 1997, já havia saltado para 579 MWp e 941 MWp, respectivamente, crescendo em ritmo constante desde então, até estar em torno de 38 GWp em 2010. Nessa mesma época, existiam poucos sistemas fotovoltaicos no Brasil, com apenas 7 MW em 2012, ano da publicação da REN 482/2012 e início da forte expansão dessa forma de energia no país (ABSOLAR, 2023).

No Brasil, dentro da micro e minigeração distribuída, conforme as figuras 1 e 2, a fonte solar fotovoltaica totaliza 98,50% da potência instalada e 99,90 % das conexões instaladas, com potência de 16,39 GW e 1.576.940 sistemas solares fotovoltaicos conectados ao SIN (ABSOLAR, 2023).

Entretanto, vale notar que, segundo a ABSOLAR (2023), a geração fotovoltaica na forma distribuída é apenas uma parcela da geração de energia solar fotovoltaica (a outra forma é a centralizada), apesar do elevado crescimento em relação à geração fotovoltaica na forma centralizada nos últimos anos, com geração distribuída de apenas 190 MW (16%) ao fim de 2017 e 16,39 GW (68%) em 2022, contra geração centralizada de 968 MW (84%) ao fim de 2017 e 7,61 GW (32%), em 2022.

Sendo assim, complementando as informações já expostas sobre geração distribuída, segundo a ABSOLAR (2023), a geração centralizada de energia solar

¹ Watt-pico: é a unidade que designa a potência nominal da célula fotovoltaica em condições padrão de teste - *Standard Test Conditions*, STC. Frequentemente se utiliza os prefixos quilo (k) para sistemas menores, mega (M) para sistemas maiores e dados.

fotovoltaica realmente possui, atualmente, 7,61 GW em operação, mas já tem mais 4,51 GW em construção e projetos de mais 73,08 GW, totalizando aproximadamente 87,00 GW (sic.) de potência outorgada.

Comprovando a escalada gradativa dessa geração centralizada, segundo o RAPEEL (Relatório de Acompanhamento de Empreendimentos de Geração de Energia Elétrica) do terceiro semestre de 2022 (ANEEL, 2022), houve um aumento do número de usinas no período, sendo 980 usinas em maio de 2022 com CEG (código de identificação do empreendimento de geração de energia elétrica, necessário para usinas acima de 5 MW) e 1375 usinas em setembro do mesmo ano, também com CEG, um aumento de 395 usinas registradas.

Como foi explicitado ao longo do capítulo anterior, de acordo a ABSOLAR (2023), no ano de 2022 a geração de energia solar fotovoltaica expandiu enormemente, totalizando 24,00 GW no final do ano - 11,20% da matriz energética brasileira - sendo uma adição de 9,85 GW em relação ao ano anterior e 22,84 GW em relação aos 1,16 GW no fim de 2017, crescimento de mais de vinte vezes em cinco anos.

Segundo Salhab (2021), em 2021 o Brasil era um dos poucos países com capacidade instalada de energia solar superior a 10 GW - atualmente já possui 24 GW (ABSOLAR, 2023) - e aparecia em 14º no *ranking* da Agência Internacional para Energias Renováveis (IRENA, 2021, *apud* SALHAB, 2021), sendo o único da América Latina incluído pela agência.

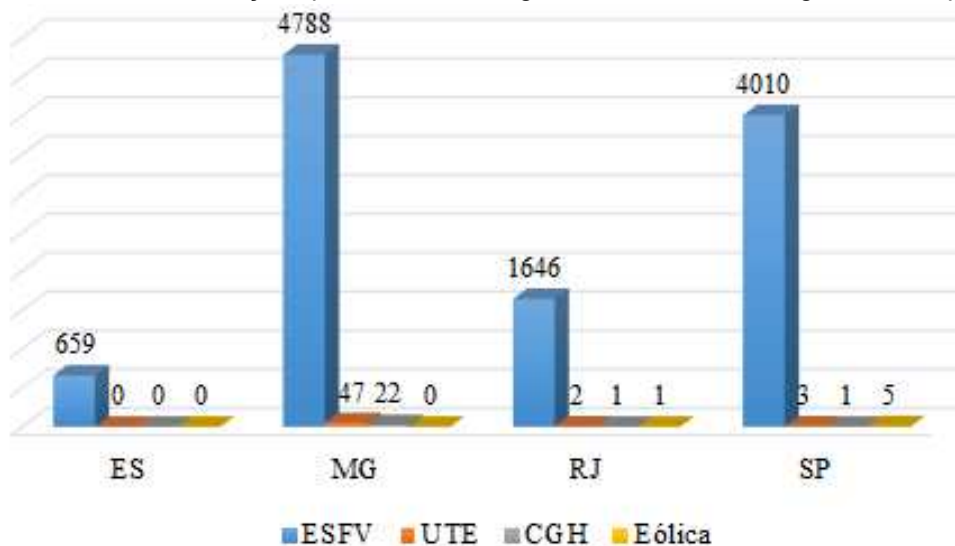
3.2 DADOS REGIONAIS DA EXPANSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Asseverando os dados expostos de forma mais regionalizada, o crescimento da energia solar fotovoltaica (ESFV), realmente, foi extremamente elevado nos últimos anos, sendo que, tomando a região sudeste como caso específico, fatores contributivos para isso foram: crise hidroenergética, o potencial de irradiação solar da região, o potencial físico nas coberturas das unidades consumidoras, estímulos fiscais e a redução gradativa dos custos dos equipamentos (MENDES; STHEL; LIMA, 2020).

Como é possível constatar a partir das figuras 7 e 8, Mendes, Sthel e Lima aprofundam esse caso regional dentro do universo de geração distribuída (GD), (2020) ao afirmar que, em cada um dos estados da região sudeste (SE), a energia

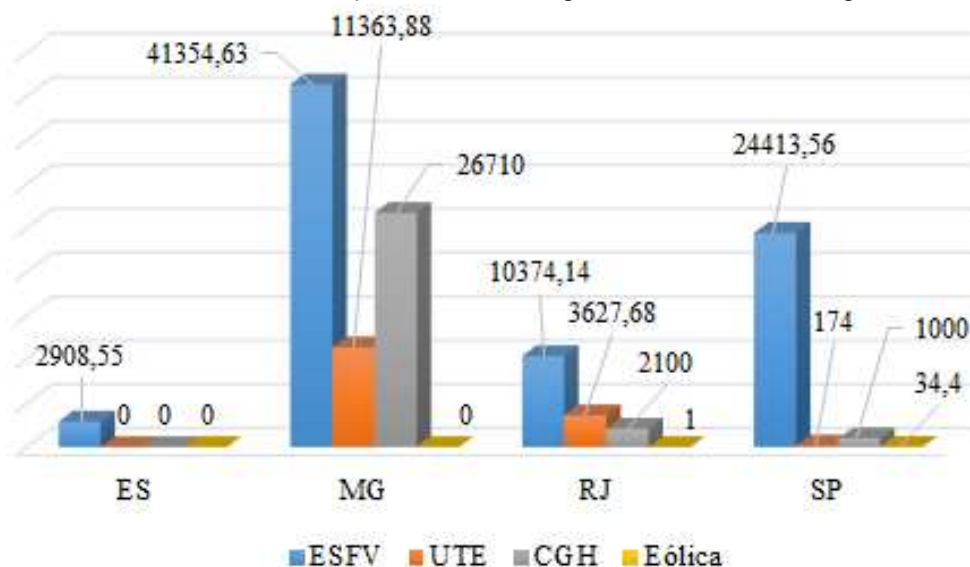
solar fotovoltaica foi a fonte de energia de GD mais instalada e com maior potência instalada. Nas figuras, os autores utilizam as siglas ESFV, UTE e CGH para se referir, respectivamente, à “energia solar fotovoltaica”, “usina termoeletrica” e “central de geração hidrelétrica”.

Figura 7 - Número de instalações por estados da região SE e fonte de energia utilizada para GD.



Fonte: MENDES; STHEL; LIMA, 2020.

Figura 8 - Potência instalada, em kW, por estados da região SE e fonte de energia utilizada para GD.



Fonte: MENDES; STHEL; LIMA, 2020.

3.3 DADOS INTERNACIONAIS DA EXPANSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Apesar de não ser o foco desse trabalho (que é a situação brasileira), em 2018 Rosa *et al.* (2018) já apontavam que, de um ponto de vista estratégico, a

energia solar fotovoltaica vinha se destacando internacionalmente devido ao aumento do número de instalações frente a outras opções de diversificação da matriz energética.

Esse fato é comprovado com dados da Agência Internacional de Energia - Programa de Sistemas Fotovoltaicos de Energia (*International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme*), o IEA-PVPS (2018, *apud* MIRANDA; LEANDRO; SILVA, 2019), que apontam que a potência instalada de energia solar fotovoltaica no mundo, ao fim de 2016, já estava por volta de 303 GW, com uma previsão de quase 2,0 TW, em 2030, e 4,5 TW, em 2050.

Esposito; Fuchs (2013, *apud* PURIFICAÇÃO; RAMOS; KNISS, 2020) também afirmam que a energia fotovoltaica está no centro dos debates da agenda política internacional, pois seu uso permite a redução do uso de combustíveis fósseis, diminuição de emissões de gases do efeito estufa e decaimento do aquecimento global, além de incentivar a geração de empregos, o desenvolvimento de tecnologias e a criação de valor.

Essa tendência internacional, observada em 2018 e em 2013 - conforme as citações anteriores -, pode ser comprovada no Brasil até hoje, como refletem os dados já citados das figuras 1 e 2, do panorama da ABSOLAR (2023).

Sobre esse potencial físico das coberturas das construções, Ruther (2004, *apud* PURIFICAÇÃO; RAMOS; KNISS, 2020) ainda adiciona que a energia fotovoltaica, na modalidade de geração distribuída, permite flexibilidade ao consumidor, pois os módulos fotovoltaicos integram o ambiente construído, geram energia próximo aos centros de consumo e, sobretudo, auxiliam a reduzir picos de consumos, comuns nos grandes centros urbanos.

Salhab (2021) afirma ainda que não apenas há crescimento consistente nos últimos anos, como também há perspectiva de aumento da demanda, observando também que uma das principais fontes da energia solar fotovoltaica são as pequenas usinas (clientes residenciais, comércios e prestadores de serviços).

Segundo, Kolozuk; Sauaia; Meyer (2019), em artigo para a ABSOLAR, houve grande crescimento da tecnologia solar fotovoltaica na década de 2010, destacando a importância dos integradores (instaladores de sistemas fotovoltaicos):

Avanços importantes no processo de manufatura, novos recordes de eficiência dos módulos fotovoltaicos e o barateamento dos equipamentos tornaram a eletricidade do sol cada vez mais acessível a todas as camadas

da população. Porém, é importante destacar que o mercado é movimentado e desenvolvido não apenas por equipamentos, mas principalmente por pessoas. O capital humano é – e sempre será – a maior riqueza do setor solar fotovoltaico, em especial no segmento de geração distribuída (KOLOSZUK; SAUAIA; MEYER, 2019).

Nesse sentido, Salhab (2021) destaca que, ao fim de 2021, existiam quase 17 mil integradores fotovoltaicos no país - sendo quase metade na região sudeste -, figura que agrega as funções comercial, de projeto e de instalação, normalmente ex-funcionários do setor elétrico ou eletricitistas autônomos.

Dessa forma, conclui-se, por meio dos dados numéricos e afirmações de diversos autores, que a energia solar fotovoltaica realmente é uma forma de geração energética cada vez mais difundida no Brasil e em forte crescimento na última década, desde a resolução normativa 482/2012 (ANEEL) - regulação precursora da geração distribuída e fundamental para popularização da energia solar.

Tendo isso em vista, no capítulo seguinte serão observados entraves que essa forma de energia, foco do trabalho, enfrentou desde sua difusão na matriz energética brasileira, e ainda enfrenta 10 anos após a REN 482/2012 (ANEEL) e que deve enfrentar nos próximos anos.

4. BARREIRAS E SOLUÇÕES PARA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Tolmasquim (2016, *apud* PURIFICAÇÃO; RAMOS; KNIESS, 2020) considera que é de extrema importância que o Brasil diversifique sua matriz energética e se discuta o aproveitamento do potencial da energia solar fotovoltaica, dados os índices de radiação elevados em quase todo país.

Neste capítulo, portanto, serão discutidas - sobretudo em relação ao Brasil - as diversas barreiras que a energia solar fotovoltaica encontrou desde sua quase inexistência na matriz energética brasileira (por volta de 2010), até sua grande participação atual - como provam os dados das figuras 1 e 2 (ABSOLAR, 2023) -, aquelas que ainda encontra na atualidade e até mesmo as que poderá encontrar no futuro.

Em conjunto com as observações feitas por diversos autores sobre empecilhos para energia solar fotovoltaica, serão expostas soluções para os problemas elencados na atualidade ou que se tornarão reais nessa próxima década e, até mesmo, algumas que já foram aplicadas na última década, resolvendo medos em relação a energia solar fotovoltaica que existiam antes da difusão em massa de sistemas com essa energia.

Ao final do capítulo ainda será analisado o último Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) concluído, o PDE 2031, publicado em 2022 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), empresa pública vinculado ao Ministério de Minas e Energia (MME) com o objetivo de confeccionar estudos e pesquisas para subsidiar o planejamento do setor elétrico brasileiro.

4.1 BARREIRAS FINANCEIRAS PARA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Conforme foi visto no capítulo anterior, o Brasil possui altíssimo potencial de aproveitamento da energia solar fotovoltaica - apesar de possuir intermitência e necessidade de sistema alternativo para suprir o consumo em momentos sem geração - e há claramente expansão de seu uso, segundo Pereira *et al.* (2015, *apud* PURIFICAÇÃO; RAMOS; KNIESS, 2020). Contudo, para o autor, o custo de implementação de sistemas fotovoltaicos é elevado em relação a sistemas tradicionais, sendo essa uma barreira que pode ser reduzida com políticas de incentivos governamentais.

Além da barreira financeira, Purificação; Ramos; Kniess (2020) afirmam que o baixo investimento em inovação tecnológica voltada para fabricação da célula de silício em grau solar, a baixa repercussão para os consumidores dessa tecnologia nas “três vertentes” (social, econômica e ambiental) e o baixo investimento em pesquisa e desenvolvimento são barreiras que a geração fotovoltaica ainda precisa vencer.

Os autores ainda citam a ausência de linhas de créditos de financiamentos, mas essa, segundo o Portal Solar (2021), é uma situação que, nos últimos anos, têm se revertido, com diversas opções de linhas de crédito específicas para instalações de sistemas fotovoltaicos.

Salhab (2021), em seu artigo de dezembro de 2021, confirma que realmente existia uma dificuldade de acesso ao crédito para sistemas fotovoltaicos, mas que, já em 2018, segundo FEBRABAN; FGVCS (2018, p. 52, *apud* SALHAB, 2021), as instituições financeiras avaliam existir oportunidades no setor e uma necessidade da capacitação de seus agentes para análise da complexidade tecnológica que envolve um projeto fotovoltaico

4.2 BARREIRAS FUNCIONAIS PARA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Já em 2013, Miranda (2013) destaca que, na época, a capacidade instalada no Brasil, a despeito da alta incidência solar no país, era muito diminuta - apenas de cerca de 7 MW, conforme os dados da figura 1 (ABSOLAR, 2023) comprovam - e que a energia solar fotovoltaica possui densidade energética baixa, intermitência, escassez de materiais para produção dos equipamentos e falta de tecnologia e estudos na área.

O autor ainda acrescenta que a repentina perda de geração pode ser um problema (afinal a geração é apenas durante o dia), citando necessidades que surgiriam elencadas por outros autores (DENHOLM; MARGOLIS, 2007, HOMER, 2013):

Dito isto, é possível que haja um limite superior para a participação de energia fotovoltaica na matriz de um país, a partir do qual a utilidade marginal com a capacidade incremental seja decrescente, haja crescimento do custo nivelado da energia com a penetração marginal da fonte ou que uma tecnologia complementar seja necessária (MIRANDA, 2013).

Outras barreiras que foram citadas pelos agentes de distribuição de energia, já no início da década 2010, de acordo com MIRANDA (2013), são a maior complexidade de funcionamento da rede elétrica (com o fluxo bidirecional), mudança dos níveis de curto-circuito, potencial aumento da distorção harmônica na rede e distúrbios que uma série de microgeradores poderia causar (ilhamento, injeção de energia de má qualidade, carregamento excessivo da rede e outros efeitos nocivos).

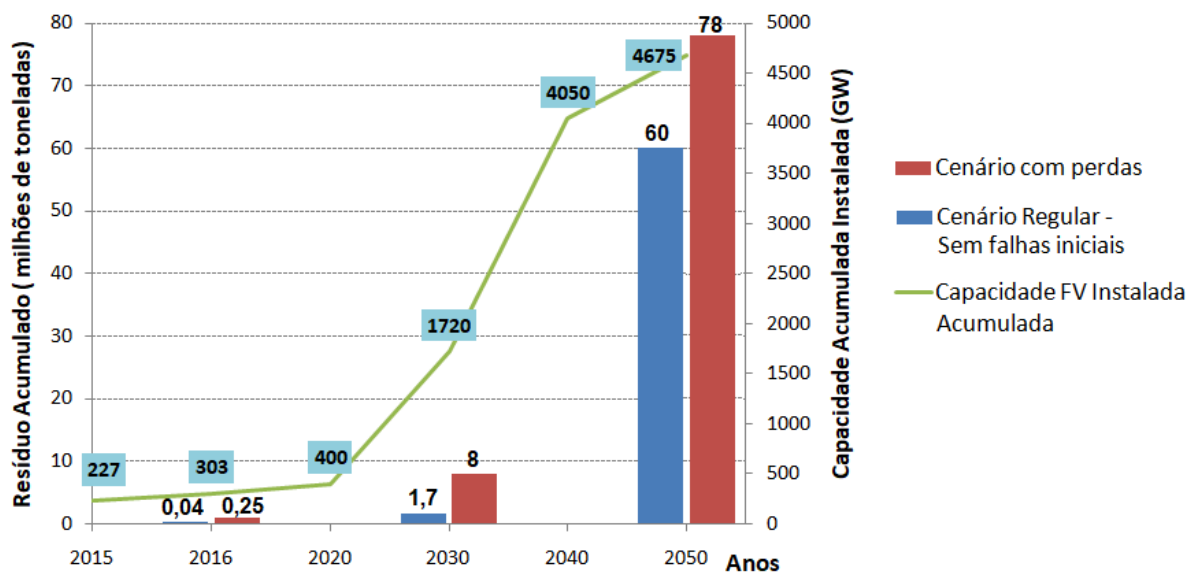
Miranda; Leandro; Silva (2019) observam que a vida útil dos módulos fotovoltaicos é entre 25 e 30 anos, dependendo das condições e regime de operação, e que frequentemente é necessário o descarte antecipado em casos de danos. Levando em conta que as primeiras instalações fotovoltaicas surgiram em 1990, a partir de 2015 a escalada da necessidade de direcionamento do descarte desses equipamentos passa a ser um desafio global (MIRANDA; LEANDRO; SILVA, 2019).

Como está exposto na figura 1 (ABSOLAR, 2023), no Brasil, sistemas fotovoltaicos passaram a se popularizar apenas a partir de 2012. Entretanto, em uma perspectiva global, o forte problema de gestão de resíduos que essa fonte energética deverá enfrentar nos próximos anos pode ser inferida nacionalmente a partir dos dados internacionais da figura 9, acerca especificamente do descarte de módulos fotovoltaicos em cenário ideal e não ideal (IRENA; IEA-PVPS, 2016; IEA-PVPS, 2018 *apud* MIRANDA; LEANDRO; SILVA, 2019).

No Brasil, de acordo com Miranda; Leandro; Silva (2019), os módulos fotovoltaicos são vistos apenas como resíduos de equipamento elétrico e eletrônico (REEE) e, apesar da Lei 12.305/2010 (Brasil) - que regulamenta o tratamento do resíduo sólido em geral - ser aplicada para esses resíduos, a fiscalização é extremamente falha e, por conta disso, não se espera que o processo de logística reverso determinado pela lei ocorra devidamente.

Há uma expectativa que esse problema de descarte dos módulos ganhe maior enfoque na década de 2030, quando - de forma análoga ao observado na figura 9 em relação à situação internacional de iniciar instalações na década de 1990 e cerca de 25 anos depois passar a uma escalada no descarte de equipamentos - o país passará a ter um volume de descomissionamento mais expressivo.

Figura 9 - Projeção de GW instalados de energia fotovoltaica e toneladas de módulos descartados.



Fonte: MIRANDA; LEANDRO; SILVA, 2019.

As autoras ainda comentam que outros componentes característicos de sistemas fotovoltaicos, como baterias de chumbo e inversores fotovoltaicos, possuem vida útil ainda menor, de até 10 anos e até 15 anos, respectivamente, o que também necessitaria de uma gestão de resíduos adequada e ainda mais urgente (MIRANDA; LEANDRO; SILVA, 2019).

4.3 SOLUÇÕES PARA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Nesse sentido de perspectivas de soluções, Purificação; Ramos; Kniess (2020) observam algumas soluções para problemáticas enfrentadas, retiradas de diferentes bibliografias e experiências reais:

Mercado de créditos de carbono e de certificados sustentáveis, instituir um programa de incentivo para fomentar o acúmulo de experiências e o desenvolvimento em escala, reduzindo preços e alcançando a paridade tarifária e, posteriormente, a modicidade tarifária. Outra medida é a criação de regulamentação municipal, estadual ou nacional, para que edificações com determinado porte tenham metas de utilização de energia verde (PURIFICAÇÃO; RAMOS; KNISS, 2020).

No quesito de auxílio à inserção da energia solar, Salhab (2021) defende que, apesar dos entraves comuns à concessão de crédito para pessoas físicas e empresas diminutas, o financiamento de sistemas fotovoltaicos para esse público não só traz o benefício do crédito, como também pode ter efeito multiplicador benéfico na economia do Brasil.

Purificação; Ramos; Kniess (2020) percebem que exigirá grande esforço até 2030 o cumprimento da meta de aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética global e que a política de estímulo e incentivo à energia renovável a preços acessíveis está fortemente alinhada ao desenvolvimento sustentável de forma econômica, ambiental e social.

Também Miranda; Leandro; Silva (2019) afirmam que a solução para o tratamento do descarte de módulos fotovoltaicos passam por uma gestão aprimorada de reutilização e reciclagem também aliadas a políticas de incentivo para tornar a energia solar fotovoltaica sustentável no fim de vida de seus equipamentos.

4.4 PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA E ENERGIA FOTOVOLTAICA

Por fim, cabe ainda discorrer sobre o que o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (PDE 2031), que trata das perspectivas do setor energético brasileiro para a década de 2022 a 2031.

A energia solar fotovoltaica é citada algumas vezes no relatório pela EPE (2022), sendo considerada: uma fonte renovável em expansão; com protagonismo cada vez maior no Ambiente de Livre Contratação (ACL); principal fonte de micro e minigeração distribuída (MMGD); muito competitiva economicamente comparada às demais em expansão; e com contínua evolução tecnológica.

Na figura 10, está inserido o menu de Geração Elétrica do Painel de Consolidação do PDE 2031 (EPE, 2022) - feito com *Microsoft Power BI* e configurado pelo autor para mostrar dados da energia solar:

Figura 10 - Menu de Geração Elétrica do Painel de Consolidação do PDE 2031.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2022.

A citada figura indica que, em 2021, a energia solar compunha apenas 6% da capacidade instalada (12,96 GW) e possui previsão de compor 16% da capacidade instalada em 2031 (45,27 GW), um crescimento de 10 pontos percentuais e adição de 32,31 GW (EPE, 2022).

O infográfico da EPE (2022) ainda traz que, dos 45,27 GW de capacidade instalada de energia solar, 10,38 GW serão de geração centralizada e 34,89 GW, de geração distribuída e autoprodução de energia. Vale notar que, conforme indica a figura 2 (ABSOLAR, 2023), já existem 87,00 GW apenas de geração centralizada outorgada no início de 2023, ou seja, as expectativas do PDE 2031 possuem grandes chances de serem superadas antes mesmo de 2031, conforme toda essa potência outorgada for efetivamente instalada ao longo dos próximos anos.

Além disso, conforme a parte superior da figura 1 (ABSOLAR, 2023), o valor da capacidade instalada (ou potência instalada) em 2021, de 14,15 GW, difere do dado indicado pela EPE (2022), de 12,96 GW, o que fortalece a ideia de que os dados utilizados para o PDE 2031, mesmo próximos, divergem da realidade encontrada pela ABSOLAR junto às distribuidoras de energia.

Sendo assim, conclui-se com sucesso esse capítulo, tendo deixado claras as principais dificuldades encontradas na última década pela inserção em larga escala de sistemas fotovoltaicos e as soluções encontradas, as barreiras que ainda são uma realidade e propostas para solucioná-las e, até mesmo, as problemáticas que

ainda não se tornaram reais, mas que devem se tornar relevantes e passíveis de algumas soluções propostas pelos autores citados.

Ao final do capítulo também foi exposta a perspectiva de crescimento prevista pelo governo brasileiro no Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (EPE, 2022), que declara expectativas tímidas (vide figura 10) frente aos dados obtidos pela ABSOLAR (2023) ao fim de 2022 (vide figuras 1 e 2).

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso analisou a evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil, examinando como foi sua expansão desde o início de sua utilização mais ampla a partir de 2012 com a REN 482/2012 (ANEEL), quais as consequências boas e ruins dela, as barreiras enfrentadas e as que deverão ser enfrentadas no decorrer dos anos, as soluções encontradas e propostas para essas dificuldades e, por fim, as expectativas do setor energético brasileiro de sua expansão na próxima década (a partir do PDE 2031).

Ao longo do trabalho, percebeu-se que, até a resolução normativa 482 (ANEEL, 2012), de 17 de abril de 2012, a utilização de sistemas fotovoltaicos no país ainda era muito experimental, sem ter atingido relevância nacional na matriz energética do país e coberta de incertezas, conforme já comentado ao longo desse trabalho.

Essa realidade também ficou bastante clara a partir das produções acadêmicas utilizadas para referência bibliográfica do trabalho, datadas a partir de 2012, com menções a anos anteriores apenas para esclarecer sobre conceitos da energia solar fotovoltaica, não especificamente sobre sua expansão - foco principal do trabalho.

De fato, a expansão da energia solar fotovoltaica é percebida fortemente não somente pelos dados de órgãos oficiais, apresentadas ao longo do trabalho, mas também pela análise de diferentes autores na última década e o reflexo da rápida evolução dessa fonte energética na diferença de percepção entre eles com o passar poucos anos.

Ao longo do capítulo 3 percebeu-se, por exemplo, que situações descritas por Miranda (2013) já se alteram das observadas por Rosa *et al* (2018) que, por sua vez, diferem de Purificação; Ramos; Kniess (2020). O caso mais extremo observado foi em relação à realidade do financiamento para projetos fotovoltaicos, que possui uma percepção por Purificação; Ramos; Kniess (2020), em julho de 2020 e, em dezembro de 2021, após menos de 48 meses, já difere do que descreve Salhab (2021) sobre a realidade no momento da publicação de seu artigo e, novamente, se mostra em um panorama mais evoluído na matéria do Portal Solar (2021).

Essa situação não foi incomum ao longo do trabalho e se mostrou de valiosa importância o cruzamento das informações com os dados da atualidade, sobretudo

aqueles expostos pelo panorama da solar fotovoltaica de janeiro de 2023, da ABSOLAR (2023), inseridos no trabalho nas figuras 1 e 2 e citados em todos os capítulos - dada a importância dessa associação e seu acompanhamento do setor solar fotovoltaico.

Esse dinamismo, até mesmo na bibliografia encontrada, é natural e não invalida as observações dos autores, apenas mostra a relevância de se observar como a expansão da energia fotovoltaica tem sido tão forte e, conforme foi visto no capítulo 4, ao mesmo tempo que surgiram, surgem e surgirão diversas barreiras, também foram, são e serão, respectivamente, encontradas soluções para que a energia fotovoltaica continue em ascendente expansão.

Por fim, percebe-se, a partir do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, o PDE 2031 (EPE, 2022), a forma descontextualizada que a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) ainda trata a fonte de energia, trazendo poucas menções ao longo de suas 411 páginas e se atendo à uma previsão, apesar de bastante positiva, desconexa dos dados atuais obtidos pela ABSOLAR (2023) com as distribuidoras de energia, conforme foi comparado ao final do capítulo 4.

Portanto, podem ser citados novamente alguns motivos de a expansão da energia solar fotovoltaica ter sido tão implacável na última década no Brasil, alcançando 24 GW na matriz energética: a melhoria tecnológica dos equipamentos envolvidos, sobretudo em relação aos semicondutores, a comunicação de alta velocidade entre os componentes e o aumento da eficiência da célula fotovoltaica; a pressão social e boa vontade política, normalmente atrelados a questões ambientais; e a economia de energia obtida pelo cliente final ao instalar um sistema fotovoltaico.

Dessa forma, conclui-se o trabalho de maneira bastante positiva em relação ao elevado crescimento observado na energia solar fotovoltaica na década de 2010 e a perspectiva de elevado crescimento para a década de 2020, com amadurecimento e fortalecimento do setor fotovoltaico aliado de políticas públicas e privadas favoráveis à maior utilização dessa fonte de energia renovável.

Como sugestões para futuros trabalhos percebeu-se relevância na discussão sobre a manutenção dos equipamentos e seu manejo de descarte ao final da vida útil, assunto que pouco apareceu na pesquisa bibliográfica; sobre o surgimento de novas tecnologias e evolução das já existentes; e, já que a expansão discutida é contínua e crescente, até mesmo uma reavaliação daqui alguns anos sobre a expansão da energia fotovoltaica que ocorrerá.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. (2012). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro.
- ANEEL. (2015). Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro.
- ANEEL. (2021). Resolução Normativa nº 956, de 07 de dezembro de 2021. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro.
- ANEEL. (2021). Resolução Normativa nº 1000, de 07 de dezembro de 2021. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro.
- BRASIL. Lei Nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2022.
- PURIFICAÇÃO, R. A. do N.; RAMOS, H. R.; KNISS, C. T. Barreiras e facilitadores para o uso da energia fotovoltaica: uma revisão sistemática da literatura. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 16, n. 2, 2020. DOI: 10.17271/1980082716220202327. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/2327. Acesso em: 18 dez. 2022.
- INEE. **O que é Geração Distribuída**. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 16 jan. 2023.
- ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Versão: 01/2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Oficina de textos, 2012.
- AYRÃO, Vinicius. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Conceitos, Aplicações e Estudo de Caso**. International Copper Association Brazil, Rio de Janeiro, 2018.
- MARTINS, Fernando Ramos et al. **Atlas brasileiro de energia solar 2**. 2017.

Canal Solar. **Diferença entre módulos bifaciais e monofaciais**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/diferenca-entre-modulos-bifaciais-e-monofaciais/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

DE SOUZA SILVA, João Lucas et al. Avaliação do custo de arquiteturas fotovoltaicas para uma planta residencial em diferentes localidades no Brasil. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2020.

Laboratório de Garagem. **Duvida - Sistema de energia solar off grid hibrido com energia da rua**. Disponível em: <https://labdegaragem.com/forum/topics/duvida-sistema-de-energia-solar-off-grid-hibrido-com-energia-da>. Acesso em: 25 jan. 2023.

MENDES, Luiz Fernando Rosa; STHEL, Marcelo Silva; LIMA, Marcenilda Amorim. O crescimento da geração distribuída no contexto da crise hidroenergética na região Sudeste do Brasil: aspectos ambientais e socioeconômicos. **Vértices (Campos dos Goitacazes)**, v. 22, n. 3, p. 626-647, 2020.

ROSA, Carmen Brum et al. A gestão da energia solar fotovoltaica sob a ótica da bibliometria. **Tecno-Lógica, Santa Cruz do Sul**, v. 22, n. 2, p. 113-119, 2018.

Portal Solar. **Financiamento de energia solar: as melhores linhas de crédito do mercado**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/financiamento-de-energia-solar-guia-completo>. Acesso em: 30 jan. 2023.

MIRANDA, Raul Figueiredo Carvalho. Análise da inserção de geração distribuída de energia solar fotovoltaica no setor residencial brasileiro. **Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, Brazil**, 2013.

ANEEL. **Geração**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 01 fev. 2023.

KOLOSZUK, Ronaldo; SAUAIA, Rodrigo; MEYER, Rodolfo. **Os guerreiros da geração distribuída solar fotovoltaica**. São Paulo: ABSOLAR, 2019. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/artigos/os-guerreiros-da-geracao-distribuida-solar-fotovoltaica>. Acesso em: 05 fev. 2023.

SALHAB, Rafael Mazzeo. **Financiamento de energia solar fotovoltaica para clientes de varejo: desafios e oportunidades**. 2021. Revista BNDES, v. 28, n.56, p. 437-474, dez. 2021.

MIRANDA, Rosana; LEANDRO, Francielle Da Silva; SILVA, Tatiane Caetano. **Gestão Do Fim De Vida De Módulos Fotovoltaicos**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 8, n. 1, p. 364-383, 2019.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 08 fev. 2023.