



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Produção



Francine Ferreira da Silva

**ANÁLISE DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CENTRALIZADA NO
SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

Ouro Preto – MG

2021

FRANCINE FERREIRA DA SILVA

**ANÁLISE DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CENTRALIZADA NO
SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira de Produção.

Orientador: Gustavo N. Pinto de Moura

Ouro Preto - MG

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Francine Ferreira Da.
Análise da expansão da geração fotovoltaica centralizada no sistema elétrico brasileiro brasileiro. [manuscrito] / Francine Ferreira Da Silva. - 2021.
59 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Energia elétrica. 2. Fotovoltaica - fontes alternativas de energia. 3. Geração de energia fotovoltaica. I. Moura, Gustavo Nikolaus Pinto de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803

14/12/21, 15:10

SEI/UFOP - 0258122 - Folha de aprovação do TCC



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, ADMINISTRAÇÃO E ECON



FOLHA DE APROVAÇÃO

Francine Ferreira da Silva

ANÁLISE DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CENTRALIZADA NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Produção

Aprovada em 14 de dezembro de 2021

Membros da banca

D.Sc. - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
D. Sc. - Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. - Fidellis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau - Universidade Federal de Ouro Preto

Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/12/2021



Documento assinado eletronicamente por Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 14/12/2021, às 13:55, 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 Fidellis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 14/12/2021, às 15:09, 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 Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 14/12/2021, às 15:10, 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 http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0258122 e o código CRC 63AEF97A.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.013183/2021-53

SEI nº 0258122

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 313591540 - www.ufop.br

RESUMO

Vinte anos após a crise elétrica de 2001, o Brasil encontra-se novamente em um cenário de crise no abastecimento de energia. Mesmo que uma conjunção de fatores tenha acarretado este evento, destacam-se a ineficácia do planejamento energético nacional e a baixa diversificação da matriz elétrica, majoritariamente representada pela fonte hidráulica. Neste cenário, as fontes alternativas de energia têm ganhando força, como é o caso da fotovoltaica. O objetivo deste trabalho é apresentar e analisar o panorama atual e a possível expansão do setor de geração de energia fotovoltaica centralizada no Brasil. Foi realizada uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa. Ainda que este tipo de fonte possua uma modesta participação na matriz elétrica nacional, não alcançando 2%, a mesma apresentou um crescimento substancial, avançando de 0,1 MW de potência instalada em 2010, para 3.300 MW em 2020. O mercado de energia no Brasil possui grande horizonte de crescimento, apesar de existirem apenas 7 empresas produtoras de módulos no país. Os valores de painéis apresentaram queda na última década, passaram de US\$ 3,50/W, para US\$0,50/W, acarretando o declínio do preço do conjunto de geração, de US\$4.731/kW, para US\$883/kW. A energia fotovoltaica tem liderado os cadastros para leilões de energia nova, situação em que também ocorreram reduções de preços, o valor médio, que em 2015 era de R\$ 300,00/MWh, em 2019, não ultrapassou R\$ 90,00/MWh. Este estudo mostra o potencial de geração de eletricidade a partir da incidência solar sobre o território brasileiro, estima-se que até 2050, a capacidade instalada em geração centralizada seja de 90 GW, montante que ainda pode ser acrescido considerando-se o avanço das novas tecnologias e aplicações de sistemas fotovoltaicos de forma conjugada a outros sistemas. São analisados os impactos socioambientais que podem ser gerados através da instalação de uma usina e da produção de seus componentes. Deste modo, o setor fotovoltaico apresentou um grande desenvolvimento no Brasil e as perspectivas futuras são favoráveis à expansão para essa fonte que pode desempenhar um papel importante na diversificação da matriz elétrica nacional.

Palavras-chaves: Energia Fotovoltaica; Geração de Energia; Matriz Energética; r; Crise no Fornecimento de Energia.

ABSTRACT

Twenty years after the 2001 electricity crisis, Brazil finds itself once again in a scenario of energy supply crisis. Even though a number of factors have caused this event, the most important are the inefficiency of the national energy planning and the low diversification of the electric matrix, mostly represented by the hydraulic source. In this scenario, alternative energy sources have been gaining strength, as is the case of photovoltaics. The objective of this work is to present and analyze the current panorama and the possible expansion of the centralized photovoltaic energy generation sector in Brazil. A bibliographic review, of a qualitative nature, was carried out. Even though this type of source has a modest participation in the national electric matrix, not reaching 2%, it has shown a substantial growth, advancing from 0.1 MW of installed capacity in 2010, to 3,300 MW in 2020. The energy market in Brazil has a great growth horizon, despite the fact that there are only 7 companies producing modules in the country. Panel prices have fallen in the last decade, from US\$3.50/W, to US\$0.50/W, causing the price of the generation set to decline, from US\$4,731/kW, to US\$883/kW. Photovoltaic energy has led the registrations for new energy auctions, a situation in which price reductions have also occurred, the average value, which in 2015 was R\$300.00/MWh, in 2019, did not exceed R\$90.00/MWh. This study shows the potential for electricity generation from solar incidence on the Brazilian territory, it is estimated that by 2050, the installed capacity in centralized generation will be 90 GW, an amount that can still be increased considering the advancement of new technologies and applications of photovoltaic systems in conjunction with other systems. The socio-environmental impacts that can be generated through the installation of a plant and the production of its components are analyzed. Thus, the photovoltaic sector has shown great development in Brazil and the future prospects are favorable for the expansion of this source that can play an important role in the diversification of the national electricity matrix.

Keywords: Photovoltaics; Power generation; Energy matrix; Photoelectric effect; power supply crisis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Usina solar fotovoltaica dos parques Disney World, Flórida, Estados Unidos. ...	5
Figura 2 - Irradiação Normal Global do Brasil.....	6
Figura 3 – Célula fotovoltaica – visão esquemática.....	9
Figura 4 - Célula, Módulo e Pannel fotovoltaico.	10
Figura 5 - Exemplos de placas de solares: (a) placa de silício monocristalino e (b) placa de silício policristalino.	11
Figura 6 - Filme fino de CIGS.....	13
Figura 7 - Aplicação de células OPV em um modelo de árvore.	14
Figura 8- Esquema de funcionamento de uma usina FVF.	18
Figura 9 - Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil em 2019.....	20
Figura 10 - Distribuição das usinas FV em operação no Brasil.	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eficiência dos módulos fotovoltaicos.	15
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução da capacidade instalada de geração de energia solar centralizada no Brasil, em MW.	22
Gráfico 2 – Preços médios de módulos FV por tecnologia e país de fabricação, 2010 a 2020 e preços médios anuais dos módulos por mercado em 2013 e 2020, em US\$.	24
Gráfico 3 – Custo total do sistema fotovoltaico instalado e médias para sistemas de 2010 a 2020, em US\$/kW.	25
Gráfico 4 – Preço médio da energia solar fotovoltaica comercializada em leilões, em R\$/MWh.	26
Gráfico 5 – Estimativa da evolução da demanda por eletricidade a ser atendida por GC... ..	30

SUMÁRIO

Resumo	V
Abstract.....	VI
Lista de Figuras.....	VII
Lista de Tabelas	VIII
Lista de Gráficos	IX
Sumário.....	X
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivo	3
1.2.1 Objetivos Específicos	3
1.3 Metodologia	3
2 A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SOLAR	5
2.1 O potencial solar brasileiro.....	6
2.2 Conversão fotoelétrica	7
2.3 Tecnologia fotovoltaica.....	7
2.3.1. Princípios de funcionamento.....	8
2.3.2. Células, módulos e painéis	9
2.3.2.1. Módulos de silício cristalino	10
2.3.2.2. Módulos de filmes finos	12
2.3.2.3. Módulos de materiais orgânicos e nanoestruturados	13
2.3.2.4. Módulos de perovskita	14
2.3.2.5. Eficiência das placas solares	14
2.3.3. Inversores.....	16
	X

2.4. Sistemas fotovoltaicos	16
2.5. Geração de energia elétrica centralizada e de grande porte.....	17
3 A TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA DE GRANDE PORTE	17
3.1. Impactos socioambientais das usinas fotovoltaicas	18
3.2. Impactos ambientais na fabricação de componentes	19
4 A energia solar fotovoltaica no brasil	20
4.1 Histórico da energia solar fotovoltaica no Brasil	21
4.2 Cenário atual da energia solar fotovoltaica no país	21
4.3 Custos de projetos fotovoltaicos centralizados	23
4.4 Indústria de componentes para painéis FV no Brasil	27
4.5 Expansão da energia solar	28
4.6. Limitações para expansão no Brasil	28
4.7. Desafios futuros	29
5 Investimentos previstos no brasil	31
5.1 Incentivos fiscais e tributários.....	31
5.1.1 Convênio 101/97 do Conselho Nacional de Política Fazendária - CONFAZ	31
5.1.2 Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura - REIDI	31
5.2 Realização de leilões de energia.....	32
5.3 Linhas de crédito.....	33
5.3.1 Inova Energia	33
5.3.2 BNDES.....	34
5.3.2.1. Principais projetos em desenvolvimento em parceria com o BNDES	34
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	35

1 INTRODUÇÃO

A procura por fontes renováveis de energia nas últimas décadas tem se intensificado, diversos países têm buscado meios para se adequar aos tratados internacionais que visam a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Desta forma, novas tecnologias e conceitos passaram a figurar no cenário energético global.

Esse momento tem recebido o nome de transição energética e está relacionado a transformações estruturais e tecnológicas, visando a promoção das fontes renováveis, a mitigação de impactos socioambientais e a sustentabilidade e garantia de abastecimento. Por se tratar de uma fase de renovação e, considerando a complexibilidade destes processos, assume-se que as mudanças têm caráter gradual, e que nas atuais circunstâncias, haverá a concomitância de fontes de energia (EPE, 2020a).

No presente, a matriz elétrica nacional possui alicerce na fonte hidráulica, contando com 65% de participação (EPE, 2020b), apesar das diversas vantagens deste tipo de fonte, a mesma está condicionada a características climáticas, sobretudo nas regiões onde as maiores unidades produtoras encontram-se situadas. Embora os fatores ambientais também sejam critérios determinantes em outros tipos de fonte como a eólica e solar por exemplo, ambas fontes possuem maior flexibilidade de localização, podendo ser implantadas em locais estratégicos e de maneira a complementar vazios existentes no sistema de abastecimento.

Em 2021, o Governo Federal publicou a portaria nº 538, que estabelece as diretrizes para o um programa de atendimento ao Sistema Interligado Nacional (SIN), chamado Redução Voluntária de Demanda de Energia Elétrica (RVD) (BRASIL, 2021a), destinado aos grandes consumidores, o objetivo é diminuir o consumo em determinados períodos para evitar riscos de falta de energia, principalmente no horário de pico.

Esta ação remeteu ao chamado período “apagão”, ocorrido entre 2001 e 2002, época em que o país passava por uma grande crise no setor elétrico, causada pelo planejamento energético ineficaz e o baixo índice pluviométrico. A principal medida adotada naquele momento foi o racionamento de energia (GADELHA, 2010; ROUBICEK, 2021).

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (ANA, 2020), houve redução nos índices de chuva entre 2012 e 2017, ocasionando baixo reabastecimento dos reservatórios. Em 2018, houve uma ligeira melhoria deste quadro, e os reservatórios conseguiram recuperar parte de seus volumes. Porém, em 2019, as taxas pluviométricas voltaram a cair, sobretudo nas bacias do Paraná, Tocantins-Araguaia e São Francisco, onde estão situadas as principais centrais de geração hidroelétricas do SIN, o que fez com que o volume útil total dos reservatórios, fosse 7,5% inferior ao ano anterior.

Além da hidrologia desfavorável da última década, outros aspectos evidenciam a urgência da diversificação da matriz elétrica do país, como, por exemplo, o crescimento da demanda, seja por crescimento econômico ou pelo desenvolvimento de novas tecnologias como os veículos elétricos e os *smartgrids*, que devem aumentar a demanda por maior eletrificação da matriz energética (GONÇALVES et al., 2018).

Também deve-se considerar o aspecto econômico da geração de energia elétrica, segundo Bezerra (2021), a fonte solar ocupa posição de destaque no quesito de competitividade financeira, uma vez que os preços do MWh tiveram uma redução expressiva na última década.

1.1 Justificativa

A irradiação solar na superfície terrestre é suficiente para suprir a demanda mundial de energia milhares de vezes. No entanto, essa radiação não chega de maneira uniforme a toda a crosta, fatores como a estação do ano, a latitude e também as condições atmosféricas interferem diretamente na quantidade de radiação recebida.

O Brasil é um país privilegiado no que tange as taxas de recepção de irradiação solar, uma vez que diversas localidades do território nacional se comparam às melhores regiões no mundo nesse aspecto. Outro fator relevante é que o país possui grandes reservas de quartzo de qualidade, que podem ser empregadas para a produção de silício com alto grau de pureza, células fotovoltaicas e módulos solares. Tais características naturais colocam o Brasil em posição de vantagem competitiva neste mercado.

Apesar destes fatores, ainda existem inúmeros desafios para que a consolidação dessa fonte energética ocorra, de acordo com a EPE (2020b), a energia fotovoltaica vem se tornando cada vez mais representativa na matriz energética do país, entre 2018 e 2019, a participação desta fonte na matriz elétrica nacional passou de 0,5% para 1%, porém, ao fazer uma análise comparativa entre a capacidade e a quantidade de energia que efetivamente é produzida no Brasil, vemos que este ainda é um potencial bastante inexplorado.

1.2 Objetivo

Identificar e apresentar o panorama geral da geração solar fotovoltaica centralizada no Brasil e detectar investimentos no setor para os próximos anos.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Analisar o cenário atual do setor elétrico brasileiro;
- Apresentar os princípios de funcionamento de sistemas fotovoltaicos;
- Apresentar o potencial solar brasileiro;
- Comparar a utilização da fonte fotovoltaica na matriz energética;
- Retratar a inserção da energia fotovoltaica no Brasil, capacidade instalada e empreendimentos em operação e futuros;
- Identificar a cadeia de valor da indústria e a geração de empregos;
- Expor as políticas vigentes no país sobre geração fotovoltaica centralizada;
- Analisar os custos de investimento em projetos fotovoltaicos de grande porte;
- Analisar os custos da eletricidade solar fotovoltaica.

1.3 Metodologia

O trabalho desenvolvido tem natureza qualitativa e seguiu os preceitos do estudo exploratório. O mesmo foi embasado em pesquisas bibliográficas sobre o tema abordado, com intuito de fazer a apresentação e análise do atual cenário de grandes usinas de geração de energia

elétrica por meio da fonte solar fotovoltaica no Brasil, além de investigar as projeções futuras para este mercado.

Para a seleção das fontes, foram consideradas como critério de inclusão, as bibliografias na área de energia e energia solar fotovoltaica e dados advindos das principais organizações que realizam estudos sobre o setor fotovoltaico no Brasil e em escala global.

Constituem as principais fontes deste estudo, materiais de origem diversa, tais como artigos científicos, teses, dissertações, documentos técnicos, relatórios nacionais e internacionais, planos de investimentos do Governo Federal e dados obtidos de órgãos governamentais como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

2 A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SOLAR

Atualmente são conhecidos dois métodos para obtenção de energia elétrica a partir de raios solares, o primeiro é o heliotérmico. Considerado um meio indireto de geração de eletricidade, este processo é dividido em duas etapas para realizar a conversão, a primeira consiste basicamente em captar a radiação solar por meio de painéis concentradores para refletir essa luminosidade e acumular calor em um ponto receptor onde existe um fluido para transferência de calor e na segunda etapa, a energia térmica obtida na fase anterior será transformada em energia mecânica movimentando assim turbinas ou motores ligados a geradores de eletricidade (CASTRO, 2016).

O segundo método para geração de energia é chamado de fotovoltaico. Este processo é considerado um meio direto de geração. Essa tecnologia é baseada no efeito fotoelétrico, que de modo geral traduz-se na colisão de partículas da luz solar com átomos do material semicondutor nas chamadas células fotovoltaicas, onde há absorção de fótons e liberação de elétrons, criando-se assim corrente elétrica. Neste caso, a energia pode ser obtida por meio distribuído, ou seja, sistemas de geração de baixa potência conectados à rede de distribuição. Outra possibilidade pode ser a geração centralizada, que é caracterizada por grandes centrais produtoras, a fim de abastecer um centro de alto consumo, como é demonstrado na Figura 1. Este tipo de geração será o tema foco deste estudo e mais aprofundado nos próximos tópicos.

Figura 1 – Usina solar fotovoltaica dos parques Disney World, Flórida, Estados Unidos



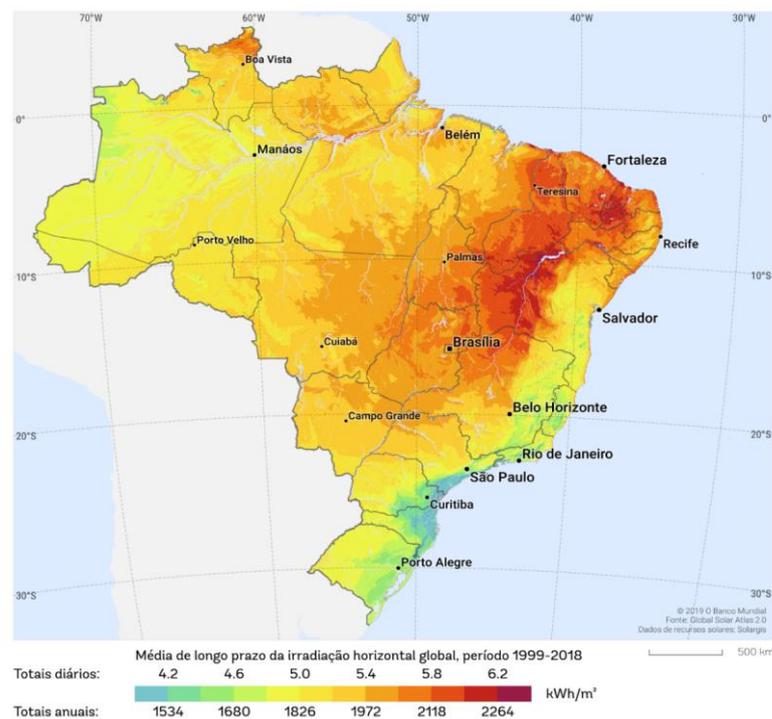
Fonte: Conexão Planeta, 2019.

2.1 O potencial solar brasileiro

O Brasil é um dos países com maior potencial para exploração da energia solar, avalia-se que a localidade com menor irradiação solar do território brasileiro é capaz de produzir mais energia elétrica do que a melhor região da Alemanha (PEREIRA et al., 2017), que é mundialmente conhecida por ser um dos países líderes em produção de eletricidade por meio fotovoltaico.

Na Figura 2 é possível observar que a irradiação global apresenta uma boa distribuição pelas regiões do país, no entanto, a faixa que se estende da Região Sul até meados do litoral da Bahia evidencia as taxas de irradiação mais baixas do território nacional, cerca de 4,25 kWh/m²/dia. Os maiores índices de irradiação solar, em média 6,5 kWh/m²/dia, ocorrem onde há maior estabilidade climática e que, assim atribuem menores quadros de nebulosidade e maiores de irradiação, tais condições podem ser verificadas na região compreendida entre Minas Gerais e a parte central do território baiano (EPE, 2012).

Figura 2 - Irradiação Normal Global do Brasil



Fonte: Global Solar Atlas, 2021.

Um estudo realizado pela EPE em 2018, fez uma estimativa do potencial técnico de aproveitamento fotovoltaico de grande porte, em que foram mapeadas áreas com viabilidade para implantação, porém, desconsiderando-se áreas com vegetações nativas, territórios sob proteção e áreas urbanas. Foi avaliada a possibilidade de instalação de 307 GWp em centrais fotovoltaicas, com geração aproximada de 506 TWh/ano (EPE, 2018b).

2.2 Conversão fotoelétrica

Denomina-se efeito fotoelétrico o processo de transformação da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica. O primeiro a observar esta ocorrência foi o físico francês Edmond Becquerel no ano de 1839. Basicamente, este fenômeno pode ser descrito como a capacidade de alguns materiais semicondutores de absorver energia contida nos fótons incidentes e transformá-la em corrente elétrica (ZILLES *et al.* 2012). O processo traduz-se na transferência de energia dos fótons para os elétrons, de modo a gerar uma corrente de fotoelétrons (BRAUNN; LARSEN, 2019).

2.3 Tecnologia fotovoltaica

O desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica pode ser dividido em quatro fases, de acordo com Tolmasquim (2016, *apud.* BREYER; GERLACH, 2013): na fase inicial, os módulos fotovoltaicos eram utilizados em aplicações espaciais apenas. A segunda fase, aconteceu em decorrência das crises de petróleo, deste modo, na década de 1970, a energia fotovoltaica começou a ser economicamente viável para atender áreas geograficamente isoladas, associadas ao uso de baterias. A terceira fase remete ao final da década de 1990, quando alguns países elaboraram programas de fomento à geração de energia fotovoltaica ligada a rede de transmissão, associada ao pagamento de tarifas-prêmio pela energia disponibilizada nesses sistemas. Essas práticas contribuíram fortemente para que os custos de produção de sistemas fotovoltaicos fossem reduzidos. Por fim, a quarta e última fase pode ser notada atualmente, com a energia fotovoltaica alcançando cada vez mais potencial de mercado, e se tornando competitiva em relação às fontes de energia tradicionais e de cunho centralizado.

2.3.1. Princípios de funcionamento

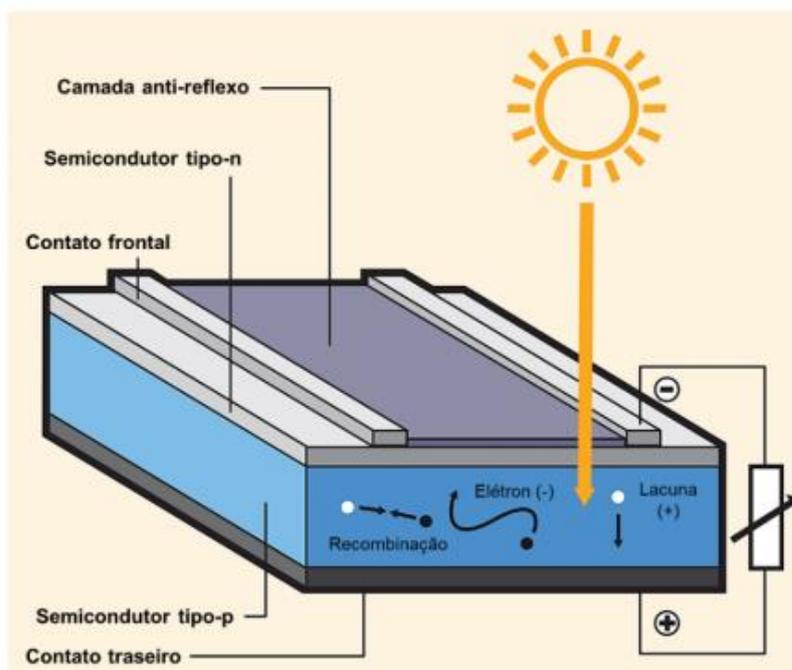
De modo geral, os sistemas fotovoltaicos (FV) fazem uso de painéis equipados com insumos condutores que irão executar a captação dos raios solares e assim realizar a conversão destes em energia elétrica em forma de corrente contínua. Assim faz-se necessária a transformação para corrente alternada com o fito de distribuir a eletricidade produzida.

Os materiais semicondutores são assim classificados por possuírem dois tipos de bandas de valência (na temperatura do 0 absoluto K): a primeira, é totalmente preenchida por elétrons, e a segunda banda, é considerada “vazia” ou sem elétrons. Desta forma, é esperado que no estado de energia 0 K, o semicondutor venha a se comportar como um isolante (PINHO; GALDINO, 2014).

O semicondutor mais utilizado pela indústria, segundo Tolmasquin (2016) é o silício. Este elemento é caracterizado por possuir quatro elétrons de valência, que se ligam aos átomos vizinhos, na composição de uma rede cristalina. Porém, se nesta rede adicionarmos um átomo que possua cinco elétrons de valência, como por exemplo o Fósforo (P) teremos um elétron excedente, que ficará “sobrando” por não estar emparelhado. Com este elétron “excedente” é possível que, com o uso de pouca energia, faça-se se a sua liberação para a banda de condução. Ou seja, o fósforo neste caso é um elemento “dopante n”, ou um doador de elétrons. Entretanto, se inserirmos na estrutura um átomo que só tenha três elétrons de valência como o Boro (Bo), teremos um elétron ausente, que não satisfará as ligações com os átomos de Silício na estrutura, esta lacuna eletrônica é chamada de “dopante p”, ou seja, o Boro é um receptor de elétrons. Então, se partirmos de um composto de Silício puro, e introduzirmos átomos de Boro e Fósforo em metades diferentes da estrutura, teremos a formação da denominada junção pn.

O que ocorre nessa estrutura é que os elétrons livres do lado doador (n) irão se deslocar para o lado receptor (p). Este fenômeno, que pode ser observado de forma esquemática na Figura 3, faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, tornando essa região negativamente carregada, e uma redução de elétrons no lado n, o que a torna positivamente carregada. Este aprisionamento de cargas dá origem a um campo elétrico permanente, que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p, e tal processo irá alcançar o equilíbrio quando o campo elétrico gerado formar uma barreira cuja capacidade seja de bloquear a movimentação de elétrons livres excedentes no lado n (EPE, 2007).

Figura 3 – Célula fotovoltaica – visão esquemática



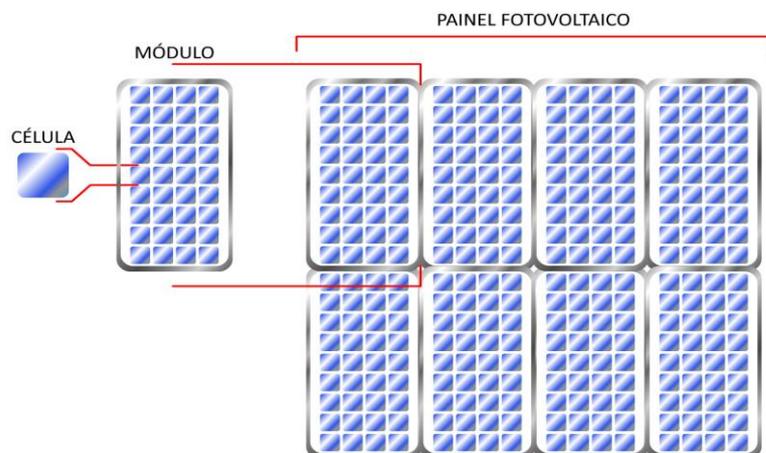
Fonte: Simioni *apud* Arvizu *et al.*, 2017

Deste modo, concordando com Pinho e Galdinho (2014), esta discriminação dos lados portadores de carga da junção pn dá origem ao efeito fotovoltaico nesta estrutura, que irá então converter energia luminosa em energia elétrica associada a uma corrente elétrica derivada de uma diferença de potencial. Este efeito não é exclusivo desta estrutura, mas de qualquer diodo semicondutor que seja exposto à radiação, então, pode-se concluir que as células fotovoltaicas são basicamente diodos de grande superfície, que foram otimizados para melhor aproveitamento do efeito fotoelétrico.

2.3.2. Células, módulos e painéis

Conforme apresentado no tópico anterior, as células fotovoltaicas podem ser definidas como artefatos semelhantes a diodos que ao entrarem em contato com a luminosidade solar, são capazes de converter essa energia em eletricidade. Os módulos fotovoltaicos são as montagens compostas por agrupamentos em série de células (ASSUNÇÃO, 2014). Os painéis fotovoltaicos são o conjunto de vários módulos do mesmo tipo, conforme representado na Figura 4.

Figura 4 – Célula, Módulo e Painel fotovoltaico



Fonte: Elaboração própria, 2021.

Existem diversos tipos de células no mercado atualmente e também pesquisas para o desenvolvimento de modelos que apresentem maiores rendimentos. As células podem ser diferenciadas de acordo com o material de fabricação e com seus atributos. Os principais tipos são: células de primeira geração: células de silício cristalino, as de segunda geração: filmes finos; e as de terceira geração: materiais orgânicos e nanoestruturados (CEMIG, 2012). Silva (2015) aponta que aproximadamente 80% das células produzidas comercialmente são compostas por silício e o restante do mercado faz uso filmes finos.

Segundo Castro (2018), em conformidade com sua aplicação, os elementos FV podem ser classificados em dois grupos: o primeiro é o dos fotodetectores, que, conforme a nomenclatura, servem como meio para detecção de luz. Neste caso, é necessário que o fotodetector apresente somente sensibilidade a um comprimento de onda. O segundo grupo é composto pelas células solares, que farão a conversão de energia. Esta variedade exige que as células apresentem uma gama maior de sensibilidade à radiação do sol.

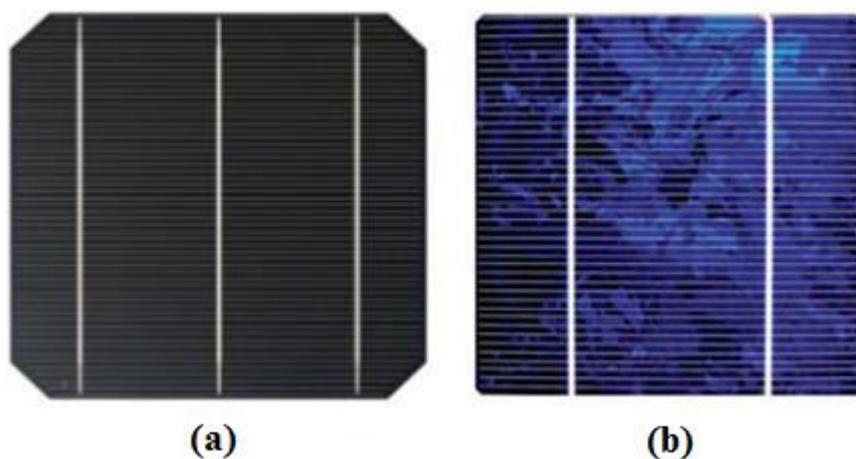
2.3.2.1. Módulos de silício cristalino

Ao se analisar a constituição da crosta terrestre é possível verificar que, somente quatro, dentre todos os elementos químicos conhecidos, correspondem a cerca de 88% de sua

composição. Assim, a distribuição observada é de 46% de oxigênio, 28% de silício, 8% de alumínio e 6% de ferro. O silício na superfície da Terra está presente majoritariamente na forma do grupo de minerais denominados Silicatos, dos quais, individualmente falando, o Quartzo (SiO_2) é o mais abundante (PRESS *et al.*, 2006).

As células à base de silício cristalino são as mais tradicionais e mais empregadas comercialmente. Tais células podem ser constituídas de silício monocristalino ou policristalino, ambas exemplificadas na Figura 5. A obtenção das células de silício monocristalino acontece em um reator de atmosfera controlada, onde há um “banho” de silício fundido de alta pureza (faixa de 99,99% a 99,9999%), neste processo ocorre o crescimento de um monocristal a uma velocidade muito baixa. Realizada esta etapa, o produto obtido passa por processos complementares de acabamento, como usinagem, corte e polimento (RÜTHER, 2004).

Figura 5 – Exemplos de placas de solares: (a) placa de silício monocristalino e (b) placa de silício policristalino



Fonte: Solaris, 2018.

No caso do silício policristalino, o material sofre uma etapa de solidificação direcional e o resultado é um bloco com vários cristais. No entanto, o contorno destes grãos é permeado por pequenas imperfeições que implicam em menor eficiência de conversão de energia, estima-se que as células de silício monocristalino tenham taxa de conversão de até 21%, enquanto os índices das policristalinas alcancem somente cerca de 17%. As fases de acabamento são basicamente as mesmas que ocorrem para as células monocristalinas (RÜTHER, 2004).

A montagem dos módulos contendo as células de silício pode ocorrer de vários modos, comumente emprega-se o vidro temperado para suporte e preservação, camadas de EVA para

encapsulamento e proteção contra corrosão, enquadramentos metálicos, normalmente de alumínio e uma caixa de ligação elétrica (SIMIONI, 2017).

2.3.2.2. Módulos de filmes finos

Segundo Marques (2014), as células de primeira geração apresentam um baixo coeficiente de absorção de luz. Esse fato se torna um problema, pois deste modo, se faz necessário que as placas sejam mais espessas para absorver toda a luz. Essa questão não atinge materiais amorfos, já que estes possuem bons níveis de absorção de luz e ainda podem ser modelados em forma de filmes finos.

As células solares de segunda geração são feitas a partir da deposição de filmes finos em variados materiais, como vidro, metal ou plásticos. Os substratos utilizados na obtenção dos módulos comerciais podem ser reunidos em cinco grupos principais, de acordo com Simioni (2014), a saber: silício amorfo ou microcristalino (a-Si e/ou mc-Si); disseleneto de cobre índio (CIS) ou combinado com gálio (CIGS), representado na Figura 6; telureto de cádmio (CdTe); telureto e sulfeto de cádmio combinados (CdTe/CdS); e arsenieto de gálio (GaAs).

Figura 6 – Filme fino de CIGS



Fonte: Canal Solar, 2020.

As células solares de silício amorfo têm tendência a sofrerem desgastes com iluminação e por esta razão, seu uso não é muito recomendado em grandes usinas fotovoltaicas. Os meios de produção deste tipo de células se dão a temperaturas consideradas baixas (menores que 300°C), em processos a plasma. Assim, foram criados módulos mais versáteis para o mercado

que são flexíveis, inquebráveis, leves, semitransparentes, com superfícies curvas (RÜTHER, 2004). No entanto, com baixos índices de rendimento elétrico, não ultrapassando 8%.

A produção de células comerciais à base de disseleneto de cobre, índio ou gálio (CIS/CIGS) foi iniciada na Alemanha em 2011. Esta tecnologia permite a associação de várias de camadas de material, que permitem a melhor absorção de fótons (MARQUES, 2014). Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, existem pesquisas que visam o aumento da eficiência de conversão, que geralmente não ultrapassa 15%.

Os elementos solares baseados em telureto de cádmio (CdTe) e em telureto e sulfeto de cádmio combinados (CdS/CdTe) têm estrutura fundamentada em camadas de semicondutores de CdS e CdTe. As células são obtidas por deposição em um substrato sólido como vidro ou plástico, ou até mesmo em um substrato flexível como um polímero (MORALES, 2011). Tais módulos possuem taxa de conversão menores que 16%. Um grande impasse para o uso destas células, é que, o cádmio é um elemento tóxico e isso tem sido uma das barreiras para seu emprego em grande escala.

Finalmente, as células de arseneto de gálio (GaAs) possuem elevado nível de absorção de iluminação solar, obtendo-se valores de eficiência em torno de 30%. Também apresentam certa maleabilidade na confecção de elementos fotovoltaicos, se tornando versáteis a variados tipos de projetos (SANTOS, 2013). Carvalho, Mesquita e Rocio (2014) afirmam que, devido à escassez de ocorrências de gálio na natureza, seu emprego em grandes proporções se faz inviável. Assim sendo, o silício torna-se um sucessor exequível.

2.3.2.3. Módulos de materiais orgânicos e nanoestruturados

Os elementos de terceira geração, na visão de Matsumoto (2013), consistem basicamente em células orgânicas (OPV) de múltipla junção que fazem uso da nanotecnologia para deposição de películas de pouca espessura sobre substratos maleáveis, como pode ser observado na Figura 7. Lima *et al.* (2020) acrescentam que essa classe de materiais abrange tecnologias em desenvolvimento e que não estão disponíveis para produção em larga escala. Por se tratarem de elementos ainda em construção, essas células possuem eficiências de conversão menos expressivas que às de primeira e segunda geração.

Figura 7 – Aplicação de células OPV em um modelo de árvore



Fonte: Unividros, 2021.

2.3.2.4. Módulos de perovskita

Uma tecnologia que vem chamando a atenção do mercado de produção de energia fotovoltaica, são as células híbridas orgânicas-inorgânicas de perovskitas, devido às suas ótimas propriedades eletrônicas e óticas. Estas placas ganharam ainda mais destaque quando patamares de mais de 22% de eficiência de conversão de energia foram atingidos. Estes novos horizontes de eficiência superaram vários outros tipos de células fotovoltaicas da terceira geração, e faz desta, a tecnologia mais promissora para geração vindoura de dispositivos fotovoltaicos, após as tradicionais células de silício (WU *et al.*, 2017).

Todavia, de acordo com Qiu, Ono e Qi (2018), um desafio ainda precisa ser superado, a toxicidade das células de perovskita, este fator é uma das maiores preocupações para sua comercialização.

2.3.2.5. Eficiência das placas solares

A eficiência dos módulos fotovoltaicos pode ser descrita basicamente como a fração de eletricidade gerada por uma célula a partir da energia da luminosidade que incide sobre ela. Essa quantidade de energia obtida vai depender das características da luz disponível, a

intensidade e comprimento de onda e também, das propriedades da célula, na Tabela 1 estão apresentados os valores de eficiência para alguns tipos de placas FV.

Tabela 1: Eficiência dos módulos fotovoltaicos

Tecnologia	Eficiência módulos em laboratório	Eficiência de módulos comerciais
Silício monocristalino	22,9%	17 a 21%
Silício policristalino	18,5%	14 a 17%
Silício amorfo	10,9%	4 a 8%
Telureto de Cádmio (CdTe)	18,2%	10 a 16%
Disseleneto de cobre-índio-gálio	17,5%	12 a 14,7%
Arseneto de gálio (GaAs)	28,8%	37,7%
Células orgânicas	15%	10,7%

Fonte: Elaboração própria a partir de Pinho; Galdino (2014) e EPE (2018a)

A eficiência de conversão das placas pode ser impactada por dois fatores principais que são a temperatura ambiente de operação e a intensidade da irradiação solar incidente sobre a célula. Neste caso, o efeito pode vir tanto pela nebulosidade ou pela inclinação do módulo. O tempo de uso das células também tem influência sobre a taxa de conversão, estima-se que durante a vida útil do sistema, a eficiência de conversão tem redução de aproximadamente 1% ao ano (EPE, 2012).

As condições ambientais e climáticas têm total influência no que tange à eficiência energética e ao funcionamento dos módulos fotovoltaicos. Fatores como inclinação das células e velocidade dos ventos, desempenham um importante papel no desempenho final do sistema (SOUZA; ARISTONE, 2016).

2.3.3. Inversores

Para que a energia gerada por meio dos módulos FV chegue até o consumidor final é necessário que a mesma seja convertida de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), sendo essa etapa realizada pelos inversores fotovoltaicos. Os inversores desempenharão também o papel de conectar os arranjos FV à rede de distribuição.

Com o propósito de prevenir déficits energéticos, deve haver compatibilidade entre o inversor e o sistema, desta maneira é necessário que dimensionamento do conjunto seja feito de modo a não haver excessos e nem insuficiência (RAMPINELLI; KRENZINHER; ROMERO, 2013). A eficiência dos inversores vem aumentando com o passar dos anos e com as melhorias realizadas em seus projetos e o emprego de novos materiais em seus componentes (GARCÍA, 2019).

Com os avanços tecnológicos e o empenho em maximizar o desempenho dos sistemas FV, surgiram os chamados inversores inteligentes que permitem a comunicação bidirecional entre a rede elétrica e o inversor, o que pode auxiliar no acompanhamento de desempenho da rede, no fornecimento de ferramentas para responder a alguns distúrbios, como mudança de tensão, e na obtenção de dados para tomada de decisão de forma a garantir a estabilidade da rede (RIBEIRO JÚNIOR, 2018).

2.4. Sistemas fotovoltaicos

De acordo com Peraza (2013), os sistemas solares fotovoltaicos podem se apresentar de forma isolada, distribuída ou centralizada. Os sistemas isolados são aqueles em que a geração é específica para atendimento da própria demanda e não há ligação com a rede elétrica de distribuição. Normalmente, faz-se o emprego de baterias para armazenar a energia produzida. A geração distribuída (GD) se caracteriza por instalações, que, neste caso, estão conectadas ao sistema de distribuição, a geração ocorre no próprio local de consumo ou em locais próximos a eles, em edificações ou pequenas comunidades com o objetivo de atender a essas demandas. Por fim, o sistema de geração centralizada (GC), que também se encontra interligado à rede de distribuição, consiste em grandes usinas que de modo geral localizam-se em regiões afastadas

do centro de carga, uma vez que ocupam grandes espaços, este tipo de sistema será o foco deste estudo.

2.5. Geração de energia elétrica centralizada e de grande porte

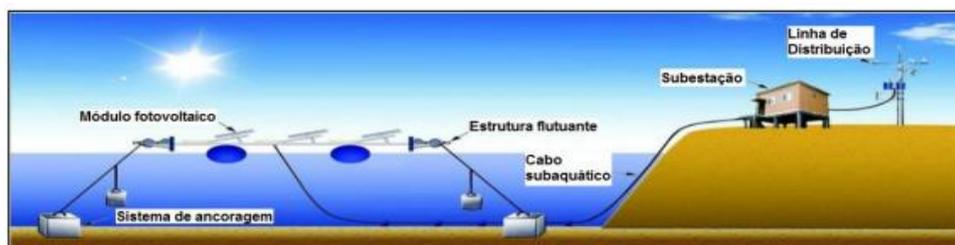
A centralização da geração de eletricidade pode ser caracterizada primeiramente pela unificação locacional da unidade produtora, que, geralmente, se encontra geograficamente distante da região consumidora da energia elétrica produzida. Também são características a alta capacidade, volume de produção e economia de escala (MARTINS; FRANCO, 2019).

Os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga de autorização para exploração e à alteração da capacidade instalada de centrais geradoras fotovoltaicas são regulados pela resolução REN 876/2020 (ANEEL, 2020a).

3 A TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA DE GRANDE PORTE

Conhecidas também como parques solares, as usinas fotovoltaicas são grandes centrais produtoras, projetadas para geração e comercialização da energia elétrica obtida por intermédio da conversão fotovoltaica. Os parques solares podem ser construídos sobre o solo, sendo fixos ou móveis (os painéis ficam posicionados sobre estruturas denominadas *trackers*, que vão se movimentar para acompanhar o sol, e assim, maximizar a absorção da luminosidade), ou também é possível instalar usinas sobre espelhos d'água, tecnologia conhecida como solar fotovoltaica flutuante (FVF), representada esquematicamente na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de funcionamento de uma usina FVF



Fonte: EPE *apud*. Choi (2014), 2020c.

As fases de vida de uma usina FV para Martins e Franco (2019), podem ser segmentadas em quatro, a saber: planejamento, implantação, operação e inativação. Os períodos de instalação e funcionamento têm destaque quando são abordados os impactos socioambientais causados na região onde a planta está inserida.

3.1. Impactos socioambientais das usinas fotovoltaicas

O processo de construção de uma usina fotovoltaica não requer um intervalo extenso de tempo, como exemplo, foram necessários 16 meses para a construção do Complexo Solar Pirapora, em Minas Gerais, que possui capacidade instalada de 321 MW (MOURA *et al.*, 2019). Este fato, pode atenuar possíveis decorrências advindas das obras. No período posterior à sua instalação, as usinas fotovoltaicas implicam baixo risco de impactos socioambientais, uma vez que durante sua operação não há emissão de poluentes e GEE (EPE, 2012).

No entanto, segundo Filho *et al.* (2015), podem existir diversos danos aos meios físico e biótico, onde uma usina esteja situada, como a alteração na paisagem, desmatamento, criação ou aumento de processo erosivo, afugentamento da fauna local, diminuição do potencial ecológico, acréscimo no fluxo de recursos humanos, veículos, equipamentos e materiais na área.

De acordo com Silva, Shayani e Oliveira (2018), os processos de fabricação de células fotovoltaicas estão associados aos maiores impactos ambientais desta fonte de energia. Deste modo, a fonte solar se coloca em vantagem em empreendimentos com demandas e restrições ambientais, considerando que com pesquisas e desenvolvimento tecnológico, as unidades produtoras dos módulos fotovoltaicos podem adequar-se para minimizar tais impactos.

Outro ponto a ser abordado é a localização de um parque solar. Sabe-se que a implantação de uma usina demanda uma área abrangente, contudo, o projeto pode adaptar-se às particularidades do local selecionado. A escolha deve levar em consideração outros fatores além da área e das taxas de irradiação solar em si, mas também características que possam favorecer a região, como a predileção por terrenos antropizados e a implantação em comunidades que estejam em condições de vulnerabilidade socioambiental. A inserção de uma usina em determinada região, além de aumentar a arrecadação de tributos, vai estimular a diversificação socioeconômica, alavancando a demanda por produtos e serviços.

3.2. Impactos ambientais na fabricação de componentes

A linha de produção de módulos solares pode ser comparada à indústria de componentes eletrônicos, os estágios de fabricação de *chips* de silício assemelham-se às etapas de obtenção de painéis, deste modo, ambos os processos podem ter efeitos parecidos no meio ambiente (REIS, 2015).

A primeira etapa do processo é a extração do silício, que ocorre pela mineração. Na natureza, o silício é encontrado de forma combinada com oxigênio ou outros elementos. A ocorrência mais comum é em forma do mineral quartzo. Segundo Guzzo (2008), a exploração do quartzo no Brasil ocorre geralmente em lavras a céu aberto, com uso de equipamentos manuais, por vezes, com maquinários de pequeno e médio porte, e uso de explosivos para desmonte das rochas. Finalizada esta etapa, o material obtido é processado, transformando-o em lascas ou monocristais. Reis (2015) relata que tais atividades causam efeitos no solo, meio aquático, ar e assim, podem afetar a população da região.

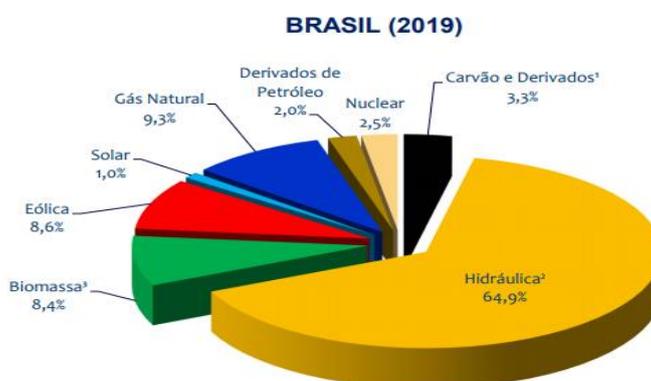
O segundo passo é conhecido como metalurgia do silício, em que é feita a redução do material. O método convencional é por meio da redução carbônica, que ocorre em fornos elétricos à arco, utilizando-se elevadas temperaturas, onde o quartzo é reduzido pelo carbono contido no coque, carvão mineral ou vegetal. O produto obtido é conhecido como silício de grau metalúrgico, que possui nível de pureza entre 98% e 99% (YABUTA, 2016). Brasil (2020) destaca os impactos que esses processos podem causar, como emissões de pó de sílica e gases tóxicos, que além de causar danos graves à vida humana, também contribuem para a poluição atmosférica.

A etapa seguinte é a purificação do silício, ou seja, o silício de grau metalúrgico passará por um processamento químico que irá deixá-lo em grau solar. Os tipos de processos mais empregados são o Siemens, o Union Carbide e o Ethyl (MARQUES, 2013). Na fase de purificação do silício, gases tóxicos e gases de efeito estufa são liberados na atmosfera.

4 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

É inquestionável a hegemonia da fonte hidroelétrica na matriz elétrica do Brasil, segundo dados da EPE (2020b), apresentados na Figura 9, em 2019 este tipo de fonte representou quase 65% de toda a eletricidade produzida no país. Na atualidade, outras fontes renováveis têm começado a figurar de modo mais representativo neste cenário, ao contrário das termoelétricas e as hidroelétricas, tais tipos de geração são tidas como fontes intermitentes, ou seja, as inconstâncias ligadas ao estado atmosférico onde as unidades produtoras estão inseridas (PEREIRA *et al.*, 2017).

Figura 9 – Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil em 2019.



Fonte: EPE, 2020b.

As diligências para redução do consumo de combustíveis fósseis ao redor do mundo têm se potencializado, no entanto, o Brasil, apesar de ocupar uma posição marcante em consequência de sua matriz elétrica embasada em recursos renováveis, não se sobressai entre os demais. Mesmo com vasto potencial para diversificação da matriz, é perceptível a deficiência na articulação de caminhos que visem um avanço sustentável e que façam um uso eficiente da energia, pois ainda hoje o horizonte é de forte utilização de hidroelétricas em detrimento de outras fontes (MONTEIRO; SILVEIRA, 2018).

Ainda que em ritmo lento, existem iniciativas no país afim de fomentar o uso da energia fotovoltaica, contudo, tais medidas não têm se mostrado efetivas, uma vez que a expressividade da fonte solar no cenário elétrico brasileiro é baixa (RELLA, 2017), não ultrapassando 2%.

4.1 Histórico da energia solar fotovoltaica no Brasil

O marco inicial desta fonte de energia no país foi na década de 1950, quando os primeiros módulos fotovoltaicos foram desenvolvidos no Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e no Centro Tecnológico de Aeronáutica (CTA). Foi iniciado o desenvolvimento de células de silício cristalino, cujo rendimento estimado foi de 12,5%, na Universidade de São Paulo (USP) (PINHO; GALDINO, 2014).

Em meados da década de 1970, deu-se início a um estudo que visava o desenvolvimento de células finas de sulfeto de cobre e sulfeto de cádmio ($\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$) no Rio de Janeiro no Instituto Militar de Engenharia (IME). Na mesma época, também ocorrem investimentos em pesquisas na área em Minas Gerais, no Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). Essas iniciativas foram impulsionadas devido à crise do petróleo que afetava o mercado de energia de modo global. No entanto, com a melhora no cenário energético mundial nos anos 1980, houve reduções de investimentos na área solar e muitos programas de pesquisas e até mesmo empresas tiveram de reorientar suas pesquisas.

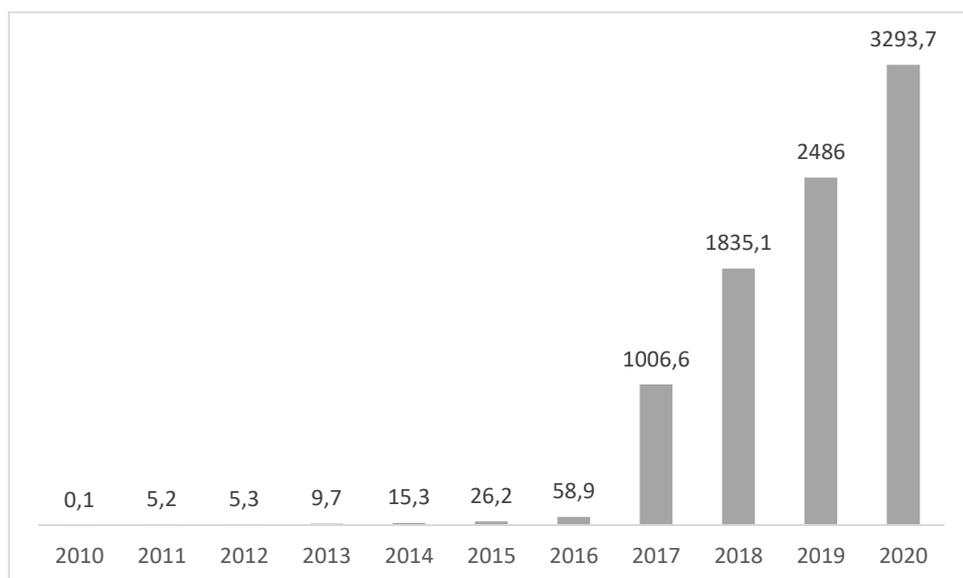
Nos anos 1990, aconteceram avanços no ramo, iniciou-se a produção de células de silício amorfo hidrogenado e ocorreu a Criação do CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, em uma parceria da Eletrobras e do Ministério de Minas e Energia (MME). Na virada do século, o Brasil não acompanhou os avanços de mercado de energia fotovoltaica pelo mundo, liderados por China, Alemanha e Japão. Desse modo, o Governo Federal começou a intervir com algumas medidas para facilitar e estimular a inserção desta fonte na matriz nacional, por meio de iniciativas como o Fundo Setorial de Energia e o programa Luz Para Todos que contemplavam investimentos em pesquisas e instalações de sistemas fotovoltaicos (DHERE, 2005).

4.2 Cenário atual da energia solar fotovoltaica no país

A despeito de o Brasil ter um potencial significativo para o crescimento da energia fotovoltaica, a mesma pode ser considerada pouco difundida no território nacional quando comparada às outras fontes (ELGAMAL; DEMAJOROVIC; AUGUSTO, 2015).

As centrais geradoras de maior escala têm sido implantadas nas regiões Nordeste, Centro-oeste e Sudeste do território brasileiro, em concordância com as taxas de irradiação solar dessas áreas. Segundo Schmela (2020), em 2019 o Brasil manteve a taxa de crescimento no setor solar, houve um aumento de 656,5 MW da capacidade instalada na geração centralizada, totalizando 3.293 MW, o Gráfico 1 mostra a trajetória de crescimento na última década.

Gráfico 1: Evolução da capacidade instalada de geração de energia solar centralizada no Brasil, em MW



Fonte: Elaboração própria a partir de Bezerra, 2021.

Dados obtidos por meio do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), mostram que atualmente estão operando no país 4.287 usinas fotovoltaicas, cuja disposição pelo território brasileiro pode ser visualizada na Figura 10, e totalizam aproximadamente 3,4 GW de potência instalada, o que representa 1,9% da matriz elétrica nacional.

Figura 10 - Distribuição das usinas FV em operação no Brasil



Fonte: ANEEL, 2021.

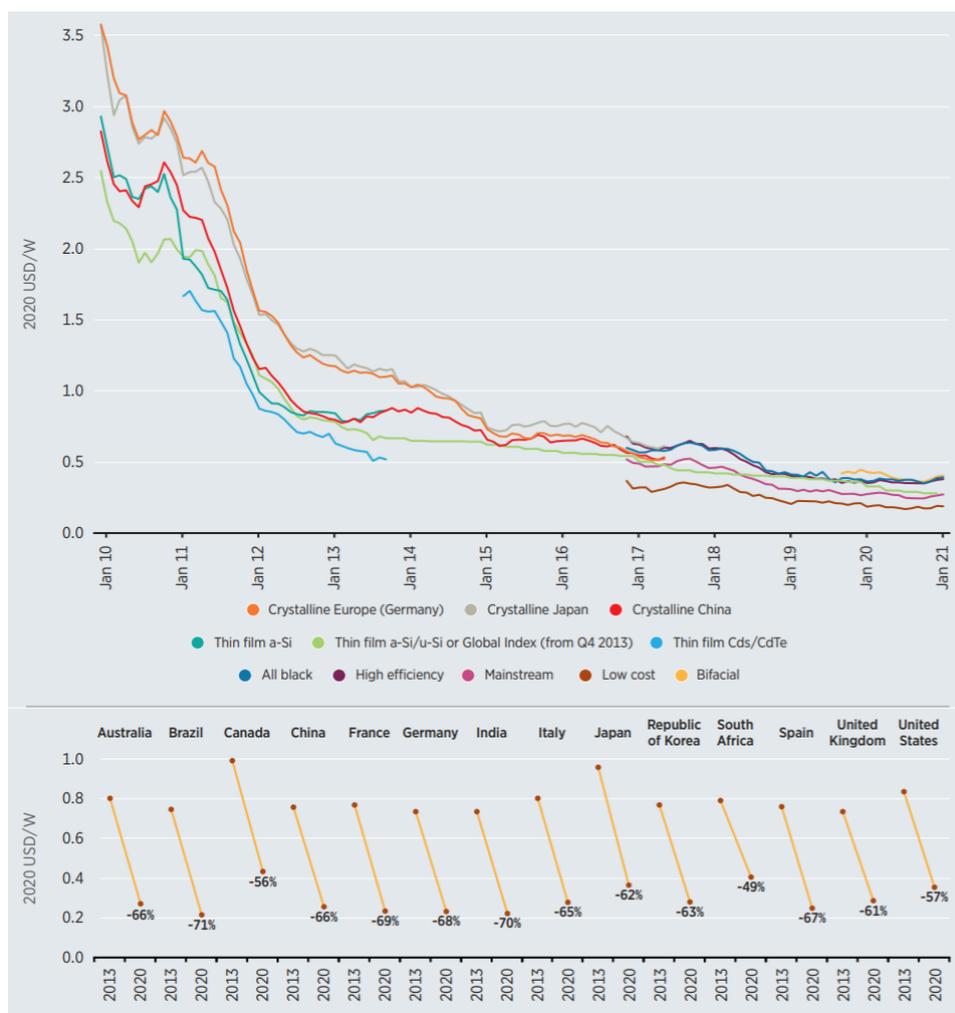
4.3 Custos de projetos fotovoltaicos centralizados

De acordo com a EPE (2020c), a distribuição de custos de equipamentos dos projetos habilitados em leilões de energia no Brasil em 2019, se deram da seguinte maneira: 40% em módulos, 9% em inversores, 15% em estruturas, 11% em transmissão e conexão e 8% em obras civis. Os custos restantes compreendem outras finalidades, como por exemplo, demais equipamentos, sistema de supervisão e controladores.

Os valores de painéis têm passado por recorrentes reduções. O desenvolvimento e inovação dos produtores e, conseqüentemente, a produção em larga escala, explicam o declínio constante nos valores. Na última década, os valores de painéis tiveram uma redução vertiginosa

em escala global, estimada em média de 93%, passando de US\$ 3,50/W, em 2010, para aproximadamente US\$0,50/W em 2020. No Brasil, estima-se que entre 2013 e 2020, o custo de módulos fotovoltaicos tenham tido uma queda de 71% (IRENA, 2021), dados apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2: Preços médios de módulos FV por tecnologia e país de fabricação, 2010 a 2020 e preços médios anuais dos módulos por mercado em 2013 e 2020, em US\$



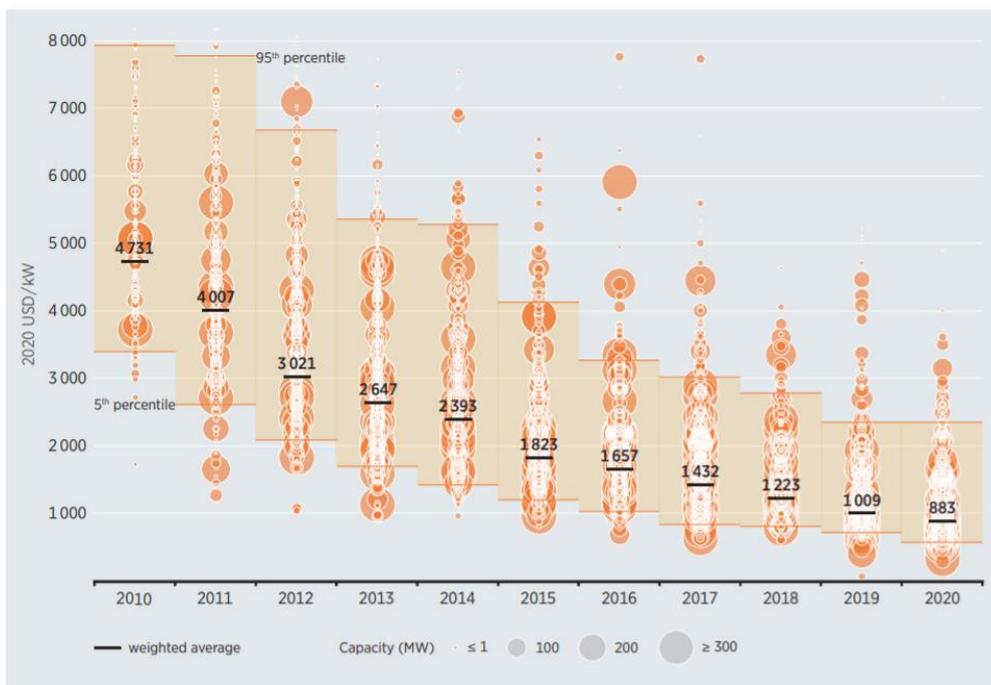
Fonte: IRENA, 2021.

Bezerra (2021) relata que essa redução de valores impulsionou a importação de painéis, sobretudo advindos da China. Em 2012 as importações somavam US\$ 7 milhões ao ano, e em 2020, superaram US\$ 1 bilhão.

Devido à diminuição dos custos de painéis, o preço do conjunto de geração FV também tem sido reduzido de modo enfático, o Gráfico 3 traz a representação da variação de custos totais de sistemas fotovoltaicos no mundo, a média para o ano de 2010 era de US\$4.731/kW e para 2020, a média encontrada foi US\$883/kW, uma redução de cerca de 80%, superando a previsão da EPE (2014) *apud*. IEA (2012), que estimava um decréscimo de valores de 55% para empreendimentos centralizados.

Santiago (2019) explica que, o que tem ocorrido é um efeito em cadeia, o aumento da produção implica em custos mais baixos, havendo assim maior demanda e maior estímulo do mercado. Essa retração de valores pode também ser atribuída à otimização dos processos de fábrica, a redução dos custos na produção, como os de mão-de-obra e o aumento da eficiência dos módulos (IRENA, 2021).

Gráfico 3: Custo total do sistema fotovoltaico instalado e médias para sistemas de 2010 a 2020, em US\$/kW.

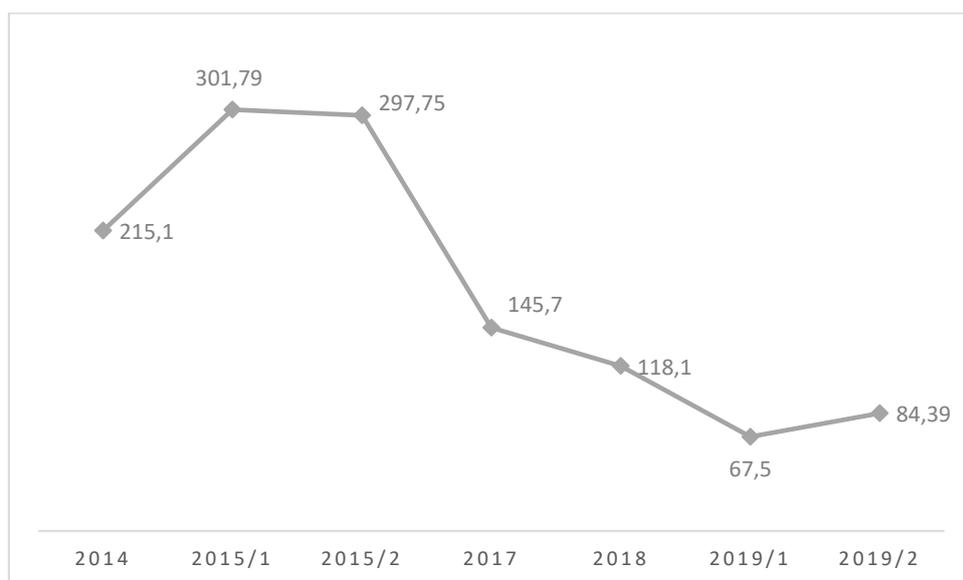


Fonte: IRENA, 2021.

No que tange ao custo da eletricidade solar, o IRENA (2021) estima que tenha ocorrido uma queda global nos valores de 85% nos últimos 10 anos. Assim sendo, o MWh, que em 2010 custava US\$ 318,00, passou, em média, para US\$ 57,00.

No Brasil, entre 2014 e 2019, a fonte solar teve participação em sete leilões de energia. Houve uma redução drástica nos preços do MWh, que pode ser observada no Gráfico 4. Enquanto o valor médio em 2015 alcançava cerca de R\$ 300,00/MWh, em 2019, não ultrapassou R\$ 90,00/MWh.

Gráfico 4: Preço médio da energia solar fotovoltaica comercializada em leilões, em R\$/MWh



Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2020c.

Uma hipótese que pode explicar a queda nos preços do MWh nos leilões, no decorrer dos anos, é o fato de que, no passado, as UFV eram empreendimentos menores, mas que apresentavam uma margem de lucro elevada, e atualmente, têm-se usinas de grande porte, que possuem margens de lucros mais baixas, mas que têm ganhos no montante de energia comercializada. Tal fenômeno foi observado no setor de energia eólica.

Outra métrica a ser apurada é conhecida como o Custo Nivelado de Energia (LCOE). Guimarães (2019), relata que o LCOE é representado pelo custo por MWh, em unidades monetárias descontadas, da construção e operação de uma central geradora no decorrer de seu ciclo de vida útil. Por vezes, o cálculo do Custo Nivelado de Energia é empregado visando a avaliação de competitividades entre fontes energéticas.

A EPE (2021a) realizou um estudo onde o LCOE encontrado para a energia fotovoltaica ficou entre R\$100/MWh e R\$200/MWh, sendo o segundo tipo de fonte com melhor resultado, ficando atrás somente da energia eólica. Deste modo, a energia solar, em conjunto com a eólica,

são, no momento, as fontes mais competitivas de geração de eletricidade no país (BEZERRA, 2021).

4.4 Indústria de componentes para painéis FV no Brasil

O silício metalúrgico é matéria prima para produção silício cristalino, que por sua vez é insumo primordial para a confecção de painéis fotovoltaicos (CARVALHO; MESQUITA; ROCIO, 2014). Mesmo o Brasil sendo um dos maiores produtores mundiais de silício metalúrgico, não se realizam aqui os processos de purificação em grande escala. Deste modo, o mercado brasileiro fica na dependência de importação destes materiais, predominantemente advindos da Ásia. Apesar da indústria nacional possuir condições técnicas para fornecer os insumos base para montagem de módulos, tais como vidros, alumínio, plásticos e circuitos, ela ainda carece de relevância na produção de silício de grau solar. Todavia, outras indústrias acabam por se beneficiar com este crescente mercado, como as metalúrgicas de aço e alumínio, que acabam fornecendo estruturas metálicas para as placas montadas no Brasil (DANTAS, 2020).

Dado o contexto de crise econômica e excesso de oferta estrutural, há incerteza quanto à manutenção da implantação de projetos de energia solar, o que pode comprometer a implantação da indústria de painéis e equipamentos dos sistemas fotovoltaicos no país, que ainda está em fase inicial, e não atingiu competitividade perante a fabricação proveniente de outros países. Outros países, notadamente a China, que já atingiram escala de produção elevada, percorreram parte da curva de aprendizado tecnológico e se deparam com uma carga tributária modesta, senão negativa (dada a política de incentivos) (ESPOSITO, 2017).

Segundo Custódio (2020), existem sete empresas produtoras de módulos fotovoltaicos instaladas no Brasil, a saber:

- Balfar Solar, localizada no Paraná;
- BYD, empresa de origem chinesa, instalada em Campinas no interior de São Paulo;
- Flextronics Internacional, grupo americano, que no Brasil encontra-se em Sorocaba, São Paulo;
- Globo Brasil, localizada em Valinhos, São Paulo;

- Minasol, que possui duas unidades, uma em Araguari no triângulo mineiro e outra em Macapá, capital do Amapá;
- Premier Montagens, possui planta em Osasco, São Paulo;
- Pure Energy, única fábrica situada no nordeste, no município de Marechal Deodoro em Alagoas.

4.5 Expansão da energia solar

Futuramente regiões como Sudeste e Sul do país se tornarão mais competitivas no cenário das grandes centrais solares, o que pode ser justificado em fatores que, além dos bons níveis de irradiação destas áreas, se relacionam com aspectos econômicos, logísticos e de atendimento de demanda. Os principais são: a disponibilidade de aproveitamento de linhas de transmissão já existentes, o encurtamento da distância dos centros de carga, que se encontram predominantemente concentrados nessa região do SIN (PEREIRA *et al.*, 2017).

Existem 68 centrais em processo de construção. Somadas, possuem potência outorgada de 2,6 GW (ANEEL, 2021). Quanto a projetos futuros, estima-se que até 2050, a capacidade instalada em geração centralizada seja de até 90 GW de potência (EPE, 2020b).

4.6. Limitações para expansão no Brasil

Países como Alemanha, Itália, China e Estados Unidos têm em comum um fator de suma importância para a expansão dos processos de implantação: o suporte de seus governos. Esta atuação tem possibilitado maior acesso à pesquisa e desenvolvimento (ELGAMAL; DEMAJOROVIC; AUGUSTO, 2015).

Entende-se que estas medidas de encorajamento por parte do estado estão fundamentadas em esforços para a redução da emissão de GEE, porém falta ao Brasil o mesmo engajamento (ELGAMAL; DEMAJOROVIC, 2020).

No que tange à legislação e incentivos, alguns obstáculos que interferem na difusão da geração FV no Brasil estão sendo destituídos, alguns projetos de lei que visam a expansão da energia fotovoltaica já estão tramitando no Congresso Nacional. Tem ocorrido também, a redução na tributação para projetos de geração, transmissão e distribuição (DIAS *et al.*, 2017).

Faz-se necessária a criação de aspectos técnicos e critérios ambientais específicos para este tipo de empreendimento, para que o desenvolvimento do marco regulatório não seja somente uma adequação de instrumentos legais já existentes e que foram formulados para demais tipos de usinas. A aprovação da legislação possibilitará a realização de mais estudos, diretrizes e referências para novos projetos (PERAZZOLI *et al.*, 2020).

Outro fato relevante é que investidores do exterior, como por exemplo, multinacionais fabricantes de painéis, optam por não destinar seus esforços abrindo fábricas no Brasil devido ao alto risco, atribuído principalmente à instabilidade política e regulatória e, por consequência, à insegurança do mercado (CARSTENS; CUNHA, 2019). A velocidade de evolução de tecnologias também é um fator a se considerar, uma vez que modificações e aperfeiçoamentos são aplicados a placas e módulos anualmente, além do desenvolvimento de novos materiais, o que evidencia a urgente necessidade de fortalecimento de estudos, pesquisas e projetos sobre esta temática (EPE, 2020a).

Quando se compara o Brasil com países líderes em energia FV, como China, EUA e Alemanha por exemplo, fica evidenciada a defasagem de investimentos, sobretudo no âmbito de desenvolvimento tecnológico e pesquisa na área (SANTIAGO, 2019).

4.7. Desafios futuros

De acordo com o Plano Nacional de Energia – 2050 (EPE, 2020), a necessidade de eletricidade a ser atendida pela geração centralizada aumentaria cerca de 2,5 vezes em relação aos valores do ano base do estudo, 2015, dados apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Estimativa da evolução da demanda por eletricidade a ser atendida por GC



Fonte: EPE, 2020a.

Neste caso, existem duas conjunturas, a de estagnação na qual, considerando-se os valores médios de consumo de energia *per capita* do ano base faz-se a estimativa para os anos subsequentes. A segunda conjuntura é chamada de desafio da expansão e representa a carência de expansão do setor para atendimento a um crescimento da demanda de energia mais expressivo e assim guiar os tomadores de decisão de modo a fortificar e aprimorar políticas, traçar caminhos que levem a saídas inovadoras que viabilizem o crescimento do setor a longo prazo.

Uma adversidade também a ser averiguada é o sistema de transmissão brasileiro. Pode-se dizer que as linhas existentes, em sua maioria, encontram-se em processo de degradação em função do tempo considerável de operação.

Avalia-se que até o ano de 2022, aproximadamente de 96 mil equipamentos deverão ter de ser substituídos, devido ao esgotamento de utilidade para operação, de acordo com a ANACE (2019).

5 INVESTIMENTOS PREVISTOS NO BRASIL

Embora a energia fotovoltaica tenha ganhado mais força no Brasil nos últimos anos, o mercado nacional ainda não apresenta grande relevância para atrair grandes investimentos. No entanto, quando analisadas as perspectivas futuras, o setor apresenta um cenário promissor e otimista, devido entre outros fatores, à expansão dos incentivos governamentais para fontes renováveis (CARSTENS; CUNHA, 2019).

Apenas na última década, o país começou a implementar políticas assertivas e instrumentos regulatórios de incentivo a sistemas de geração fotovoltaica (DIAS *et al.*, 2017). O Brasil atualmente possui políticas e instrumentos governamentais para dar suporte e fomentar a área fotovoltaica. Além disso, esses programas têm o intuito de aumentar a competitividade da indústria brasileira, diversificar a matriz, garantir segurança energética nacional e também instigar a inovação no setor (MDIC, 2018).

Held (2017) afirma que o governo do país faz uso de três estratégias de suporte para incentivar investimentos de partes privadas e, desta forma, estimular a geração centralizada. As estratégias adotadas são: leilões de energia por meio da Aneel, incentivos financeiros e incentivos fiscais.

5.1 Incentivos fiscais e tributários

5.1.1 Convênio 101/97 do Conselho Nacional de Política Fazendária - CONFAZ

Este incentivo concede isenção do ICMS (Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação) nas operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica. É válido para produtos nacionais ou importados, no entanto, de acordo com Silva (2015), não abrange todos os equipamentos, como, por exemplo, inversores e medidores.

5.1.2 Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura - REIDI

É um incentivo fiscal instituído pela lei Nº 11.488 de 2007, que prevê a suspensão da aplicação do PIS e COFINS sobre as aquisições de máquinas, aparelhos, instrumentos e equipamentos novos, prestação de serviços e materiais de construção para utilização ou

incorporação de projetos de diversas naturezas, incluindo centrais fotovoltaicas, que tenham sido aprovados pelo MME. Tais isenções podem ser usufruídas durante 5 anos após a habilitação do projeto (BRASIL, 2007).

5.2 Realização de leilões de energia

Os chamados leilões de energia são processos licitatórios que objetivam instituir e regulamentar a negociação de eletricidade. Os editais, promovidos pelo poder público, estipulam os termos para atendimento de demanda em determinados períodos de tempo (CBIE, 2020; ABRADDEE, 2021). A promoção de leilões tem a finalidade de garantir a sustentabilidade do setor elétrico brasileiro, sem eles, o país se veria em um cenário de maiores ameaças de racionamento e até mesmo desprovisionamento de energia, devido à complexidade em balancear a oferta e consumo (MAIA, 2018).

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), no Brasil, existem diferentes categorias para classificação dos leilões, podendo ser:

- Leilão de Fontes Alternativas ou Leilão de Energias Alternativas – regulamentado através do Decreto nº 5.163 em 2007, destina-se a atender ao crescimento do mercado no ambiente regulado e também, contribuir para o crescimento da figuração de fontes renováveis no cenário energético brasileiro;
- Leilão Estruturante – refere-se a projetos de caráter prioritário em função de seus papéis estratégicos e de interesse público. Objetiva a compra de energia proveniente de empreendimentos indicados por resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e está condicionado à aprovação do presidente da República;
- Leilão de Reserva - regulado pelo Decreto nº 6.353/2008, este tipo de leilão visa fornecer maior nível de confiança e segurança no abastecimento de energia do sistema nacional, contratando eletricidade de usinas já existentes ou até mesmo de novas;
- Leilão de Energia Nova – como o nome sugere, esta categoria prevê a compra e venda de energia de futuras unidades geradoras, com intenção de atender ao aumento de carga das distribuidoras;

- Leilão de Energia Existente – tem propósito de firmar acordo com usinas construídas operante e que possuem custos menores, devido à amortização dos custos;
- Leilão de Ajuste – criado para acerto de desigualdades entre as previsões feitas pelas distribuidoras em leilões e o comportamento de seu mercado.

Os denominados Leilões de Energias Alternativas ocorrem desde 2007, no entanto, nas primeiras edições, contemplavam apenas as fontes eólica, biomassa e hídrica (SANTIAGO, 2019). Este tipo de contratação foi criado afim de aumentar o nível de segurança no abastecimento de eletricidade no SIN. O primeiro leilão voltado à energia solar centralizada ocorreu em 2014, quando foram contratados 890 MW. No ano seguinte, foram realizados mais dois leilões que totalizaram 2.653 MW contratados. Estas ações foram feitas na modalidade “energia de reserva” (MME, 2017).

Em 2021 foram realizados dois leilões na modalidade de Energia Nova e contemplavam a fonte solar fotovoltaica, estes foram os primeiros organizados após a declaração da pandemia da COVID-19. Os contratos estabelecidos envolvem sete empreendimentos em Pernambuco e na Paraíba, que preveem investimentos na ordem de R\$ 900 milhões e capacidade instalada de cerca de 270 MW (ANEEL, 2021).

5.3 Linhas de crédito

5.3.1 Inova Energia

Segundo a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), o programa Inova foi lançado em 2013, sendo uma ação conjunta com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a ANEEL, visando fomento à inovação, desenvolvimento e domínio tecnológico de redes de produção nas áreas de energia renovável como: termossolar, eólica e fotovoltaica. Especificamente para o caso da geração fotovoltaica, o fomento se destina ao desenvolvimento de técnicas para produção de silício de grau solar, células fotovoltaicas de

silício, células de filmes finos, além do desenvolvimento de inversores e demais equipamentos aplicados a sistemas fotovoltaicos.

5.3.2 BNDES

Atualmente existe o programa de financiamento do BNDES, chamado Finem, cujos produtos são voltados para projetos que priorizem temáticas socioambientais, visando trazer benefícios à sociedade. Há uma gama de opções elegíveis, que incluem iniciativas como: saneamento, segurança pública, produção de alimentos, mobilidade urbana, eficiência energética e geração de energia solar (BNDES, 2017).

5.3.2.1. Principais projetos em desenvolvimento em parceria com o BNDES

Usinas fotovoltaicas Araxá: por meio do BNDES Finem foi aprovado o financiamento para a implantação das usinas fotovoltaicas em Araxá, Minas Gerais. Serão duas usinas com capacidade instalada conjunta de 90 MW, o suficiente para abastecer mais de 120 mil residências. O crédito previsto é de R\$ 194 milhões e o projeto é de responsabilidade da empresa espanhola Powertis, que é vinculada ao grupo Soltec Power Holdings (BNDES, 2020a). A conclusão das obras está prevista para 2022 e com o início da operação, espera-se que sejam criados cerca de 1.000 novos postos de trabalho.

Usina Pedranópolis: semelhante à proposta de Araxá, o projeto de Pedranópolis, município situado em São Paulo, conta com financiamento do BNDES, no valor de R\$191 milhões e também é um empreendimento da Powertis (AMICI, 2021). A planta tem previsão para iniciar sua operação em dezembro de 2021, onde deverão atuar aproximadamente 1.400 colaboradores (BNDES, 2020b).

Em conjunto, os empreendimentos de Pedranópolis e Araxá terão capacidade para 225 MW e estima-se que poderão contribuir para redução de emissões de 350 mil toneladas de gás carbônico na atmosfera por ano (POWERTIS, 2020).

Complexo fotovoltaico Sol do Sertão: segundo o BNDES (2020a), este projeto irá dispor de oito instalações em Oliveira de Brejinhos, Bahia, cidade situada à 600 km de Salvador. O crédito concedido pelo Finem foi de R\$ 910 milhões para a proposta idealizada pela Essentia Energia, empresa integrante do grupo de investimentos Pátria. A construção iniciada em abril

de 2020, tem em seu cronograma o encerramento marcado para o segundo semestre de 2021. A projeção é que o complexo seja capaz de produzir até 474 MW, fazendo uso de painéis bifaciais e alimentando assim, 500 mil domicílios (ESSENTIA ENERGIA, 2020).

Complexo fotovoltaico Janaúba: também com financiamento do BNDES, ocorrerá a implantação de 14 centrais em Janaúba no norte de Minas Gerais. Este é o maior projeto do tipo em construção na América Latina. As usinas juntas vão gerar 700 MW de eletricidade, o suficiente para suprir o consumo de mais de 900 mil domicílios, além de gerar 1265 postos de trabalho na fase de instalação. O investimento total neste complexo será de R\$ 2 bilhões e o BNDES irá financiar 72% deste valor (que corresponde à R\$ 1,47 bilhão) (BNDES, 2021). Estes empreendimentos são de responsabilidade da Elera Renováveis, que pertence ao grupo canadense Brookfield.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O cenário energético mundial vem passando por diversas mudanças, apesar de ainda ser dominado pelos combustíveis de origem fóssil, as fontes alternativas de energia têm apresentado crescimento e deste modo, maior representatividade na matriz energética. São notáveis os esforços pelo mundo para que a geração de energia ocorra de maneira mais sustentável e afim de mitigar danos ambientais advindos destes processos. Especificamente no caso Brasil, que já possui um cenário elétrico majoritariamente renovável, as iniciativas de inserção e expansão de outros tipos de fontes além das tradicionais hidrotérmicas, possuem também outros objetivos como a diversificação da matriz e segurança de suprimento energético.

A fonte solar fotovoltaica tem se destacado em diversos países como uma opção de geração limpa e econômica, por não necessitar de grandes obras para instalação e recentemente, pela redução dos valores dos componentes, redução essa alavancada pela popularização deste tipo de fonte. Ainda que não ocorram emissões de gases poluente durante a operação de uma UFV, a implantação de uma central pode acarretar danos socioambientais, como por exemplo a alteração da paisagem, desmatamento e afugentamento da fauna. No entanto, os maiores impactos ambientais gerados por este tipo de fonte, podem ser verificados na fabricação de seus componentes, nas indústrias químicas e metalúrgicas.

No Brasil, a energia FV encontra-se em franca expansão. Em 2018, a participação na matriz elétrica era de 0,5%, em 2019 esse valor dobrou, atingindo 1% de participação (EPE, 2020b), em 2020, a fonte fotovoltaica alcançou a marca de 1,9% na matriz elétrica nacional (EPE, 2021b). Atualmente são mais de 4 mil usinas em operação, com cerca de 3,8 GW de potência. E o subsistema que mais gera energia FV é o Nordeste, sendo responsável pela entrega de cerca de 2,7 GW. Para os próximos anos, há a previsão de acréscimo de 26GW em UFVs por todo o Brasil, segundo outorgas concedidas pela ANEEL.

No que tange a indústria de componentes, o Brasil tem um longo caminho a ser trilhado, atualmente existem apenas sete empresas que fazem a montagem de painéis, mas que ainda enfrentam diversos desafios, sobretudo quanto à concorrência dos preços de artigos importados, desvantagem atribuída à carga tributária incidente sobre os produtos nacionais, que faz com que acabem custando cerca de 35% a mais que os vindos de outros países.

Em escala global os valores de painéis tiveram uma drástica redução na última década, estimativas da IRENA (2021) pontuam uma queda média de 93% no mundo, passando de US\$ 3,50/W, em 2010, para aproximadamente US\$0,50/W em 2020. E para o Brasil, a redução estimada foi de 71%. Impulsionado pela diminuição nos valores de painéis, o preço médio do conjunto de geração FV obteve queda. Em 2010, os custos totais de sistemas fotovoltaicos eram de US\$4.731/kW, e em 2020, alcançaram a média de US\$883/kW, uma redução aproximada 80%.

Os leilões de energia são a maior fonte de contratação de energia solar no Brasil nos dias de hoje. Entre 2015 e 2019, houve queda de 70% nos valores médios do MWh em empreendimento habilitados nos leilões. Em 2021, os projetos do setor lideraram o número de cadastros para leilões de energia nova. O LCOE para a fonte solar no Brasil é o segundo menor entre as demais fontes, tendo média de valores entre R\$100/MWh e R\$200/MWh (EPE, 2021^a), perdendo apenas para a energia eólica, o que reafirma a competitividade deste tipo de fonte.

É possível concluir que o cenário atual do setor é favorável à expansão e desenvolvimento. O Brasil ocupa uma posição privilegiada em termos de incidência de luminosidade solar e pode-se afirmar que este é um potencial ainda a ser explorado. Contudo se fazem necessário maiores esforços por parte do poder público, não existem legislações específicas para regulamentar o setor e as políticas de incentivo podem ser renovadas e incrementadas, o apoio dos governos é

apontado como fator decisivo em casos de sucesso em outros países, como Japão, Alemanha e China. Também fica claro que são requeridos investimentos nas indústrias e área de pesquisas, além do fato da tecnologia por trás deste tipo de geração passar por atualizações constantes, seria muito proveitoso para o Brasil o desenvolvimento do setor, gerando empregos e renda, o que também diminuiria a dependência de indústrias internacionais, e por fim, a segurança energética nacional poderá ser incrementada com a maior figuração da energia fotovoltaica na matriz elétrica.

Portanto, propõe-se que mais estudos sejam realizados, sobretudo em temáticas como as novas células de perovskita e a indústria brasileira de produção de componentes fotovoltaicos. Assuntos atuais e de extrema importância para o crescimento e desenvolvimento do setor no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/>. Acesso em 20 nov. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Leilões de energia da ANEEL e CCEE viabilizam R\$ 4 bi de investimentos em renováveis. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3wrtjie>. Acesso em 19 ago. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em 29 jun. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 876, de 10 de março de 2020**. Estabelece os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga de autorização para exploração e à alteração da capacidade instalada de centrais geradoras Eólicas, Fotovoltaicas, Termelétricas e outras fontes alternativas e à comunicação de implantação de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida. 2020. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020876.pdf>. Acesso em 19 mai. 2021.

AMICI, Eduarda. Powertis inicia construção de duas usinas solares. **Brasil Energia**, 2021. Disponível em: https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/member-login/?redirect_to=https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/powertis-construira-duas-usinas-fotovoltaicas-com-potencia-de-225-mw-no-brasil/. Acesso em: 12 mai. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADDEE. Leilões de energia. 2021. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/leiloes-de-energia/>. Acesso em 19 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS CONSUMIDORES DE ENERGIA – ANACE. Transmissão continuará relevante, na avaliação do planejamento. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.anacebrasil.org.br/noticias/transmissao-continuara-relevante-na-avaliacao-do-planejamento/>. Acesso em 27 jun. 2021.

ASSUNÇÃO, Hélio Delgado. **Degradação de módulos fotovoltaicos de silício cristalino instalados no DEE-UFC**. UFC, Fortaleza, 2014. Disponível em:

<https://fdocumentos.tips/document/degradacao-de-modulos-fotovoltaicos-de-silicio-cristalino-instalados-.html>. Acesso em 17 mai. 2021.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Energia solar**. Banco do Nordeste do Brasil (Caderno Setorial Etene), ano 6, n.174, Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://198.17.121.65/s482-dspace/handle/123456789/834>. Acesso em 29 ago. 2021.

Banco Nacional De Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. **BNDES Finem - Geração de Energia**. BNDES, 2017. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia>. Acesso em: 12 mai. 2021.

Banco Nacional De Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. **BNDES destina R\$ 1,1 bi à geração de energia solar**. Agência BNDES de Notícias, 2020. Disponível em: [https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-destina-R\\$-11-bi-a-geracao-de-energia-solar/](https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-destina-R$-11-bi-a-geracao-de-energia-solar/). Acesso em: 12 mai. 2021.

Banco Nacional De Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. **BNDES financia maior complexo de energia solar em construção na América Latina**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/05/bndes-financia-maior-complexo-de-energia-solar-em-construcao-na-america-latina>. Acesso em: 24 mai. 2021.

BRASIL. **Lei nº 11.488, de 15 de junho de 2007**. Cria o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura - REIDI. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111488.htm. Acesso em 24 mai. 2021.

BRASIL. **Portaria nº 538, de 29 de julho de 2021**. Divulgar, para Consulta Pública, a minuta de Portaria Normativa contendo as Diretrizes para a Oferta de Redução Voluntária de Demanda de Energia Elétrica - RVD para Atendimento ao Sistema Interligado Nacional - SIN. Brasília: DOU Diário Oficial da União. Publicado no D.O.U. de 02 de agosto de 2021a. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-538/gm/mme-de-29-de-julho-de-2021-335468238>. Acesso em 29 ago. 2021.

BRASIL, Deilton Ribeiro. **Reflexões sobre o licenciamento ambiental do processo de produção de energia solar fotovoltaica.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 2, p. 6735-6763, 2020.

BRAUNN, Ricardo Almeida; LARSEN, Gabriel. **Efeito Fotoelétrico.** XVI Encontro Anual de Produção Científica - ENAPROC, v. 1, n. 1, 2019. Disponível em: <https://periodicos.uniuv.edu.br/enaproc/article/view/615>. Acesso em 16 abr. 2021.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. [Site institucional]. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/>. Acesso em: 24 mai. 2021.

CARSTENS, Danielle Denes; DA CUNHA, Sieglinde Kindl. **Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil.** Energy policy, v. 125, p. 396-404, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421518307183>. Acesso em 18 mai. 2021.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; ROCIO, Marco Aurélio Ramalho. **A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?** Rio de Janeiro, n. 40, p. [205]-233, 2014. Disponível em: <http://pergamum/docs/000026/000026C0.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2021.

CASEY, Brandi. Solar Panel Ratings Explained. **Solaris**, 2018. Disponível em: <https://www.solaris-shop.com/blog/solar-panel-ratings-explained/>. Acesso em: 6 jul. 2021.

CASTRO, L. C. **Análise comparativa para geração de energia heliotérmica em diferentes regiões brasileiras.** 2016. 56 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/13369>. Acesso em 15 abr. 2021.

CASTRO, R. K. **Desenvolvimento de Eletrodos e Substratos Poliméricos Flexíveis Aplicados à Dispositivos Fotovoltaicos Orgânicos.** 2018. 148 p. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.36035>. Acesso em: 17 mai. 2021.

Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. **Alternativas energéticas: Uma visão da Cemig**. CEMIG, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/wp-content/uploads/2013/04/Alternativas-Energ%C3%A9ticas-Uma-Visao-Cemig.pdf>. Acesso em 15 mai. 2021.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA – CBIE. **Como funcionam os leilões de energia?** CBIE, 2020. Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/como-funcionam-os-leiloes-de-energia/>. Acesso em: 19 de ago. 2021.

COSTA, André Moura Gomes; LOPES, Bruno Marciano; UTURBEY, Wadaed. Mapeamento do potencial de geração solar fotovoltaica no Brasil – uma abordagem preliminar. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 9, n. 1, p. 30-40, 2018.

CUSTÓDIO, Thais. A luta da indústria brasileira de painéis solares. *Brasil Energia*, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://editorabrasilenergia.com.br/a-luta-da-industria-brasileira-de-paineis-solares/>. Acesso em 17 ago. 2021.

DANTAS, Stefano Giacomazzi. **Oportunidades e desafios da geração solar fotovoltaica no semiárido do Brasil**. 2020. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9680/1/TD_2541.pdf. Acesso em 11 mai. 2021.

DIAS, César Luiz et al. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. **Renewable Energy**, v. 114, p. 367-375, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117306468>. Acesso em 18. mai. 2021.

CAMARGO, Suzana. Disney constrói usina solar gigantesca para reduzir emissões em 50% até 2020. *Conexão Planeta*, 2019. Disponível em: <https://conexaoplaneta.com.br/blog/disney-construi-usina-solar-gigantesca-para-reduzir-emissoes-em-50-ate-2020/>. Acesso em: 16 de mai. 2021.

DHERE, Neelkanth G. et al. **History of solar energy research in Brazil**. In: *Proceedings of ISES 2005 Solar World Congress*. 2005. p. 1-6. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.477.2068&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em 15 mai. 2021.

DUTRA, A. E. Impactos socioeconômicos da energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, Fortaleza, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1016>. Acesso em 15 abr. 2021.

ELGAMAL, G.; DEMAJOROVIC, J. As barreiras e perspectivas para geração de energia elétrica por painéis solares fotovoltaicos na matriz energética brasileira. Rev. Gest. Ambient. e Sust. – GeAS. v. 9(1). p. 1-28, 2020.

ELGAMAL, G.; DEMAJOROVIC, J; AUGUSTO, E. Os desafios da implementação da energia fotovoltaica no Brasil: uma análise dos modelos nos principais mercados mundiais. XVII Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Nota Técnica. Rio de Janeiro, maio 2012. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/files/analise-da-insercao-da-geracao-solar-na-matriz-eletrica-brasileira-EPE-2012.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2021: Relatório Síntese / Ano base 2020**. Rio de Janeiro, 2021b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 27 ago. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Cadernos de Preços de Geração 2021**. Rio de Janeiro, 2021a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao>. Acesso em: 01 dez. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Expansão da Geração: Projetos Fotovoltaicos nos Leilões de Energia**. Análise dos leilões A-4 e A-6 de 2019. Rio de Janeiro, 2020c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-457/NT%20EPE-DEE-003-2020-r0.pdf>. Acesso em 30 nov. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Expansão da Geração: Solar fotovoltaica flutuante**. Rio de Janeiro, 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-nt-sobre-sistemas-fotovoltaicos-flutuantes>. Acesso em 27 mai. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos**. Nota técnica DEA 19/14. Rio de Janeiro, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia - 2050**. Rio de Janeiro, 2020b. Disponível em <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em 25 mai. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Nota técnica PR 04/18. Rio de Janeiro, 2018b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/mme-publica-conjunto-de-estudos-de-apoio-ao-pne-2050>. Acesso em 18 nov. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050**: Nota Técnica PR 07/18. Rio de Janeiro, 2018a. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em 27 mai. 2021.

ESPOSITO, Alexandre Siciliano. Panoramas setoriais 2030: elétrico. In: **Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017. p. [159]-172. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/14244?&locale=pt_BR. Acesso em 28 jan 2021.

ESSENTIA ENERGIA. [Site institucional]. Disponível em: <http://essentiaenergia.com.br/>. Acesso em: 12 mai. 2021.

FERREIRA, Agmar et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181-191, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117310389>. Acesso em 18 mai. 2021.

FILHO, Wilson Pereira Barbosa et al. Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 628-642, 2015. Disponível em: http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/3467/2519. Acesso em 29 abr 2021.

FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS - FINEP. [Site institucional]. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/>. Acesso em: 24 mai. 2021.

GADELHA, SR de B. Consumo de eletricidade e crescimento econômico no Brasil. **19º SINAPE–Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística**, São Pedro, SP. 2010. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/sinape/19sinape/node/914>. Acesso em 29 ago. 2021.

GARCÍA, Mario. Inversores inteligentes en sistemas de energía solar fotovoltaica. **Revista de Divulgación Científica – Universitarios Potosinos**, v. 16, n. 238, p. 24-29, 2019. Disponível em: <http://www.uaslp.mx/Comunicacion-Social/Documents/Divulgacion/Revista/Dieciseis/universitarios%20potosinos%20238.pdf#page=26>. Acesso em 10 jul. 2021

GLOBAL SOLAR ATLAS. [Site institucional]. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map>. Acesso em 13 mai. 2021.

GONCALVES, André Rodrigues et al. Cenários de expansão da geração solar e eólica na matriz elétrica brasileira. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/499>. Acesso em 29 ago. 2021.

GUARNIERI, Mauricio Vivan. **Usinas Solares Fotovoltaicas com Seguimento em um Eixo no Brasil: Aspectos da Construção, Custos e Expectativa de Desempenho**. 184p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Santa Catarina, Florianópolis. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/189002>. Acesso em: 20 jul. 2021.

- GUIMARÃES, L. S. **O Custo Nivelado da Eletricidade e seu Impacto na Transição Energética.** FGV Energia. 2019. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opiniao_-_transicao_energetica.pdf. Acesso em 01 dez. 2021.
- GUZZO, P. L. Quartzos. In: LUZ, A. B.; LINS, F. F. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações.** Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 681-721.
- HELD, Gerrit Simon Rudolf. **The dawn of solar power in Brazil: current state and future challenges.** Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2017. Tese de Doutorado. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/19224/The%20Dawn%20of%20Solar%20Power%20in%20Brazil.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em 18 mai. 2021.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2020.** Emirados Árabes Unidos, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>. Acesso em 29 nov. 2021.
- LIMA, Ariane A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/zmFYrhnnhLQ8dMHk7CDmSfs/?lang=pt>. Acesso em 29 jun. 2021.
- MARQUES, F. C. Minicurso de Fabricação de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos. **IFGW/Unicamp**, Ed., ed, 2014.
- MARQUES, P. S. G. Caracterização e Purificação de Quartzos para Indústria Fotovoltaica. **Escola Politécnica, Rio de Janeiro, UFRJ**, 2013.
- MARTINS, Lucas Zolini Ruas; FRANCO, Marco Paulo Vianna. Desenvolvimento local a partir da geração centralizada de energia solar fotovoltaica: o modelo regulatório da usina de Pirapora-MG. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**. v. 8. P. 357-381. Set/dez 2019. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbpd>. Acesso em 19 mai. 2021.

MATSUMOTO, Agatha. **Desenvolvimento de células fotovoltaicas orgânicas e flexíveis**. 2013. 107 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266653>. Acesso em: 17 mai. 2021.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC. “**Relatório Final - Grupo de Trabalho solar fotovoltaico (05/12/2017 A 05/03/2018)**”. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/produktividade-e-comercio-exterior/pt-br/images/REPOSITARIO/sdci/2018-Relatorio-GTFotovoltaico-Camex.pdf/view>. Acesso em 24 mai. 2021.

Ministério de Minas e Energia – MME, **Energia Solar no Brasil e Mundo Ano de referência - 2016**. 2017. Disponível em: <http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/IFES/BV/mme74.pdf>. Acesso em 24 mai. 2021.

MONTEIRO, Leandro da Silva; SILVEIRA, Dierci. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma análise das políticas públicas e das formas de financiamento, **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – XV SEGeT**, 2018. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos18/22626265.pdf>. Acesso em 05 mai. 2021.

MORALES, Oswaldo Morales et al. **Construção e caracterização de células solares de filmes finos de CdS e CdTe**. Ilha Solteira–SP: Dissertação apresentada a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, 2011.

MOURA, R. G. BARBOSA, M. V. LOPES, P. L. A gestão de projeto para instalação de uma usina de energia fotovoltaica: compreendendo algumas ferramentas estratégicas. Revista *Valore. Volta Redonda*, 2019. Disponível em: <https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/view/395/297>. Acesso em 20 nov. 2021.

PERAZA, Danielle Goulart. **Estudo de viabilidade da instalação de usinas solares fotovoltaicas no estado do Rio Grande do Sul**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PERAZZOLI, Débora Lia; GOBBI, Eduardo Felga; TIEPOLO, Gerson Máximo. Proposta de critérios norteadores e requisitos mínimos para licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 333-344, 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522020000200333&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em 30 abr 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em 27 fev. 2021

POWERDIS. **A Powerdis inicia a construção de 225 MW no Brasil**. Powerdis, 2021. Disponível em: <https://powerdis.com/pt-pt/a-powerdis-inicia-a-construcao-de-225-mw-no-brasil/>. Acesso em 12 mai. 2021.

PRESS, F. et al. **Para entender a Terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-499, 2014.

QIU, L., ONO, L. K., QI, Y. **Advances and challenges to the commercialization of organiceinorganic halide perovskite solar cell technology**. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468606917301363>. Acesso em 19 nov. 2021.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; KRENZINHER, Arno; ROMERO, Faustino Chenlo. Descrição e análise de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos. **RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 15, n. 1, p. 25-50, 2013. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/2428>. Acesso em 10 jul. 2021

REIS, Dartisson de Castro. **Análise Crítica do Processo de Licenciamento Ambiental de Usinas Fotovoltaicas**. 2015. 152 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Engenharia, Belo Horizonte, MG.

RELLA, Ricardo. Energia fotovoltaica no Brasil. **Revista de Iniciação Científica**, v. 15, n.1, p.28-38, 2017. Disponível em: <http://periodicos.unesc.net/iniciacaocientifica/article/view/2937>. Acesso em 21 abr. 2021

RIBEIRO JÚNIOR, Luiz Carlos. **Inversores Inteligentes em Sistemas Fotovoltaicos para Controle Integrado de Funções Utilizando o OpenDSS**. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

ROUBICEK, Marcelo. Como a crise atual do setor elétrico se compara a 2001. **Nexo**, 2021. Disponível em <https://www.nexojornal.com.br/expresso/2021/05/31/Como-a-crise-atual-do-setor-el%C3%A9trico-se-compara-a-2001>. Acesso em 29 ago. 2021.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Editora UFSC, 2004.

SANTIAGO, João Vitor Assad. **O mercado emergente de energia solar fotovoltaica no Brasil entre 2012 e 2018: avanços, desafios e perspectivas**. 138 p. Dissertação (Mestrado em Administração). Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2019.

SANTOS, Amanda Moraes dos. Tecnologia fotovoltaica. **Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE**. 2013. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006143.pdf>. Acesso em 16 mai. 2021.

SCHMELA, Michael. Global Market Outlook For Solar Power 2020-2024. **SolarPower Europe**. 2020. Disponível em: https://energypedia.info/wiki/Publication_-_Global_Market_Outlook_For_Solar_Power_2020-2024. Acesso em 28 jun. 2021.

SILVA, L., SHAYANI, R., OLIVEIRA M. A. Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica, com levantamento de custos ambientais, aplicada ao Distrito Federal. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**, Gramado, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/527>. Acesso em 15 abr. 2021.

SILVA, Rutelly Marques da. Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios. **Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado**, 2015. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>. Acesso em 24 mai. 2021.

SIMIONI, T. O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil. **Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE**, 2017.

SOUZA, Amaury, ARISTONE, Flavio. Estudo da eficiência energética de células fotovoltaicas em função da radiação solar no centro-oeste brasileiro. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 2, n. 7, p. 115-128, 2016. Disponível em: <http://www.periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/interespaco/article/view/7368>. Acesso em 29 abr. 2021.

TOMALSQUIM, M. T. (Coord). **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

VILLALVA, Marcelo. Filmes finos CIGS: uma alternativa ao silício cristalino. **Canal Solar**, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. [S.l: s.n.], 2012.

WU, Cucun *et al.* **The Dawn of Lead-Free Perovskite Solar Cell: Highly Stable Double Perovskite Cs₂ AgBiBr₆ Film**. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321882376_The_Dawn_of_Lead-Free_Perovskite_Solar_Cell_Highly_Stable_Double_Perovskite_Cs_2_AgBiBr_6_Film. Acesso em 21 nov. 2021.

YABUTA, Yukio Ferreira. **Impacto ambiental da fabricação de silício fotovoltaico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.